

**INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 85**



**Peligro geológico por movimientos
en masa en la ciudad de Arequipa**

**Lima, Perú
2021**



INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 85

Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa

**Dirección de Geología Ambiental y Riesgo
Geológico**

Equipo de Investigación:

Manuel Vilchez Mata
Norma Sosa Senticala

Lima, Perú
2021

INGEMMET, Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica
N° 85

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2021-09519

Nombre del autor(es). "Esta es una obra colectiva"

Razón Social: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET)

Domicilio: Av. Canadá N° 1470, San Borja, Lima, Perú

Primera Edición, INGENMET 2021

Se terminó de imprimir el 31 de agosto 2021 en los talleres del INGENMET

Tiraje: 25

© INGENMET

Presidente Ejecutivo: Víctor Manuel Díaz Yosa.

Gerente General: Luis Panizo Uriarte.

Comité Editor: Lionel Fídel Smoll, Yorri Carrasco Pinares.

Dirección encargada del estudio

Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico: Lionel Fídel Smoll.

Unidad encargada de edición

Unidad de Relaciones Institucionales: Yorri Carrasco Pinares.

Revisión Técnica: Mirian Mamani Huisa, Segundo Núñez Juárez.

Revisor Externo: Iván Santos Paredes.

Corrección gramatical y de estilo: Nelly Córdova Núñez.

Diagramación: Erick Rodríguez Zelada.

Fotografía de la carátula: Vista con dirección al noreste, donde se observa al fondo el maravilloso volcán Misti; así como al puente Bolognesi, conocido como Puente Real y Puente Viejo, por donde cruza el río Chili. el cual se encuentra cerca del Monasterio de Santa. Catalina, es una de las construcciones más antiguas de la ciudad de Arequipa.

Referencia bibliográfica

Vilchez, M. & Sosa, N. (2021) - Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 85, 236 p., 5 mapas.

Publicación disponible en libre acceso en el Repositorio Institucional del INGENMET. La utilización, traducción y creación de obras derivadas de la presente publicación están autorizadas, a condición de que se cite la fuente original ya sea contenida en medio impreso o digital (<https://repositorio.ingemmet.gob.pe>).

Los términos empleados en esta publicación y la presentación de los datos que en ella aparecen, son de exclusiva responsabilidad del equipo de investigación.

Contenido

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	9
CAPÍTULO I.....	11
INTRODUCCIÓN	11
1.1 PRESENTACIÓN	11
1.2 ANTECEDENTES	12
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	13
1.4 PARTICIPACIÓN.....	13
1.5 OBJETIVOS	14
1.6 METODOLOGÍA.....	14
1.7 AGRADECIMIENTOS	15
CAPÍTULO II	17
ASPECTOS GENERALES DE LA CIUDAD DE AREQUIPA.....	17
2.1 UBICACIÓN	17
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN	18
2.3 FACTORES SOCIOECONÓMICOS	21
2.4 INFRAESTRUCTURA.....	24
2.4.1 Servicios básicos	24
2.4.2 Vial terrestre.....	25
2.4.3 Vía aérea.....	26
2.4.4 Vía ferrea	26
2.4.5 Energía.....	27
2.5 CLIMA E HIDROLOGÍA.....	28
2.6 COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELOS	29
2.6.1 Matorrales de zonas áridas a zonas húmedas	29
2.6.2 Herbazales de zonas húmedas a zonas pluviales	30
2.6.3 Coberturas antrópicas.....	30
2.6.4 Otras áreas	31
CAPÍTULO III	33
CONTEXTO LITOLÓGICO-ESTRUCTURAL.....	33
3.1 GENERALIDADES.....	33
3.2 UNIDADES LITOLÓGICAS.....	37
3.2.1 Depósitos inconsolidados (I)	37
3.2.2 Unidades del substrato	43
CAPÍTULO IV	49
ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	49
4.1 INVENTARIO Y CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES	49
4.1.1 Clasificación de la descarga	50
4.2 CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	55
4.2.1 Ensayos de infiltración	55
4.2.2 Interpretación	59

4.3	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	59
4.3.1	Acuíferos	59
4.3.2	Acuitardos	61
4.3.3	Acuífugo	61
4.4	HIDROQUÍMICA	61
4.4.1	Estaciones de muestreo de aguas subterráneas.....	61
4.4.2	Selección de la serie analítica.....	61
4.4.3	Análisis de resultados	61
4.4.4	Parámetros fisicoquímicos de las aguas.....	61
4.4.5	Facies hidroquímicas	62
4.4.6	Diagramas de Piper y evolución de flujos Mifflin.....	67
CAPÍTULO V	71
	GEOMORFOLÓGIA	71
5.1	PENDIENTE DE LOS TERRENOS	71
5.1.1	Terrenos llanos (<1°).....	71
5.1.2	Terrenos inclinados con pendiente suave (1°- 5°).....	71
5.1.3	Pendiente moderada (5° -15°).....	71
5.1.4	Pendiente fuerte (15° - 25°).....	71
5.1.5	Pendiente muy fuerte (25° - 45°).....	71
5.1.6	Pendiente muy escarpados (> 45°).....	71
5.2	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	72
5.3	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	72
5.3.1	Geoformas de carácter tectónico-degradacional y denudacional	72
5.3.2	Geoformas de carácter depositacional y agradacional	81
CAPÍTULO VI	99
	PELIGROS NATURALES	99
6.1	GENERALIDADES.....	99
6.2	PELIGRO/AMENAZA.....	100
6.3	REGISTRO DE EVENTOS PRODUCIDOS EN LA CIUDAD DE AREQUIPA.....	100
6.4	MOVIMIENTOS EN MASA.....	104
6.5	OTROS PELIGROS GEOLÓGICOS.....	112
6.6	FACTORES DE INESTABILIDAD DE LAS LADERAS.....	113
6.7	EVIDENCIAS DE INESTABILIDAD RECONOCIDAS	114
6.8	PELIGROS GEOHIDROLÓGICOS.....	115
6.9	INVENTARIO Y FRECUENCIA DE OCURRENCIAS DE PELIGROS GEOLÓGICOS.....	115
6.10	INUNDACIONES Y FLUJOS DE DETRITOS QUE AFECTAN A LA CIUDAD DE AREQUIPA	118
6.10.1	Caracterización de las torrenteras	119
6.10.2	Condicionantes para la generación de movimientos en masa en la ciudad de Arequipa	119
6.10.3	Secciones transversales medidas en los cauces de quebradas.....	132
6.11	ZONAS CRÍTICAS	136
6.12	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD.....	153
6.12.1	Susceptibilidad a movimientos en masa	153
6.12.2	Susceptibilidad a las inundaciones y erosión fluvial	157
CAPÍTULO VII	161
	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES	161
7.1	GENERALIDADES.....	161

7.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES EN EL RÍO CHILI - CIUDAD DE AREQUIPA	161
7.2.1 Objetivo	161
7.2.2 Antecedentes	161
7.2.3 Metodología	161
7.2.4 Área de estudio	162
7.2.5 Simulación de escenarios de inundación	165
7.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES EN LA QUEBRADA SAN LÁZARO - CIUDAD DE AREQUIPA	174
7.3.1 Objetivo	174
7.3.2 Antecedentes	174
7.3.3 Metodología	174
7.3.4 Área de estudio	174
7.3.5 Simulación de escenarios de flujos aluvionales	179
CAPÍTULO VIII	185
ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE PROBLEMAS POR PELIGROS GEOLÓGICOS Y GEOHIDROLÓGICOS	185
8.1 GENERALIDADES	185
8.2 MEDIDAS ESTRUCTURALES	185
8.2.1 Medidas preventivas y/o correctivas para movimientos en masa	185
8.2.2 Otras medidas de prevención para deslizamientos y cárcavas	205
8.2.3 Medidas para el manejo de subcuencas con lechos fluviales secos	206
8.2.4 Medidas preventivas y/o correctivas para inundaciones y flujos rápidos	207
8.3 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES	210
8.3.1 Reglamentación en el uso de la tierra	210
8.3.2 Realizar trabajos de comunicación con comunidades	210
8.3.3 Monitoreo y Sistemas de Alerta Temprana	210
8.3.4 Elaboración de planes para la reducción de riesgo de desastres	210
8.3.5 Realizar simulacros por la ocurrencia de peligros geológicos	210
CONCLUSIONES	213
RECOMENDACIONES	215
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	217
RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES	225

RESUMEN

El estudio de peligros geológicos por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa, elaborado por el Ingemmet, tiene como objetivos identificar y caracterizar los tipos de peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos ocurridos en su ámbito; brindar información base y temática sobre los peligros que la afectan; contribuir al conocimiento de los peligros geológicos; realizar un cartografiado e inventario de peligros en detalle; determinar zonas críticas; zonificar el territorio según rangos de susceptibilidad y peligro a los movimientos en masa, así como a procesos geohidrológicos; establecer las acciones a tomar para la prevención de los peligros; y, por último, reducir el número de muertos y damnificados por este tipo de eventos.

Los objetivos del estudio se alcanzaron con los trabajos de gabinete y campo. El primero consistió en la revisión, procesamiento de la información geológica de peligros geológicos por movimientos en masa y geohidrológicos, disponible de la región. El segundo sirvió para verificar *in situ* los procesos ocurridos y los daños causados por estos eventos.

En el estudio se realizó un reconocimiento de unidades geomorfológicas por medio de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución con lo cual se pudo tener un registro multianual de las características morfológicas de la zona. Se obtuvo un registro de los peligros geológicos y geohidrológicos que causaron los mayores daños, y se hizo un análisis estadístico de los tipos de ocurrencias y de la infraestructura que fue afectada. Se realizó, además, un inventario y cartografiado de peligros geológicos a escala 1:5000 para lo cual también sirvió la interpretación de fotografías

aéreas del año 1955 así como de imágenes satelitales GeoEye y WorldView de alta resolución.

Se realizó modelos de zonificación de susceptibilidad a los movimientos en masa e inundaciones fluviales mediante el método heurístico, que se basa en la combinación de mapas de factores condicionantes, los cuales son previamente ponderados por el geólogo que encargado del estudio; estos modelos tienen como insumo de validación la ocurrencia de eventos anteriores de similar tipología.

Como resultado de este estudio se puede concluir que las zonas de mayor susceptibilidad a movimientos en masa se localizan en laderas de pendientes fuertes, que presentan depósitos coluviales y volcanoclásticos, poco a medianamente consolidados, también asociados al substrato granodiorítico fracturado y alterado. Las zonas de muy alta susceptibilidad a las inundaciones fluviales se localizan a lo largo de terrazas fluviales bajas, llanuras inundables y cauces antropogenizados de quebradas.

Los dos modelos a escala 1:5000 de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones fluviales de la ciudad de Arequipa son considerados una herramienta importante en los trabajos de zonificación y planificación del territorio, los que contribuirán a solucionar parte de la problemática de los peligros geológicos.

Finalmente, se realizó la simulación numérica de flujos e inundaciones para un tramo del valle del río Chili y la quebrada San Lázaro, utilizando el modelo bidimensional FLO-2D, con el cual se obtuvo escenarios para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años.

ABSTRACT

The study of geological hazards due to mass movements in the city of Arequipa prepared by Ingemmet aims to identify and characterize the types of geological hazards caused by mass and geohydrological movements that occur in its field; provide basic and thematic information about the dangers that affect it; contribute to the knowledge of geological hazards; carry out a mapping and inventory of hazards in detail; determine critical areas; Zoning the territory according to ranges of susceptibility and danger to mass movements, as well as geohydrological processes; establish the actions to be taken to prevent hazards; Finally, reduce the number of deaths and victims of this type of event.

The objectives of the study were achieved with previous cabinet work, which consisted of the review and processing of all geological information and geological hazards by mass and geohydrological movements available in the region, as well as by field work that served to verify in situ the processes occurred and the damages caused by these events.

In the study, a recognition of geomorphological units was carried out by means of the interpretation of high resolution satellite areas and images, with which a multi-year record of the morphological characteristics of the area could be obtained. A record of the geological and geohydrological hazards that caused the greatest damage was obtained, a statistical analysis was made of the types of occurrences and the infrastructure that was affected. In addition, an inventory and mapping of

geological hazards was carried out at a 1: 5,000 scale, for which the interpretation of aerial photographs from 1955, as well as high resolution GeoEye and WorldView satellite images, also served.

Zoning models of susceptibility to mass movements and river floods were performed using the heuristic method, which is based on the combination of maps of conditioning factors which are previously weighted by the geologist conducting the study; These models have as validation input the occurrence of previous events of similar type.

As a result of this study it can be concluded that the areas with the greatest susceptibility to mass movements are located on steep slopes; that present colluvial and volcanoclastic deposits, little to moderately consolidated; also associated to the fractured and altered granodioritic substrate. Areas of very high susceptibility to river flooding are located along low river terraces, flood plains and anthropogenized streams.

The two 1: 5000 scale models of susceptibility to mass movements and river floods of the city of Arequipa, are considered an important tool in the zoning and planning of the territory, which will contribute to solve part of the problem of hazards geological.

Finally, the numerical simulation of flows and floods was carried out for a section of the Chili river valley and the San Lázaro creek, using the two-dimensional model FLO-2D, with which scenarios for return periods of 10, 50, 100 and 500 years.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN

El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), a través de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) en el marco del cumplimiento de sus funciones, tiene la responsabilidad de efectuar entre otras investigaciones el estudio de los peligros geológicos que afectan el territorio nacional, centros poblados y obras de infraestructura. Se realizó el estudio denominado "Elaborar estudios de peligros geológicos en la ciudad de Arequipa", que a través de los diferentes temas tratados busca generar información geocientífica que sirva para prevenir, mitigar o reducir los efectos de los peligros geológicos (movimientos en masa, geohidrológicos y otros peligros geológicos), para reducir o evitar la ocurrencia de desastres futuros, y que la información temática generada sirva como instrumento de planificación de futuros proyectos a desarrollarse en la ciudad. Este estudio también es útil para la Zonificación Ecológica Económica (ZEE), el Ordenamiento Territorial (OT) y la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD).

La ciudad de Arequipa se encuentra ubicada en la zona sur oeste del Perú, a una altura de 2350 ms. n. m., desarrollada entre el valle del río Chili y las faldas del volcán Misti, que forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (De Silva y Francis, 1991); esta urbe se ha expandido hacia sus extremos noreste, noroeste y sureste, pudiéndose encontrar asentamientos poblacionales a faldas de los volcanes Misti, Chachani y Pichu Pichu.

Arequipa es la segunda ciudad en importancia del Perú; su economía se circunscribe a la agricultura, agroindustria, ganadería, el turismo, la minería y los servicios. Dentro de los límites trazados para realizar el estudio de peligros geológicos de la ciudad de Arequipa, se encuentran obras importantes como es la infraestructura del proyecto hidroenergético de la central hidroeléctrica de Charcani; la vía o ruta nacional de la Panamericana Sur; rutas interprovinciales y nacionales con conexión a provincias de las regiones vecinas de Puno y Moquegua, así como el Aeropuerto Internacional Rodríguez Ballón.

Concluidos los trabajos del estudio de evaluación de peligros geológicos a escala regional de la región Arequipa y el Estudio Geoambiental de la cuenca del río Quilca-Vitor-Chili, la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR), del Ingemmet, se propuso realizar el estudio a mayor detalle de la ciudad de Arequipa, específicamente a una escala de 1:5000.

La región de Arequipa y especialmente la ciudad de Arequipa, cercado y distritos aledaños, a pesar de su característico clima semiárido, templado con humedad relativa (calificada como seca con cierta frecuencia y con periodicidad irregular) es severamente afectada por precipitaciones pluviales en la única estación lluviosa del año (verano), las que actúan de forma combinada con la considerable pendiente topográfica de la región, generando avenidas de ríos y quebradas (torrenteras) que a su vez producen inundaciones que afectan asentamientos humanos, vías de comunicación y diferente tipo de infraestructuras, como también ocasiona pérdidas económicas por la frecuente interrupción de servicios públicos como los de saneamiento, energía eléctrica, comunicaciones y transporte, riego agrícola, etc., y en algunas ocasiones hasta la pérdida de vidas humanas, generando altos costos en los trabajos de recuperación de las zonas afectadas. Esto se debe a una deficiente o nula aplicación de estrategias para reducción de desastres, así como a una escasa cultura de prevención.

El problema que se ha generado en la ciudad de Arequipa, y que se genera en estos últimos años a nivel nacional, es el crecimiento acelerado de población. Esto ha motivado que una gran parte de esta se ubique en zonas inseguras e inestables, que amenazan su seguridad física, sus viviendas y las obras de infraestructura que ahí se construyen, exponiéndose a la ocurrencia de flujos de detritos e inundaciones sin que las autoridades del gobierno local, regional o central adopten las medidas pertinentes que ayuden a corregir o mitigar sus efectos.

En este contexto, es importante la necesidad de realizar estudios actualizados con el fin de evaluar y tratar de corregir principalmente el estado de las torrenteras, que frecuentemente son obstruidas de forma irracional, principalmente por la actividad antrópica.

El presente informe permitirá disponer del conocimiento actualizado de los fenómenos y de las características físicas involucradas con el objeto principal de diseñar planes de prevención, contribuyendo de sobremanera al desarrollo socioeconómico del área involucrada y como un aporte en la planificación del territorio, de estudios de planificación de obras de infraestructura, así como en la prevención y gestión del riesgo de desastres.

Para comprender mejor la ocurrencia de los movimientos en masa y procesos geohidrológicos que han dañado infraestructura y afectado la población arequipeña en los últimos años es necesario evaluar cómo y dónde ocurren, sus efectos y la proyección de su evolución futura. En ese sentido, Ingemmet, en el 2015, se propuso identificarlos al detalle, trabajo que incluye el cartografiado de peligros, su inventario y la modelación numérica de flujos a escala 1:5000, evaluación que permitirá proponer un real ordenamiento territorial para la ciudad de Arequipa.

1.2 ANTECEDENTES

La ciudad de Arequipa se ubica dentro de la cuenca del río Quilca-Vítor-Chili que tiene una extensión de 12 470 km²; esta cuenca se ubica en el flanco suroccidental de la cordillera de los Andes; recorre desde sus nacientes hasta el Océano Pacífico 317 km y es que en sus márgenes aluviales, piedemontes volcanoclásticos y laderas se desarrollan las poblaciones de los diferentes distritos que conforman la urbe de Arequipa. Es en este contexto geomorfológico que, en periodo de lluvias extraordinarias, se producen movimientos en masa de tipo flujos de lodo y detritos en mayor frecuencia, así como inundaciones fluviales por desbordamientos del río Chili y de torrenteras que cruzan la ciudad, las cuales causaron y causan daños de diferente magnitud, con innumerables pérdidas económicas y pérdida de vidas humanas.

Se han realizado con anterioridad en la zona estudios regionales y a nivel de cuenca hidrográfica de geodinámica externa; entre ellos resaltan los efectuados por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgos Geológico (DGAR) del Ingemmet, como el estudio “Riesgo Geológico en la región Arequipa” (inédito) y el “Estudio Geoambiental de la Cuenca del Río Quilca-Siguas-Vítor” (inédito). En estos estudios se identifican los peligros geológicos por movimientos en masa y peligros geohidrológicos; se efectúa una evaluación geodinámica de centros poblados y redes viales; así también se determinan zonas críticas en las cuales es necesario trabajar con urgencia en materia de prevención y mitigación para evitar desastres futuros.

Entre los estudios más antiguos realizados por Ingemmet está la memoria descriptiva, “Álbum de mapas de zonificación de

riesgos fisiográficos y climatológicos del Perú” (1997), donde se localizan y analizan los fenómenos de geodinámica externa del país, relacionándolos con la seguridad física de centros poblados, mineros y grandes obras de infraestructura; se identifican áreas susceptibles al peligro geológico, se crea una base de datos de peligros geológicos y se contribuye a la prevención y mitigación de sus efectos.

En el “Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú” (Villacorta *et al.*, 2012), a escala 1:1000000, se zonifica al Perú en base a sus características intrínsecas (litología, geomorfología, pendientes, unidades hidrogeológicas y tipo de cobertura de suelo) en cinco rangos, que van de muy baja a muy alta susceptibilidad a la ocurrencia de peligros por movimientos en masa.

También, existen diferentes estudios y tesis que tratan el estudio de los peligros geológicos que afectan la ciudad de Arequipa, elaborados por diferentes instituciones y universidades, entre las que destacan el “Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002-2015” (Municipalidad Provincial de Arequipa, 2002), en el que se trata el tema del espacio natural y sus amenazas; puntualmente se hace mención a la geodinámica externa y las inundaciones detonadas por lluvias, zonifica la ciudad de Arequipa según niveles de peligro (bajo, medio, peligroso y altamente peligroso), e identifica zonas de riesgo para ciudad (bajo, medio-bajo, medio-alto y alto).

La tesis “Geología y geotecnia para el encauzamiento y defensa ribereña del río Chili, 1 457 km - Tiabaya” (Unda, 2002), reconoce las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona de estudio con la intención de estabilizar los taludes y el cauce para evitar erosión y desborde destructivo, y para proteger la infraestructura menor de captación hidráulica.

El estudio “Inundaciones en la localidad de Arequipa ocasionadas por el ingreso de las torrenteras” (Fuse & Benites, 2001) tiene como objetivo establecer la influencia de las condiciones térmicas del Océano Pacífico, incluyendo la presencia de El Niño y de La Niña sobre las ocurrencias y los volúmenes de lluvia en la localidad de Arequipa, y determinar la frecuencia anual media de desbordamientos hídricos en tramos críticos de las torrenteras.

En el trabajo titulado “Assessment of Volcanic Hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Perú, based on gis and simulations, whit emphasis on lahar” (Delaite, *et al.*, 2005), se efectúa una simulación del comportamiento de un lahar en las quebradas San Lázaro, Huarangal y Agua Salada bajo tres escenarios utilizando el software LAHAR-Z.

La tesis “Estratigrafía, sedimentología y peligro por emplazamiento de lahares, sector Chapi Chico-Uchumayo, valle del río Chili-Arequipa” (Cereceda, 2007), realiza una

identificación y cartografiado de los depósitos de flujos de detritos de origen volcánico (lahar) emplazados en el valle del río Chili con el objetivo de contribuir en la evaluación de peligros volcánicos por emplazamiento de lahares en el valle; también, realiza la simulación de flujos hiperconcentrados en el valle del río Chili para un periodo de retorno de 100 años con ayuda del software FLO-2D.

La tesis de maestría “Gestión del riesgo por inundaciones en asentamientos populares, distrito de Mariano Melgar, Arequipa” (Cruz, 2007), presenta una reflexión sobre la construcción de modelos de gestión local del riesgo de desastres; brinda valiosos aportes de la situación actual urbana del distrito de Mariano Melgar, ubicada en la periferia de la ciudad de Arequipa; y determina la importancia estratégica de la construcción de una red de gestión local del riesgo de desastres que integre las potencialidades culturales de los actores populares, en base a su organización territorial, que los articule en relaciones de mutua cooperación con entidades públicas en el marco de una visión y objetivos compartidos para la reducción de las vulnerabilidades.

El estudio “El río Chili: cuenca árida con presencia minera” (Universidad Nacional San Agustín, 2010), en el capítulo de diagnóstico ambiental de la cuenca, trata de los riesgos y vulnerabilidades asociadas a geodinámica externa (derrumbes, deslizamientos, flujos, erosión de riberas e inundaciones) y también de los riesgos asociados al vulcanismo.

En el trabajo “Combinación de criterios para delimitar zonas propensas a lahar e inundaciones repentinas y zonas de riesgo de la ciudad de Arequipa, Perú” (Thouret, *et al.*, 2013) se discuten criterios para delinear áreas propensas a inundaciones repentinas y peligros de lahar que se localizan a lo largo de lo que está generalmente seco (excepto en temporada de lluvias) como barrancos, canales del río Chili y sus afluentes que diseccionan la ciudad. El estudio se basa principalmente en encuestas de campo y mapeo, pero también toma en cuenta la calidad y la integridad estructural de edificios, los datos socioeconómicos disponibles, y la información obtenida de entrevistas con funcionarios y los administradores de riesgos. También, evalúa la vulnerabilidad de varios sectores de la ciudad, además de los parámetros geológicos y físicos.

En el presente estudio se compila la información referente al inventario de movimientos en masa, otros peligros geológicos y peligros geohidrológicos vistos en anteriores trabajos realizado por Ingemmet. Además, se identificó e inventarió nuevos eventos, así se tienen 164 ocurrencias que corresponden a los de tipo movimientos en masa, 27 a los denominados otros peligros geológicos y 42 son peligros de tipo geohidrológico, lo que hace un total de 233 ocurrencias en la zona de estudio; también, como producto del estudio se determinó 23 zonas consideradas como críticas.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El alcance principal de este estudio es la evaluación de la susceptibilidad y el peligro a los movimientos en masa (deslizamientos, caídas, flujos, etc.) a escala de detalle 1:5000; además, se realizó la simulación de inundaciones fluviales en el río Chili y de flujos de detritos en la quebrada San Lázaro, que afectan la ciudad de Arequipa en temporada de lluvias. Esta información es básica y muy útil en los trabajos de gestión de desastres por peligros geológicos y en el ordenamiento territorial.

Una limitante para la elaboración del estudio ha sido la poca disponibilidad de fotografías aéreas de diferentes años. Para hacer un análisis multitemporal de la evolución de los peligros identificados, solo se contó con fotografías aéreas del año 1955. La falta de estas fue cubierta por imágenes satelitales de alta resolución GeoEye, WorldView3 y de la plataforma Google Earth; sin embargo, estas últimas imágenes no están disponibles con la misma calidad de detalle para toda la ciudad.

Otra limitante del estudio que se manifiesta en el análisis de peligros por flujos de detritos e inundaciones fluviales es la topografía, que aun siendo la escala de trabajo 1:5000, se necesita tener más detalle de la topografía para obtener mejores resultados que reflejen de forma más precisa las zonas que serán afectadas por estos tipos de procesos.

Se debe tener en cuenta que este estudio de peligros geológicos por movimientos en masa y peligros geohidrológicos (inundaciones) es complementario a los estudios de peligros volcánicos realizados con anterioridad por Ingemmet en la zona. Se desprende la idea de que si se quiere realizar una zonificación del peligro geológico de la ciudad de Arequipa, es importante tener en cuenta de forma conjunta todos estos aspectos de los peligros que se presentan en la zona de estudio.

1.4 PARTICIPACIÓN

En el presente estudio participaron los siguientes profesionales de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico (DGAR) del Ingemmet:

Para la ejecución de los trabajos de campo se tuvo la participación de los ingenieros:

- Manuel Vilchez Mata (jefe de proyecto, elaboración y revisión del informe final)
- Norma Sosa Senticala (inventario de peligros y base de datos)
- Sandra Villacorta Chambi (inventario de peligros)
- Fluquer Peña Laureano (hidrogeología y elaboración de mapa hidrogeológico)
- Samuel Lu León (procesamiento SIG, edición y composición de mapas)
- Jhon Chahua Janampa (simulación de inundaciones y flujos de detritos)

1.5 OBJETIVOS

El objetivo general del estudio es generar información temática sobre peligros geológicos que se presenten en el territorio de la ciudad de Arequipa, información que sea usada como una herramienta básica y de utilidad para la actualización de la Zonificación Ecológica Económica (ZEE), planes regionales de Ordenamiento Territorial (OT) y la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) de origen geológico y geohidrológico.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Elaborar el estudio de peligros geológicos por movimientos en masa y peligros geohidrológicos de la ciudad de Arequipa.
- Contribuir al conocimiento de los peligros geológicos de la ciudad de Arequipa.
- Complementar el cartografiado, y completar el inventario de los peligros geológicos, geohidrológicos y otros peligros geológicos, de la ciudad de Arequipa, a escala de detalle.
- Establecer zonas críticas por peligros geológicos futuros (movimientos en masa y geohidrológicos).
- Zonificar el territorio según rangos de susceptibilidad y peligrosidad a los movimientos en masa, así como a procesos geohidrológicos.
- Contribuir al desarrollo sostenible de la ciudad de Arequipa, y al mejoramiento de las condiciones de vida de sus habitantes, brindando a las autoridades y población información de base y temática sobre los peligros que los afectan.
- Establecer las acciones a tomar para la prevención de los peligros por movimientos en masa y peligros geohidrológicos.
- Contribuir a salvar vidas y reducir el número de damnificados por este tipo de eventos.

1.6 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el presente estudio consta de tres etapas de trabajo: Gabinete I, Campo I y Gabinete II.

Gabinete I:

Los trabajos de gabinete I o preliminares consistieron en:

- Elaboración de plan de trabajo.
- Recopilación y evaluación de información bibliográfica; topográfica, hidrometeorológica, geológica, hidrogeológica, uso de suelo, información sobre obras de infraestructura y registro histórico de desastres ocurridos en la ciudad.
- Generación de la cartografía básica: composición del mapa topográfico base utilizando imágenes satelitales GeoEye y WorldView3 de detalle.

- Preparación del Modelo digital del terreno (MDT) mediante el uso de un SIG.
- Generación de mapas temáticos preliminares para su respectiva comprobación de campo.
- Análisis e interpretación geomorfológica y de procesos activos de fotografías aéreas.
- Interpretación y cartografiado de peligros geológicos, a partir de imágenes satelitales Geo Eye, WorldView3 y de la plataforma Google Earth y fotografías áreas disponibles.
- Preparación de la base de datos de inventario de peligros geológicos.

Campo:

Los trabajos de campo se han efectuado entre los años 2015 y 2016, en seis comisiones cubriendo la ciudad de Arequipa y sus distritos, lo que hizo un total aproximado de 95 días de trabajo de campo. En dichas salidas se realizaron las siguientes actividades:

- Inventario, caracterización y cartografiado de peligros geológicos por movimientos en masa, peligros geohidrológicos (erosión e inundación fluvial) y otros peligros geológicos (erosión de laderas); la cartografía se realizó en imágenes a escala 1:5000.
- Evaluación preliminar de la seguridad física de centros poblados, obras de ingeniería no lineal e identificación de zonas críticas.
- Caracterización de unidades litológicas y unidades geomorfológicas en campo.
- Comunicación con comunidades (difusión del estudio y sensibilización a la población y autoridades) sobre la temática de prevención de desastres.

Gabinete II:

Los trabajos de gabinete II o finales han radicado en:

- Procesamiento y depuración de datos en base a la comparación de la información obtenida en los trabajos de Gabinete I y Campo.
- Elaboración y preparación de una base de datos de peligros geológicos y geohidrológicos, que permita su incorporación a los SIG.
- Elaboración de mapas temáticos de factores (geomorfología, litología, pendientes, cobertura vegetal e hidrogeología), composición del mapa de inventario.
- Integración y geoprocesamiento de mapas temáticos en el SIG y elaboración del análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa e inundaciones fluviales; elaboración y edición de los respectivos mapas.

- Determinación y descripción de zonas críticas; elaboración de mapa de zonas críticas.
- Modelamiento de flujos e inundaciones en el río Chili y la quebrada San Lázaro que cruza por la ciudad de Arequipa.
- Preparación y redacción del informe final, selección de fotografías y elaboración de ilustraciones que acompañan al informe.

1.7 AGRADECIMIENTOS

Los autores del estudio queremos agradecer a los gobiernos locales y al Gobierno Regional de Arequipa, a las instituciones públicas (INDECI, CENEPRED, entre otras) y a todos los profesionales que realizaron estudios anteriores en la ciudad de Arequipa, cuya información ha sido valiosa en la elaboración de este trabajo.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LA CIUDAD DE AREQUIPA

2.1 UBICACIÓN

La ciudad de Arequipa se encuentra ubicada en la sierra sur de Perú, entre las coordenadas, geográficas 16° 25' 40" y 16° 22' 58" de latitud sur y 71° 32' 13" y 71° 28' 30" de longitud oeste del meridiano de Greenwich (figura 2.1) (UTM – WGS84: 8199983 y 8169515 N, 213813 y 249340 E).

La zona de estudio comprende un área aproximada de 559 km², conformada por territorio de los distritos de Cerro Colorado, Uchumayo, Tiabaya, Jacobo Hunter, Socabaya, Arequipa, Sachaca, Yanahuara, Cayma, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar, José Luis Bustamante y Rivero, Mollebaya, Paucarpata, Sabandía, Chiguata, Characato y el extremo noroeste del distrito de Quequeña en donde se vienen asentado nuevas poblaciones. Las altitudes en el área evaluada varían

entre 1800 y 2600 m s. n. m., en medio de una cuenca (río Chili) cuya pendiente tiene el 5 % inclinada hacia el suroeste. En su extremo oriental la cuenca del Chili está limitada por los volcanes Misti y Pichu Pichu, y en su extremo suroriental está limitada por los cerros del Batolito de la Costa (Mariño *et al.*, 2016).

La zona de estudio es diseccionada por quebradas o torrenteras tributarias del río Chili, que se encuentran ubicadas en ambas márgenes, siendo la dirección de drenaje de las quebradas que se encuentran en la margen izquierda de NE-SO y de las quebradas ubicadas en la margen derecha de dirección N-S. A lo largo de su historia, estas quebradas han afectado a la ciudad de Arequipa en varias ocasiones, activadas por lluvias extraordinarias que causaron serios daños materiales y en muchas ocasiones han cobrado vidas humanas (figura 2.2).

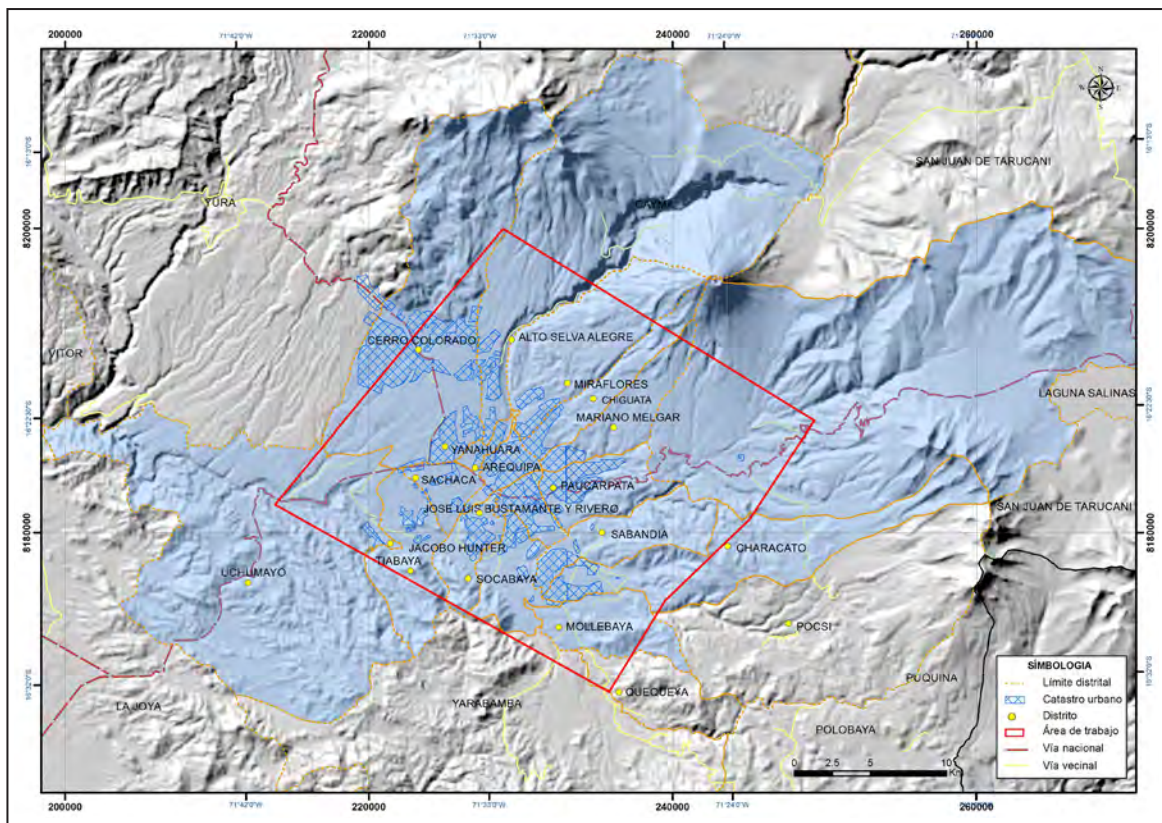


Figura 2.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio.

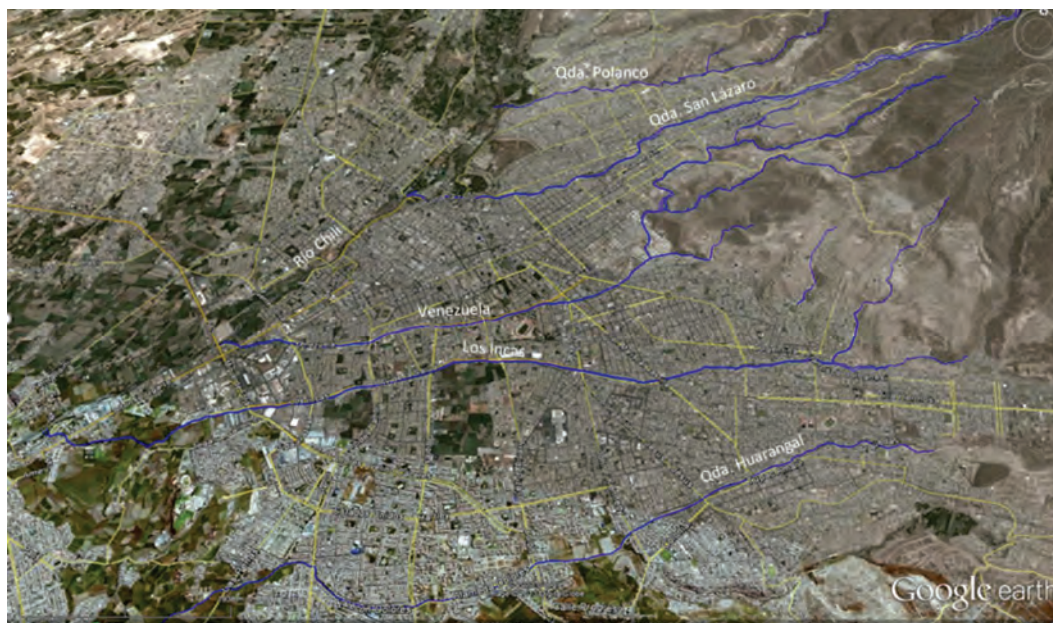


Figura 2.2 Ubicación y trayectoria de las cinco torrenteras que atraviesan la ciudad de Arequipa, margen derecha del río Chili.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA POBLACIÓN

De forma general, la región Arequipa a nivel nacional se encuentra en el quinto grupo de departamentos con incidencia de pobreza que va entre el 9.6 % y el 12 %, junto con Madre de Dios, Moquegua, Provincia Constitucional del Callao, provincia de Lima, región Lima, Tumbes y Ucayali (INEI, 2017). Conocer esta variable socioeconómica es importante, porque a través de esta se puede estimar que se tendrá una mejor capacidad de respuesta ante la ocurrencia de emergencias y desastres originados por peligros geológicos y geohidrológicos, que en regiones consideradas con más altos índices de pobreza.

Los distritos incluidos en el estudio y que forman parte de la ciudad de Arequipa, pertenecen a la provincia de Arequipa. Según cifras oficiales obtenidas por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) para el 2017, su población fue de 1 080 635 habitantes (Censos Nacionales 2017: XII de población y VII de vivienda y III de comunidades indígenas)

(cuadro 2.1). De la población total de la provincia de Arequipa, 995 292 habitantes viven dentro de los límites de la zona de estudio, esto equivale al 92.1% de la población de la provincia; los distritos más poblados son Cerro Colorado, Paucarpata, Cayma, Alto Selva Alegre y J. L. Bustamante y Rivero (figura 2.3 y cuadro 2.1).

Además, se puede observar que la mayor densidad poblacional se encuentra en los distritos de Yanahuara, J. C. Bustamante y Rivero, Arequipa, Paucarpata y Socabaya (cuadro 2.1).

La pirámide de población para los distritos comprendidos dentro de la zona de estudio, según el Censo XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (2017), resalta una estructura demográfica joven, con un mayor peso de la población cuya edad se encuentra por debajo de los 35 años (57.26 % del total de habitantes), la población adulta de más de 35 años equivale al 42.74% y los menores de 15 años son el 22.78 % (figura 2.4).

Cuadro 2.1
Distribución de la población a nivel de distrito de la provincia Arequipa

Provincia	Distrito	Población (censo 2017)	Área (km ²)	Densidad poblacional (hab./km ²)
Arequipa	Arequipa	55 437	12.8	4331.02
	Alto Selva Alegre	85 870	75.05	1144.17
	Cayma	91 935	246.31	373,25
	Cerro Colorado	197 954	174.9	1131.81
	Characato	12 949	86	150.57
	Chiguata	2939	460.81	6.38
	Jacobo Hunter	50 164	20.37	2462.64
	Mariano Melgar	59 918	29.83	2008.65
	Miraflores	60 589	28.68	2112.59
	Mollebaya	4756	26.7	178.13
	Paucarpata	131 346	31.07	4227.42
	Sabandía	4368	36.63	119.25
	Sachaca	24 225	26.63	909.69
	Socabaya	75 351	18.64	4042.44
	Tiabaya	16 191	31.62	512.05
	Uchumayo	14 054	227.14	61.87
	Yanahuara	25 417	2.2	11 553.18
	José Luis Bustamante y Rivero	81 829	10.83	7555.77
	Quequeña (*)	4784	34.93	136.96
	Pocsi	445	172.48	2.58
	Polobaya	837	441.61	1.9
	San Juan de Sigwas	611	93.31	6.55
	San Juan de Tarucani	1377	2264.59	0.61
Santa Isabel de Sigwas	682	187.98	3.63	
Santa Rita de Sigwas	6318	370.16	17.07	
La Joya	32 019	670.22	47.77	
Vitor	3610	1543.5	2.34	
Yarabamba	1314	492.2	2.67	
Yura	33 346	1942	17.17	

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

(*) Solo parte de la población del distrito se encuentra dentro de la zona de estudio.

 Distritos comprendidos dentro de la zona de estudio .

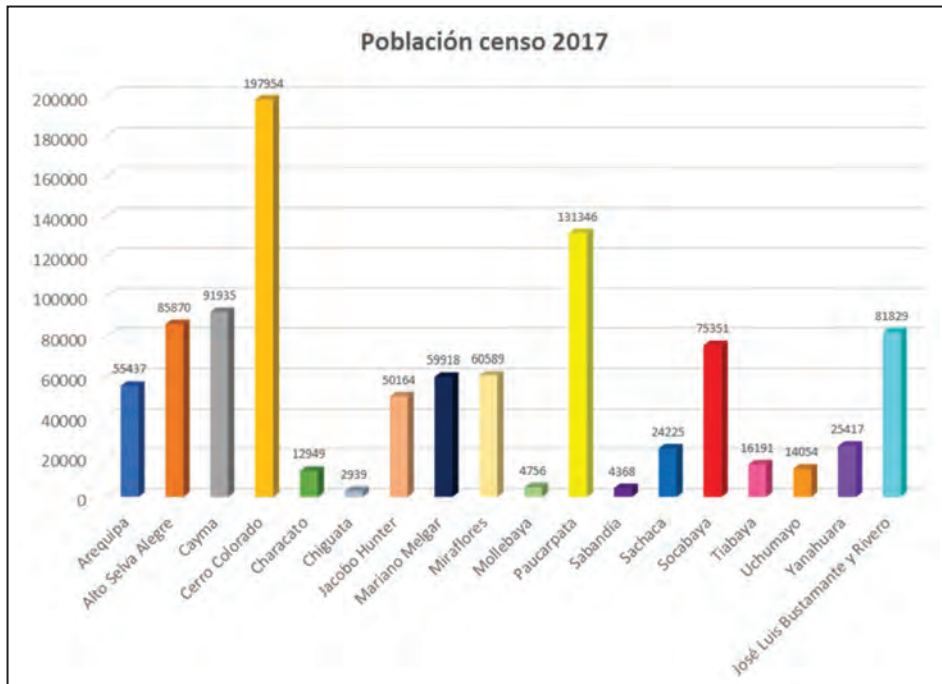


Figura 2.3 Población de los distritos arequipeños comprendidos en la zona de estudio.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas.

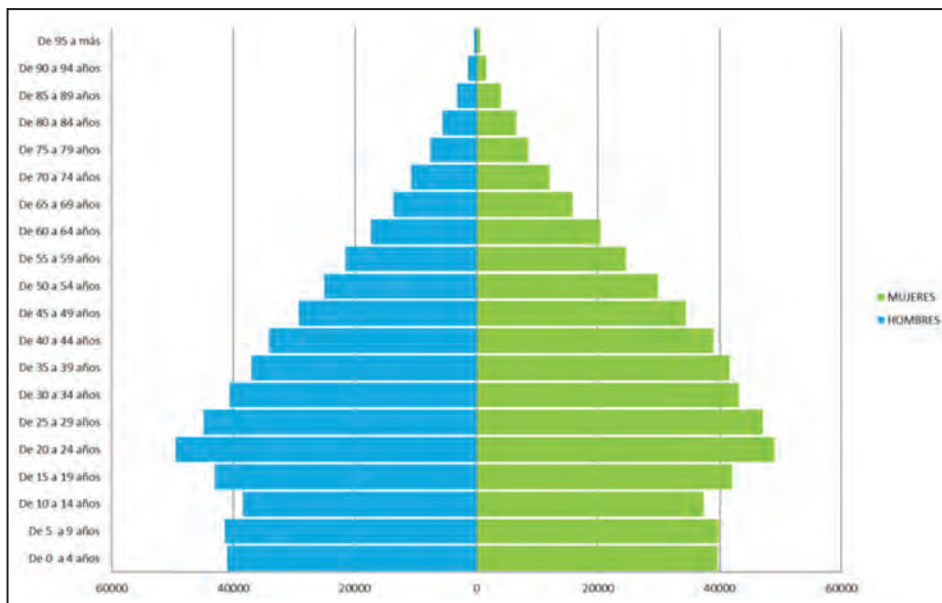


Figura 2.4 Distribución de la población por sexo y edad, distritos comprendidos dentro de la zona de estudio, según el censo 2017.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), (Censo XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (2017).

2.3 FACTORES SOCIOECONÓMICOS

La información obtenida del Censo XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas (2017) muestra que en

cuanto al género, en los distritos que forman parte del estudio, se tiene un mayor porcentaje de población del sexo femenino con el 52 % y de sexo masculino es el 48 % (figura 2.5).



Figura 2.5 Población según sexo de los distritos considerados en el estudio.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), (Censos Nacionales: XI de población y VI de vivienda, 2007).

Haciendo un análisis de la población presente en la zona estudiada, se tiene que según el área de residencia el 99.63 % de habitantes vive en zonas urbanas y tan solo el 0.37 % vive en zonas rurales. Teniendo en cuenta el sexo de la población, se puede observar que en el ámbito urbano se encuentra el mayor

número de población de sexo femenino, así también, en el rural es mayor el número de mujeres; en cuanto a la población de sexo masculino, el mayor número se encuentra habitando en el ámbito urbano (figura 2.6).

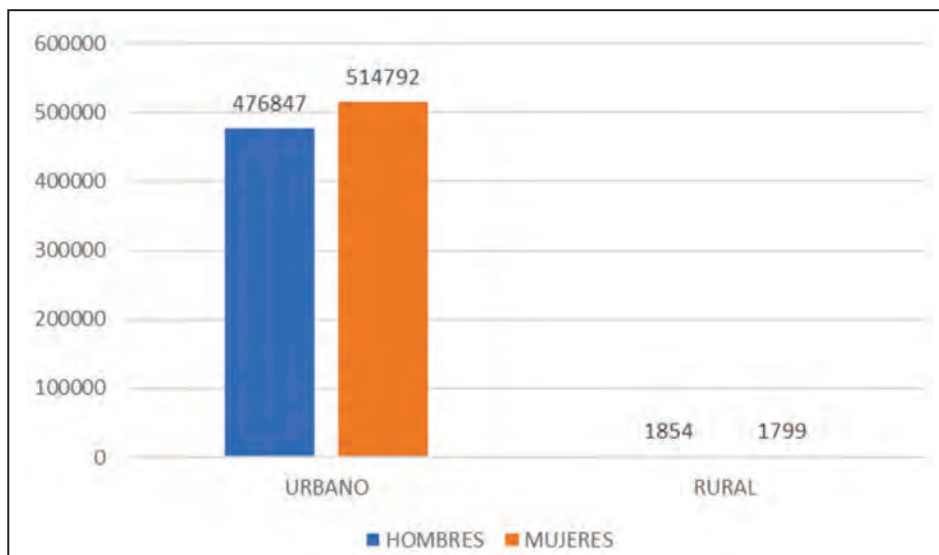


Figura 2.6 Distribución de la población según el sexo por áreas de residencia de la zona de estudio.

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

En cuanto a los niveles de analfabetismo (personas que no saben leer y escribir) presentados por la población circunscrita al área de estudio, se muestra una tasa del 7.5 % en el año 2017 (71 405 hab.); con lo mencionado, si se quiere obtener buenos resultados en trabajos de educación y sensibilización, y en prevención de desastres es necesario seguir trabajando en la reducción de la brecha de acceso a la educación. De la cifra total de analfabetos (71 405 hab.) son hombres el 42.2 % , mientras que las mujeres representan el 57.8 %. Se

puede interpretar que el acceso a la educación es mucho menor para las mujeres.

En cuanto a lo que se refiere al nivel de instrucción que tiene la población, se puede ver en el cuadro 2.2, que el 17.22 % de la población tiene educación primaria completa, el 32.53 % concluyó los estudios secundarios y el 28.61 % de la población cuenta con estudios superiores concluidos (universitaria, no universitaria y maestría/doctorado).

Cuadro 2.2

Nivel de instrucción de la población en la zona de estudio

Categorías	n° casos	%
Total	951 222	100
Sin nivel	33 273	3.5
Educación inicial	47 273	4.97
Primaria	163 836	17.22
Secundaria	309 408	32.53
Básica especial	2225	0.23
Superior no universitaria incompleta	52 589	5.53
Superior no universitaria completa	102 905	10.82
Superior universitaria incompleta	70 495	7.41
Superior universitaria completa	150 602	15.83
Maestría/doctorado	18 616	1.96

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

En lo que se refiere al tipo y número de viviendas construidas dentro de los límites de la zona de estudio se tiene que un total de 87.76 % son viviendas independientes, el 7.84 % corresponde a departamentos en edificio, el 2.23 % son viviendas improvisadas,

el 0.94 % corresponde a viviendas en quinta; finalmente, se puede ver otras categorías de viviendas que no superan el 1 % de total de casos estudiados (cuadro 2.3).

Cuadro 2.3

Tipo de vivienda de la zona de estudio

Categorías	n° casos	%
Casa independiente	296 359	87.76
Departamento en edificio	26 465	7.84
Vivienda en quinta	3179	0.94
Vivienda en casa de vecindad (callejón, solar o corralón)	1986	0.59
Vivienda improvisada	7547	2.23
Local no destinado para habitación humana	1181	0.35
Hotel, hostel, hospedaje, casa pensión	458	0.14
Establecimiento de salud	100	0.03
Centro de atención residencial para adultos mayores	24	0.01

Continuación...

Categorías	n° casos	%
Centro de atención residencial para niñas/os y adolescentes	19	0.01
Conventos, monasterios o similares	32	0.01
Cuartel, campamento, base de FF.AA. o PNP	38	0.01
Otro tipo de vivienda colectiva	44	0.01
En la calle (personas sin vivienda)	27	0.01
Garita, puerto, aeropuerto o similares	84	0.02
Chozo o cabaña	146	0.04
Otro tipo de vivienda particular	1	0
Total	337 690	100

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

Con respecto al tipo de material con que están construidas las paredes de las viviendas, característica que está estrechamente relacionada a la vulnerabilidad de las edificaciones, en cuanto a su capacidad de respuesta o resistencia ante la ocurrencia de un peligro geológico, se tiene que dentro de la zona estudiada

el mayor porcentaje lo ocupan las viviendas construidas con ladrillos o boques de cemento (88.42 %), siguen las construcciones de sillar con amalgama de cal o cemento (5.79 %), de adobe (3.96 %), y de otro tipo de materiales que no son usados con mucha frecuencia (cuadro 2.4).

Cuadro 2.4

Material de construcción usado en las paredes de las viviendas de la zona estudiada

Categorías	n° casos	%
Ladrillo o bloque de cemento	228 212	88.42
Piedra o sillar con cal o cemento	14 953	5.79
Adobe	10 213	3.96
Tapial	28	0.01
Quincha (caña con barro)	66	0.03
Piedra con barro	622	0.24
Madera (pona, tornillo etc.)	2499	0.97
Triplay / calamina / estera	1516	0.59
Otro material	2	0

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

Otro aspecto importante relacionado también con la vulnerabilidad de las edificaciones y su resistencia a fenómenos naturales, como pueden ser las precipitaciones pluviales extraordinarias que pueden generar inundaciones, es el material con el que están contruidos los techos. Así se tiene que el mayor

porcentaje de viviendas tiene techos de concreto armado (75.24 %), en segundo lugar se tiene los techos de calaminas y fibra de cemento (23.25 %), y de otros materiales que son usados en proporción reducida (cuadro 2.5).

Cuadro 2.5

Material de construcción usado en los techos de las viviendas de la zona estudiada

Categorías	n° casos	%
Concreto armado	194 208	75.24
Madera	1313	0.51
Tejas	860	0.33
Planchas de calamina, fibra de cemento o similares	60 011	23.25
Caña o estera con torta de barro o cemento	1052	0.41
Triplay / estera / carrizo	576	0.22
Paja, hoja de palmera y similares	89	0.03
Otro material	2	0

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

2.4 INFRAESTRUCTURA

2.4.1 Servicios básicos

La información sobre los servicios básicos con los que cuenta la ciudad de Arequipa (circunscrito solo a distritos considerados en el estudio) se ha resumido en los cuadros 2.6, 2.7 y 2.8. En cuanto a lo que refiere a la cobertura de alumbrado eléctrico de las viviendas por red pública, se tiene un número de 238 391 viviendas con acceso a este servicio, lo que equivale al 94 % del total de viviendas (cuadro 2.6).

En cuanto al acceso al agua potable o el servicio de agua con que cuentan las viviendas, se tiene que el 78.93 % de las

viviendas de la ciudad de Arequipa tienen conexión interna con la red de agua potable; el 11.76 % obtiene el agua del pilón de uso público; el 5.19 % tiene conexión a la red pública fuera de la vivienda, pero dentro de la edificación; y el 2.04 % usa agua de camión cisterna (cuadro 2.7).

Con respecto a la conexión del desagüe de las viviendas a la red pública de alcantarillado en la ciudad de Arequipa (cuadro 2.8), el 80.96 % de viviendas tiene conexión interna o externa a la red pública del alcantarillado, lo que significa que el restante 19.04 % debía cubrir esa necesidad por otros medios menos salubres, como son pozos ciegos o negros (10.42 %), letrinas (4.9 %), pozos sépticos (2.56 %), río (0.08 %), campo abierto (0.76 %) y otros (0.32 %).

Cuadro 2.6

Alumbrado eléctrico por tipo de vivienda por red pública de la ciudad de Arequipa

Tipo de vivienda	Sí tiene alumbrado eléctrico	No tiene alumbrado eléctrico
Casa independiente	213 508	14 787
Departamento en edificio	19 934	0
Vivienda en quinta	2689	1
Vivienda en casa de vecindad (callejón, solar o corralón)	1683	31
Choza o cabaña	23	19
Vivienda improvisada	254	207
Local no destinado para habitación humana	300	36
Otro tipo de vivienda particular	0	2
Total	238 391	15 083

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

Cuadro 2.7

Tipo de abastecimiento de agua en las viviendas de la ciudad de Arequipa

Abastecimiento de agua en la vivienda	Casos	%
Red pública dentro de la vivienda	203 727	78.93
Red pública fuera de la vivienda, pero dentro de la edificación	13 390	5.19
Pilón o pileta de uso público	30 359	11.76
Camión - cisterna u otro similar	5261	2.04
Pozo (agua subterránea)	4229	1.64
Manantial o puquio	94	0.04
Río, acequia, lago, laguna	338	0.13
Otro	200	0.08
Vecino	513	0.2

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

Cuadro 2.8

Tipo de servicio higiénico en las viviendas de la ciudad Arequipa

Servicio higiénico que tiene la vivienda	Casos	%
Red pública de desagüe dentro de la vivienda	194 906	75.51
Red pública de desagüe fuera de la vivienda, pero dentro de la edificación	14 067	5.45
Pozo séptico, tanque séptico o biodigestor	6615	2.56
Letrina (con tratamiento)	12 644	4.9
Pozo ciego o negro	26 895	10.42
Río, acequia, canal o similar	196	0.08
Campo abierto o al aire libre	1966	0.76
Otro	822	0.32

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas).

2.4.2 Vial terrestre

Las características del medio físico y el relieve influyen en el desarrollo e interconexión vial de la zona de estudio; estas vías atraviesan zonas de colinas, planicies y piedemontes lo que facilita su construcción, mientras que los tramos que atraviesan vertientes fuertemente inclinadas, piedemontes disectados, zonas encañonadas, valles y quebradas hacen más difícil su construcción y mantenimiento, siendo necesario la colocación de puentes que atraviesen estos valles y quebradas. Por la zona de estudio atraviesa una red vial medianamente desarrollada.

En la red vial nacional se tiene:

- **Ruta PE-34C:** Desvío Chiguata-Miguel Forga-Andrés Avelino Cáceres-Paseo de la Cultura-Guardia Civil-John F. Kennedy-Colonial-Jesús-Puente Chiguata I-Chiguata.

- **Ruta PE-34A:** Empalme PE-1S (La Repartición)-Uchumayo-Desvío Chiguata-Yura.

Entre la vial departamental se tiene:

- **Ruta AR-114:** Desvío Arequipa-Arequipa, con una longitud total de 43 km y de superficie de rodadura sin afirmar. Parte de esta vía se encuentra dentro de la zona de estudio.
- **Ruta AR-115:** Desvío Tiabaya-Tiabaya-Sachaca, de aproximadamente 9 km de longitud, superficie de rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-116:** Desvío Cayma-Cabrería-Pampa Cañaguas, con una longitud de 20 km y superficie de rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-117:** Desvío Socabaya-San Antonio-Siete Toldos- L. D. Moquegua (a minas de cobre de Chapi); tiene una longitud total de 51.5 km y una superficie de rodadura de asfaltada.

- **Ruta AR-118:** Desvío Pocsi-Sabandría-Characato-desvío Mollebaya-Pocsi, con una longitud de 9.6 km y de superficie de rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-123:** Desvío repartición-desvío Variante Uchumayo-Zamacola, con una longitud total de 13.73 km y una superficie de rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-751:** Alto Selva Alegre- San Lázaro-Balcones de Chilina-Villa Ecológica-Punta de carretera, de superficie de rodadura afirmada.
- **Ruta AR-795:** Buena Vista-Santa María-Las Peñas-Pasto-Lara, de superficie rodadura asfaltada.

Entre la red vecinal se tiene:

- **Ruta AR-746:** Huayco-Congata-Cerro Verde, en condición de trocha carrozable.
- **Ruta AR-749:** Desvío Selva Alegre-Punta de Carretera, en condición de trocha carrozable.
- **Ruta AR-750:** Selva Alegre-Mirador Chilina-Punta de carretera, de superficie de rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-796:** Jacobo Hunter-Pampa del Cusco-Arancota-Tingo Grande-Quebrada Huayrondo, de superficie rodadura asfaltada.
- **Ruta AR-797:** Pasaje Micaela Bastidas-San José, con tramos asfaltados y otros en condición de trocha carrozable.

2.4.3 Vía aérea

En la ciudad de Arequipa se encuentra el Aeropuerto Alfredo Rodríguez Ballón, la principal vía aérea que accede a Arequipa; en el cuadro 2.9 se presentan algunas características de este aeropuerto.

Cuadro 2.9

Característica de la pista de aterrizaje ubicada dentro de la zona de estudio

Nombre	Ubicación	Dimensión de la pista (m)	Tipo de superficie	Resistencia	Propietario
A. Rodríguez Ballón	Arequipa	2 980 x 45	Asfalto	¹ PCN 39/F/ BX/T	P/E: CORPAC

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (www.mtc.gob.pe).

2.4.4 Vía férrea

En Arequipa, la red férrea es conocida con el nombre de Ferrocarril del Sur y Sur-Oriente, se encuentra concesionado desde el 19 de julio de 1999 al Consorcio Ferrocarril Transandino S. A., conformado por Containers y Peruval, que se encarga de

administrar la infraestructura ferroviaria; la empresa PerúRail, de capitales peruano-británicos, parte del Grupo Belmont, se encarga de la operación y utiliza la línea férrea pagando por el servicio. Este operador ferroviario ofrece servicios turísticos y transporta mercadería y minerales que tienen como punto de salida el puerto de Matarani (cuadro 2.10).

Cuadro 2.10

Ruta cubierta por el Ferrocarril del Sur y Sur-Oriente

Tramo	Ruta	Características
Sur	-Arequipa-Juliacá, Puno-Cusco, transporte de pasajeros. Mollendo. - Matarani-Arequipa, transporte de mercancías y minerales	Longitud total 800 km, ancho de vía de 1438 mm (trocha estándar)
Sur- Oriente	- Cusco-Machupicchu-Hidroeléctrica	Longitud total de 124 km, ancho de vía 914 mm (trocha angosta)

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2019.

¹ Número de Clasificación de Pavimento.

2.4.5 Energía

La obtención y abastecimiento de energía eléctrica de la ciudad de Arequipa se basa principalmente en el uso de combustibles y de recursos renovables no convencionales (energía hidráulica, solar y eólica), que es usada en las diferentes actividades que allí se desarrollan; así se tiene:

Energía hidráulica

La fuerza hidráulica del agua es considerada la fuente básica de generación de energía eléctrica. La energía potencial

acumulada en los saltos de agua puede ser transformada en energía eléctrica. Estas caídas son aprovechadas en las centrales hidroeléctricas para poner en funcionamiento las turbinas que mueven los generadores eléctricos. Dentro de la zona de estudio, la energía hidráulica ha sido aprovechada para la generación de electricidad por medio de la instalación de tres centrales hidroeléctricas localizadas a lo largo del valle encañonado del río Chili (Charcani II, III y IV); estas centrales forman parte de un total de seis plantas localizadas en este valle (cuadro 2.11).

Cuadro 2.11

Centrales hidroeléctricas en la zona de estudio

Empresa	Origen	Central	Distrito	Potencia Instalada (MW)	Potencia efectiva (MW)	Producción (MW.h)
Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A.	Hidráulico	C.H. Charcani I	Cayma	1.76	1.73	13 230 355
	Hidráulico	C.H. Charcani II	Cayma	0.78	0.6	4 804 044
	Hidráulico	C.H. Charcani III	Cayma	4.64	4.57	37 832 437
	Hidráulico	C.H. Charcani IV	Cayma	15.6	15.3	10 129 407
	Hidráulico	C.H. Charcani V	Cayma	145.35	144.62	627 012 555
	Hidráulico	C.H. Charcani VI	Cayma	8.96	8.95	58 385 999

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2018.

Centrales térmicas

La generación y abastecimiento eléctrico de la ciudad de Arequipa y localidades circundantes se da a través de tres centrales térmicas que usan diésel en el proceso de generación

eléctrica (C.T. Cerro Verde, C.T. Arequipa y C.T. Arequipa) y la C.T. Chilina de ciclo combinado (cuadro 2.12). La primera de estas abastece la compañía minera Cerro Verde, las localidades de Yarabamba y Socabaya; las otras dos abastecen la ciudad de Arequipa y la minera Cerro Verde.

Cuadro 2.12

Centrales hidroeléctricas en la zona de estudio

Empresa	Origen	Central	Distrito	Potencia Instalada (MW)	Potencia efectiva (MW)	Producción (MW.h)
Empresa de Generación Eléctrica de Arequipa S.A.	Térmico (diesel 2)	C. T. Chilina	Arequipa	30.81	27.06	33 011 909
Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.	Térmico (diesel 2)	C.T. Cerro Verde	Uchumayo	20.2	14.82	0
Unión de Cervecerías Peruanas Backus y Johnston S.A.A.	Térmico (diesel 2)	C.T. Arequipa Dorada	Sachaca	2.04	1.5	74 045
Alicorp S.A.	Térmico (diesel 2)	C.T. Arequipa		1.06	0.77	0

Fuente: Ministerio de Energía y Minas, 2018.

Energía solar

En general, la región Arequipa es una de las zonas del país con mayor irradiación solar, lo que hace que se pueda aprovechar para aplicaciones de energía solar térmica y fotovoltaica. Actualmente, se tienen instaladas solamente en la ciudad de Arequipa más de 38000 termas solares para uso doméstico (viviendas, hoteles, restaurantes), que anualmente representan 61 174 Mwh de energía eléctrica no generada, y un ahorro aproximado de 20 millones de soles para los usuarios. Así, también, la energía fotovoltaica tiene gran potencial, pudiendo utilizarse en aplicaciones de variada potencia, desde pequeños hasta grandes usuarios industriales.

La ciudad de Arequipa está localizada a 2363 m s. n. m., con un clima seco y con escasa nubosidad; presenta aproximadamente 300 días de cielo claro al año y 11 horas de irradiación. La irradiación global promedio diario anual en plano horizontal es de 6.27 kWh/m² (Flores, 2001). La temperatura promedio es de 21 °C. Durante el día, el aire es seco y caliente; en las noches, principalmente en los meses de mayo a julio, la temperatura desciende a 8 °C.

Se distinguen dos componentes en la radiación solar: la radiación directa y la radiación difusa. La directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes, y el resto de los elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas direcciones; sin embargo, ambas son aprovechables.

En Perú, a nivel anual, la zona de mayor potencial de energía solar se encuentra en la costa sur (16° a 18°), donde se dispone de 6 a 6.5 kWh/m² (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2003). Para la región Arequipa, se tienen promedios anuales de irradiación solar diaria medidos en tres estaciones. En la estación Pampa de Majes 5.61 kWh/m², en Arequipa 5.31 kWh/m² y en Characato de 5.61 kWh/m² (Ministerio de Energía y Minas, 2001).

La energía solar térmica tiene el 27 % de participación en el consumo de energía útil del sector residencial. Por su parte, el sector comercial y de servicios en Arequipa representa el 2.75 del consumo de energía útil, que equivale a 174 TJ; entre las actividades más importantes están los hospitales, colegios, restaurantes, hoteles y empresas comerciales, siendo el 43.4 % la participación de la energía solar (Tinajeros & Morante, 2011).

Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión con velocidades proporcionales (gradiente de presión).

En general, para la región Arequipa, se tiene un valor de velocidad media del viento a 10 m de altura es de 3 m/s, que significa un potencial eólico aprovechable de 1020 MW (Ministerio de Energía y Minas, 2016). Los usos dados a la energía eólica son menos difundidos, principalmente en el empleo de molinos de viento para bombeo de agua, irrigación, molienda de granos, aerogeneradores pequeños para cargar baterías e iluminación. En Arequipa, en las márgenes del río Chili, los molinos de viento permiten irrigar más de 450 hectáreas de cultivos.

2.5 CLIMA E HIDROLOGÍA

En la ciudad de Arequipa, el clima es predominantemente seco en invierno, otoño y primavera; es también semiárido a causa de la precipitación efectiva y templada por la acción térmica. En las zonas bajas (Arequipa) se tienen de 9 a 11 horas de sol promedio en el día; en contraste, en zonas por encima de los 4000 m s. n. m. se tienen 7 horas de sol promedio y en la zona intermedia se supera las 8 horas de sol diaria (Jiménez *et al.*, 2010).

En la zona urbana de Arequipa, las temperaturas normalmente no sobrepasan los 25 °C y muy rara vez bajan a los 10° (Watherbase, 2011). En invierno (junio y julio), es más frío y la temperatura desciende en promedio hasta los 10 °C. En las zonas altas, por encima de los 3500 m s. n. m., el promedio de temperatura es mucho menor. La estación meteorológica de AUTODEMA, situada en la represa de Aguada Blanca, a 3670 m s. n. m. cerca al volcán Misti, registró en 2010 una temperatura mínima de -17.4 °C en el mes de julio, y una temperatura máxima de 18.2 °C en el mes de octubre (Autoridad Autónoma de Majes, 2010).

La precipitación pluvial promedio que se produce en la ciudad de Arequipa, entre los meses de enero y marzo, alcanza un máximo valor de en 40.64 mm (febrero) (cuadro 2.13). Según Jiménez *et al.* (2010), en la estación de CORPAC, situada a 2525 m s. n. m., la precipitación es de 80 a 120 mm/año. En las zonas altas, por encima de los 3500 m s. n. m. cerca al volcán Misti, las precipitaciones se presentan entre los meses de noviembre y marzo, con una mayor incidencia entre enero y marzo. Además,

por encima de 3741 m s. n. m., la precipitación es de 250 mm/año, registrada cerca de la represa Pampa de Arrieros; y por

encima de 4524 m s. n. m., esta es de 719 mm/año, registrada cerca de la represa El Pañe.

Cuadro 2.13

Parámetros climáticos promedio de la ciudad de Arequipa

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Temperatura diaria máxima (°C)	21	20	21	21	21	21	21	21	22	22	21	21
Temperatura diaria mínima (°C)	10	10	10	9	8	9	7	7	8	8	8	9
Precipitación total (mm)	27.94	40.64	17.78	17.78	0	0	0	0	0	0	0	7.62

Fuente: Weatherbase, 2011.

La humedad relativa hasta 1000 m s. n. m. es del 60 % en promedio; entre 1000 y 2000 m s. n. m., la humedad relativa promedio está entre el 20 % y el 30 %, y conforme aumenta la altitud también se incrementa hasta llegar al 40 % (Jiménez *et al.*, 2010).

Los vientos en Arequipa están influenciados por un sistema de vientos locales y por el paso de sistemas frontales de baja presión atmosférica. Están condicionados por la configuración topográfica que rodea la depresión en la cual se halla la ciudad. La ocurrencia de vientos se presenta principalmente en horas de la noche y primeras horas del día. En el día, la velocidad del viento fluctúa entre 1.5 m/s y 2.5 m/s (cuadro 2.14; Weatherbase, 2011).

En cuanto a la evaporación, en las zonas intermedias (representadas por la estación La Pampilla), la evaporación anual alcanza 1825 mm, con una mínima media diaria de 3.1 mm en febrero y una máxima media diaria de 6.2 mm en julio; el patrón de variación es más acentuado respecto de las zonas de menor altitud. No obstante que la estación relativamente cercana a La Pampilla y ligeramente ubicada a mayor altitud (estación Characato) muestra mediciones significativamente mayores a toda el área en estudio, 3066 mm anuales.

2.6 COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELOS

Considerando la necesidad de contar con la información referente a la susceptibilidad de un área determinada a la ocurrencia de movimiento en masa en función del factor cobertura vegetal presente en la zona evaluada, se preparó el mapa de distribución de la cobertura vegetal para la ciudad de Arequipa y alrededores, el cual tuvo como base el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú (Perú. Ministerio del Ambiente, 2015), donde se diferenciaron cinco zonas según el tipo de cobertura dominante que se fundamenta en las características de densidad o ausencia de vegetación.

La zona de estudio comprende una extensión total de 559 km², donde las condiciones climáticas que se presentan y la topografía han dado lugar a una vegetación variada, siendo que la cobertura vegetal que cubre mayor extensión pertenece al tipo matorral arbustivo (46.2 %), luego siguen zonas ocupadas con agricultura costera y andina (26.09 %), las zonas de desierto costero (15.3 %), zonas pobladas (12.4 %) y una pequeña área de pajonal altoandino (0.01 %) (figura 2.7).

Se presenta a continuación una breve descripción de los tipos de cobertura vegetal natural y antrópica que se encuentran dentro de la zona de estudio:

2.6.1 Matorrales de zonas áridas a zonas húmedas

Se localizan en la zona occidental andina y los valles interandinos, desde los 1000 hasta los 3800 m s. n. m., límite de los herbazales altoandinos del sur y centro del país.

De acuerdo con el Diagrama Bioclimático del Mapa Ecológico del Perú (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, 1976), estas zonas contemplan valores de evapotranspiración potencial entre el 1.0 % y el 32.0 %, precipitaciones pluviales anuales hasta de 1000 mm y temperaturas medias anuales mayores a 6 °C. El amplio gradiente térmico existente a través de los diversos pisos altitudinales define varios tipos de cobertura arbustiva. En este punto, se observa un carácter caducifolio en las porciones inferiores y se torna de carácter perennifolio en las porciones superiores. Dentro de este subgrupo se diferenció el siguiente tipo de cobertura vegetal:

Matorral arbustivo (Ma): Se localiza entre los 1500 y 3800 m s. n. m., en el centro y sur del Perú, hasta el límite de los pajonales naturales. Representa el 46.2 % de la superficie total del área evaluada.

La cobertura está conformada por comunidades arbustivas distribuidas en diferentes niveles altitudinales; en el nivel inferior por debajo de los 2500 m s. n. m., y las condiciones áridas y semiáridas propician el desarrollo de asociaciones arbustivas que pierden totalmente su follaje durante el periodo seco del año, mezcladas con suculentas y herbáceas de vida efímera. Entre las especies más comunes se tiene al huanarpo, mito, maguey, etc.; entre las cactáceas se tiene al candelabro y gigantón.

En el nivel medio en la zona sur, comprendida entre los 3000 y 3800 m s. n. m., se tienen asociaciones arbustivas de carácter caducifolio y perennifolio. Entre las especies más frecuentes están la chamana, lloque, chinchilcuma, yauli, maguey azul, huaranhuay, marco, retama, etc. Entre las cactáceas, aparecen la anjokishka y San Pedro. También, se tienen algunas especies arbóreas de porte bajo y dispersas como el faique, molle y tara.

En el nivel superior, comprendido entre los 3600 y 3800 m s. n. m., en la zona sur del Perú, se presentan mejores condiciones de humedad y menores valores de temperatura. Esto propicia el desarrollo de una mayor diversidad arbustiva, por ejemplo, el chocho, tayanco, tola, manzanita, mutuy, entre otras.

Este tipo de cobertura constituye un recurso importante para la población rural, tanto como provisión de leña y para el uso como plantas medicinales.

2.6.2 Herbazales de zonas húmedas a zonas pluviales

Localizados en las porciones superiores de la Cordillera de los Andes, por encima de los bosques amazónicos y los matorrales andinos, por encima de los 3800 - 4000 m s. n. m. en el centro y sur del Perú, extiende sus límites hasta las áreas periglaciares y glaciares.

De acuerdo con el Diagrama Bioclimático del Mapa Ecológico del Perú (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, 1976), en esta zona se tienen valores de evapotranspiración potencial entre el 1.0 % y el 0.06 %, precipitaciones pluviales anuales mayores desde 62.5 mm y hasta 4000 mm, y temperaturas medias anuales entre 6 y 1.5 °C. Esto propicia el dominio de comunidades de hierbas con inclusión de ciertos arbustos de hojas duras. El relieve del terreno es muy variado, desde altiplanicies hasta cerros con pendiente muy empinada. Se ha diferenciado el siguiente tipo de cobertura vegetal:

Pajonal altoandino (Pj): Se encuentra conformado por herbazales que se desarrollan sobre terrenos que van desde casi planos a ondulados en altiplanicies, en las depresiones y en el fondo de valles glaciares, hasta empinados o escarpados en

las laderas montañosas y cumbres altoandinas. Esta cobertura representa una reducida exposición en la zona evaluada con tan solo el 0.01 % de la superficie total en evaluación.

El pajonal está conformado por asociaciones de hierbas con dos estratos bien definidos en su perfil vertical. El estrato dominante está conformado por matas de gramíneas de hasta un metro de alto, cuyas hojas son de consistencia rígida, enrollada y punzante, tipo paja. Aquellas toman el nombre colectivo de *ichu* y se encuentran distribuidas bajo un patrón regular de distribución espacial, con grados de cobertura que varían entre 30 y el 70 %. El estrato inferior, conocido como vegetación de piso, está conformado por hierbas que crecen pegadas al suelo, con alturas de hasta 10 cm y que constituyen la verdadera fuente forrajera. Los géneros más abundantes son las festuca, *stipa* y *calamagrostis*.

El pajonal representa una fuente de forraje importante para la actividad ganadera (camélidos sudamericanos y ovinos); sin embargo, muchas áreas se encuentran en proceso de degradación debido al sobrepastoreo y la quema periódica. Asimismo, la ampliación de la frontera agrícola está restando áreas de pastizales.

2.6.3 Coberturas antrópicas

Agricultura costera y andina (Agri): Son áreas donde se realiza actividad agropecuaria, actualmente activa y en descanso. Se ubica en todos los valles que atraviesan la Cordillera de los Andes, en fondos y laderas de valles interandinos hasta el límite del pajonal altoandino. En la zona de estudio, ocupa una superficie de 146.06 km², que representa el 26.09 % de la superficie total evaluada.

Comprende los cultivos de bajo riego y en secano, tanto anuales como permanentes. Asimismo, se incluye aquí la vegetación natural ribereña que se extiende como una angosta e interrumpida franja a lo largo de los cauces de los ríos y quebradas.

Zonas pobladas / Ciudad (Ciu): También denominada zona urbana; es la porción de territorio donde están incluidos todos los distritos que conforman la ciudad de Arequipa. Estas áreas se desarrollan en la actualidad sin control urbano. Incluye zonas de expansión urbana que aún no están construidas, potencialmente urbanizables y que hoy son campos que deberían incorporarse a la ciudad sobre la base de un plan previamente elaborado que establezca las pautas para su desarrollo urbano y prevea la forma en que se brindarían los servicios necesarios para crear nuevas urbanizaciones habitables. Las zonas urbanas representan el 12.4 % del área total que comprende la zona de estudio.

2.6.4 Otras áreas

Desierto costero (D): Se localiza en el extremo suroeste de la zona de estudio y ocupa un área de 85.66 km² (15.30 %) de la superficie total; se extiende desde la planicie costera, hasta las primeras estribaciones del flanco oeste de la Cordillera Occidental. La vegetación existente aparece de manera esporádica y en baja densidad.

El clima en esta zona se caracteriza por ser árido y cálido en verano (diciembre-marzo) con neblinas en el invierno (mayo-

setiembre) que provienen del mar, las cuales se disipan al chocar con las primeras elevaciones del contrafuerte occidental, aproximadamente entre los 700 y 1000 m s. n. m., lo que da origen a la vegetación de lomas. Al margen de las lomas, es común observar en los años con fuertes neblinas la presencia de un diminuto y efímero tapiz herbáceo de unos pocos centímetros de altura, que crece sobre la superficie de grandes planicies localizadas en la costa (zonas que carecen de cultivos o campos sin labrar).

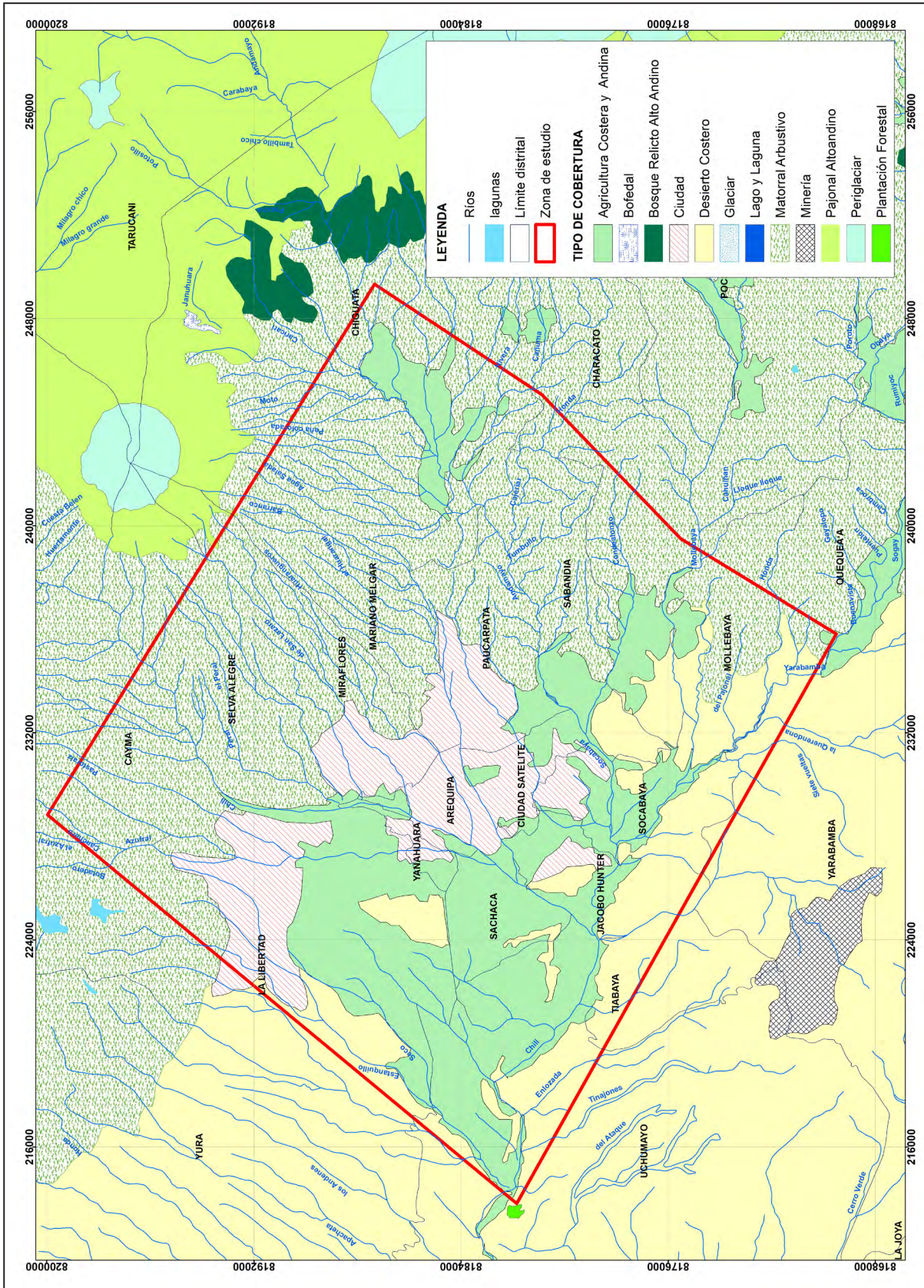


Figura 2.7 Mapa de cobertura vegetal de la ciudad de Arequipa y alrededores.

CAPÍTULO III

CONTEXTO LITOLÓGICO-ESTRUCTURAL

3.1 GENERALIDADES

El área de estudio corresponde a la ciudad de Arequipa y sus alrededores, donde afloran rocas con edades del Precambriano hasta el reciente (Mariño *et al.*, 2016). El substrato del área de estudios está conformado por rocas metamórficas (Proterozoico) y rocas intrusivas del Cretáceo Superior y Paleógeno (Batolito de la Costa), ignimbritas y flujos de lava del Neógeno (volcánicos Chila y Grupo Barroso) y depósitos de avalancha de escombros del Pleistoceno (volcán Pichu Pichu) (Mariño *et al.*, 2016). Se tienen lavas andesíticas del Pleistoceno-Holoceno en las laderas del volcán Misti y depósitos volcánicos que corresponden a flujos y caídas piroclásticas, que a veces están intercalados con los depósitos aluviales y también con lahares (figuras 3.1 y 3.2).

Los depósitos cuaternarios que se encuentran en los alrededores de la ciudad de Arequipa corresponden a materiales no consolidados, que conforman abanicos proluvio-aluviales acumulados por antiguos flujos de lodo y detritos en un contexto de clima semi-árido, que es interrumpido por episodios de lluvias extremas que favorecen la ocurrencia de los flujos.

Las unidades geológicas que afloran en la ciudad de Arequipa y sus alrededores han sido la base para elaborar el mapa de unidades litológicas; considerada como una variable importante del medio físico que se debe usar en todo estudio de peligros geológicos. La elaboración de esta cartografía es compleja y

está condicionada por las asociaciones de diferentes tipos de rocas agrupadas en formaciones geológicas (litoestratigráficas), principalmente en sus características de competencia geomecánica (discontinuidades) y resistencia (erosión y meteorización). En el análisis de la litología, se evalúan los tipos dominantes de rocas, composición mineral y textura, estructuras geológicas presentes (discontinuidades), intensidad y grado de alteración. Los suelos y/o detritos se agrupan de acuerdo con su génesis y se describe principalmente su granulometría, espesor, grado de compactación (suelos granulares) y consistencia (suelos cohesivos).

Los mapas litológicos muestran la distribución de rocas en el territorio e indican la clase a la que pertenecen estas rocas dentro de una clasificación petrológica. Por un lado, su utilidad, desde el punto de vista económico, se pone de manifiesto a través del concepto de recurso natural, como constituyente primario que interviene en el desarrollo de obras y actividades humanas, como soporte de estas o como materia prima. Por otro lado, su investigación y conocimiento son necesarios para cualquier estudio que aborde problemas medioambientales y de ordenamiento del territorio; esto se debe a que existe una estrecha relación entre los distintos aspectos del medio geológico, tales como la geomorfología, hidrología, edafología y riesgos geodinámicos (deslizamientos, erosión e inundaciones), entre otros.

ERA		PERIODO	EPOCA	EDIFICIO		GRUPO		UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	OTROS DEPÓSITOS	
CENOZOICO	NEÓGENO	PLEISTOCENO	VOLCÁN MISTI	ESTRATOCENO	MISTI 4	4-1	CC-m3	Depósito de caída piroclástica de ceniza oscura del siglo XV	FL	Depósitos fluviales
							LH-m	Depósitos de lahar históricos del volcán Misti	AL	Depósitos aluviales
							DH-m	Domo histórico siglo XV	LH-ch	Lahares holocénicos e históricos del volcán Chachani
							LEV-m	Depósitos de lahar, epiclásticos y volcanoclasticos del volcán Misti, emplazados en el Holoceno	Col	Depósitos coluviales
							FPPL-m	Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza cubierto por lahar (2 ka)	FG-pi	Depósito fuvioglaciares del volcán Pichupichu
							CR-m2'	Secuencia de caídas piroclásticas holocénicas		
							CCC-m	Cono de ceniza de la cumbre formado en los últimos 11 Ka		
							FPP-m5	Depósito de flujo piroclástico de pómez y cenizas (13,6 a 11,3 Ka), cubierto por caídas piroclásticas recientes (14 a 11 Ka)	Qpl-Cu	Arenas y conglomerados
							CP-m1	Secuencia de caídas piroclásticas de 32 a 2 Ka		
							FPB-m	Secuencia de flujo piroclástico de bloques y cenizas y escoria y cenizas de hace 13,6 a 11,3 Ka	FPB-ch	Flujo piroclásticos de bloques y cenizas del volcán Chachani
CENOZOICO	NEÓGENO	PLEISTOCENO	VOLCÁN MISTI	ESTRATOCENO	MISTI 3	3-4	FPB-cp	Secuencia de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, cubiertos por caídas piroclásticas (33 a 2 Ka)		
							FPB-m4	Depósito de flujo piroclástico de pómez y cenizas color salmón		
							FPB-m3	Depósito de flujo piroclástico de pómez y cenizas rico en líticos de hace 33,8 Ka		
							FPB-m2	Secuencia de flujos piroclásticos de pómez y cenizas, escorias y cenizas		
							FPB-m1	Depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza de hace 40,2 Ka		
							LM-m	Depósito de flujo de bloques con escaza ceniza (colapso de domo?) 70-50 Ka		
							FL-m6	Domos y flujo de lava en bloques de hace 50 - 14 Ka		
							FL-m5	Depósito de flujo de lava de hace 112 Ka	FL-ch2	Flujo de lava de volcán Chachani de 0,05 a 0,01 Ma
							DA-m	Depósito de avalancha de escombros del volcán Misti		
							CENOZOICO	NEÓGENO	PLEISTOCENO	VOLCÁN MISTI
FL-m3	Flujo de lavas en bloques									
FL-m2	Flujo de Lava andesítica	FL-ch1	Flujo de lava del volcán Chachani de 0,7 a 0,5 Ma							
FL-m1	Flujo de lava del volcán Chachani de hace 833 Ka									
PR	Protrusión riolítica	DL-pi	Depósito lacustrino							
SV-ch	Sedimentos volcanoclasticos del volcán Chachani	Da-pi	Depósito de avalancha de escombros del volcán Pichupichu							
IG-a	Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa de 2,42 a 1,64 Ma	FPB-pi	Flujos piroclásticos de bloques y cenizas del volcán Pichupichu							
IG-b	Ignimbrita La Joya de hace 4,88 Ma	FL-pi	Flujos de lava del volcán Pichupichu							
IG-c	Secuencia de flujos de lava y piroclastos del plioceno	IG	Ignimbrita soldada							
IG-ch	Ignimbrita Rio Chili de hace 13,19 Ma									
CENOZOICO	PALEÓGENO	MIOCENO	FORMACIONES DEL SUBSTRATO				NP-gn	Gneis Characani	l-gd	Intrusivo gabrodiorítico, 77-59 Ma

Figura 3.1 Leyenda del mapa geológico de la zona de estudio. (Mariño *et al.*, 2016)

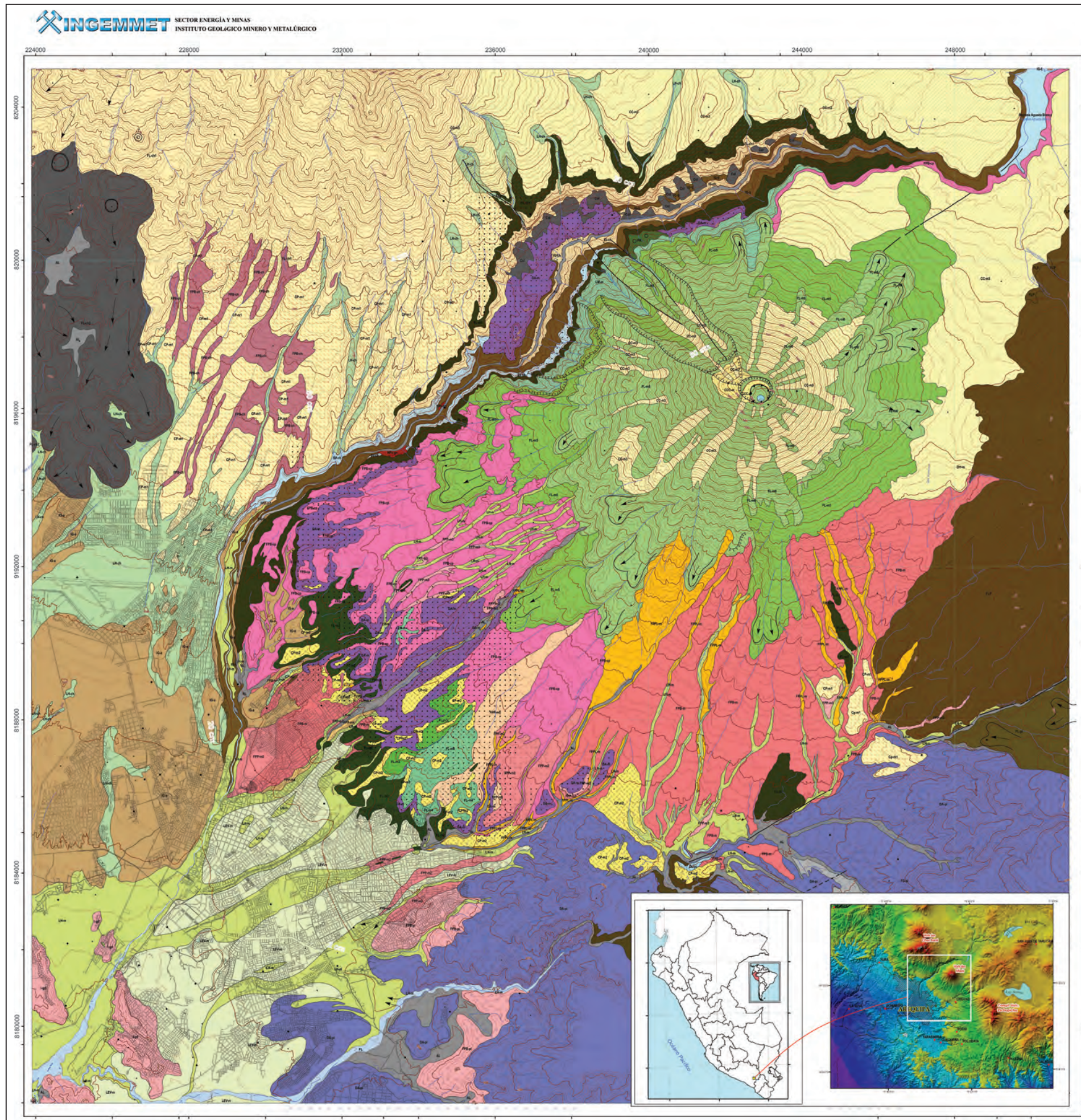


Figura 3.2 Mapa geológico de la zona de estudio. (Mariño *et al.*, 2016)

3.2 UNIDADES LITOLÓGICAS

El mapa litológico fue elaborado sobre la base de los estudios de la Carta Geológica Nacional a escala 1:100 000, realizados por la Dirección de Geología Regional del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico en el cuadrángulo de Arequipa (Vargas L. 1970), el cuadrángulo de La Joya (García, W. 1968), cuadrángulo de Puquina (García, W. 1978), y del Boletín n° 60 de la serie C, cuadrángulo de Characato (Guevara, C. 1969); finalmente, el estudio "Geología y Mapa de Peligros del volcán Misti" (Mariño, J. *et al.*, 2016), que fue trabajado a una escala de 1:25 000. Este mapa fue complementado con la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución, donde se diferenciaron principalmente los depósitos superficiales y posteriormente se verificó los contactos y límites de los depósitos cartografiados durante los trabajos de campo.

La delimitación de unidades litológicas se basó en la litología dominante de las formaciones geológicas existentes sin considerar su edad. Se dio énfasis a las características geotécnicas (rocas y suelos) como intensidad de fracturamiento, grado de meteorización, resistencia a la erosión y, en general, a las características de susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa. Las unidades geológicas fueron agrupadas siguiendo la especificación técnica denominada "Leyenda y simbología de mapa litológico", elaborada por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgos Geológicos (DGAR) del Ingemmet, dentro de su sistema de Gestión de Calidad ISO (DGAR-ET-004, 2014) (mapa 12).

Los principales grupos de suelo y rocas se han agrupado en dos grandes unidades de clasificación:

- Depósitos inconsolidados
- Unidades del substrato

3.2.1 Depósitos inconsolidados (I)

Esta unidad agrupa a los depósitos poco o nada coherentes e inconsolidados de edad reciente, de extensión y grosor variable, conformados por materiales de litología heterogénea y heterométrica, depositados desde el Pleistoceno al Cuaternario reciente y agrupados en función de su génesis.

Para la zona de estudio se han determinado siete tipos de materiales no consolidados de los catorce que se tienen en la especificación técnica DGAR-ET-004, que son producto de la meteorización, erosión y acumulación. Presentan morfologías planas, plano-onduladas a algo inclinadas, terrazas, lomadas y acumulaciones de piedemonte. Ocupan en conjunto el 67.84 % del área de estudio. Dentro de esta unidad se tienen las siguientes subunidades:

Depósitos fluviales (I-2). Los constituyen los materiales de los lechos de los ríos o quebradas, terrazas bajas y llanura de inundación. Son depósitos heterométricos constituidos por bolos, cantos y gravas subredondeadas en matriz arenosa o limosa, mezcla de lentes arenosos y areno-limosos. Son transportados por la corriente de los ríos a grandes distancias en el fondo de los valles y depositados en forma de terrazas o playas, removibles por el curso actual del río y ubicados en su llanura de inundación. Son depósitos inconsolidados a poco consolidados, fácilmente removibles, cuya permeabilidad es alta (fotografía 3.1).



Fotografía 3.1 Vista aguas abajo del valle del río Andamayo, sector Puente Chiguata, donde se puede ver el material fluvial conformado por arenas y gravas acumuladas en el cauce activo.

Los depósitos aluviales (I-3). Conforman llanuras antiguas y/o niveles de terrazas adyacentes a los valles de los ríos Andamayo, Socabaya, Mollebaya y Chili; y las quebradas Agua Salada, Huarangal, Huarangueros, San Lázaro, El Peral, Pastoraiz, Río Seco, El Azufral, entre otras. Están compuestos por una mezcla de fragmentos heterométricos y heterogéneos (bolos, gravas,

arenas, etc.), redondeados a subredondeados, transportados por la corriente de los ríos a grandes distancias. Conforman terrazas y abanicos aluviales extensos. Tienen regular a buena selección y se presentan estratos diferenciados que evidencian la actividad dinámica fluvial (fotografías 3.2 y 3.3).



Fotografía 3.2 Vista de margen izquierda del río Chili, cerca de la desembocadura de la quebrada Venezuela, es posible observar dos niveles de material fluvial que conforman la terraza; el nivel inferior conformado por grava, bolos y arenas, el nivel superior conformado principalmente por arenas y limos, usados como terrenos de cultivo.



Fotografía 3.3 Gravas y arenas poco consolidados de la Formación Cuico del Cuaternario ubicado en la margen izquierda de la quebrada Río Seco, sector Cuesta Blanca.

Depósitos proluviales (I-4). Presentan fragmentos rocosos heterométricos (cantos, bolos, bloques, etc.) con relleno fino areno-arcilloso depositado en el fondo de valles tributarios y conos de deyección en la confluencia con el río principal. Pueden presentar cierta estratificación, que representa la ocurrencia de varios flujos de detritos a través del tiempo. Los materiales

que conforman estas capas pueden ser gruesos y finos; todo depende de la intensidad de la precipitación pluvial que los originó y la disposición de material suelto en la cuenca donde se originan (fotografías 3.4 y 3.5). Se confunden con las terrazas aluviales o se interdigitan con estas; a diferencia de los depósitos aluviales, estos depósitos son mal clasificados.



Fotografía 3.4 Vista del acantilado de la margen derecha del río Chili entre los Puentes Quiñones y Bolognesi, se puede observar los materiales gruesos (gravas y bolos) acumulados por un antiguo flujo de detritos (lahar histórico del Misti).



Fotografía 3.5 Vista de la margen izquierda de un tributario de la quebrada Azufral socavado en la Pampa Cura, donde es posible ver tres niveles de flujos de detritos conformados por material grueso de tipo gravas subangulosas a subredondeadas, englobado en matriz fina; así como material gravo limo-arcilloso; los depósitos se presentan muy compactados y duros. Toda la secuencia aparece cubierta por un depósito de caída de cenizas piroclásticas.

Depósitos coluviales (I-6). Se encuentran conformados por bloques rocosos heterométricos y de naturaleza litológica homogénea, acumulados al pie de taludes escarpados, en forma de conos cuando es un solo depósito. Cuando hay varios depósitos ubicados consecutivamente, forman piedemontes. Los bloques angulosos más gruesos se depositan en la base, y los tamaños menores disminuyen gradualmente hacia el ápice. Carecen de relleno, aunque puede encontrarse material fino de arena y limo entre los clastos. Son sueltos sin cohesión y conforman taludes de reposo poco estables (fotografía 3.6).

También, se consideran dentro de esta categoría los depósitos formados por los materiales que fueron movilizados por algunos tipos de movimientos en masa. Aquellos se componen de fragmentos de tamaños heterométricos, mezclados de forma caótica, y pueden presentarse algo consolidados. Los principales agentes formadores son el intemperismo, gravedad, movimientos sísmicos, movimientos en masa (deslizamientos, derrumbes, caída de rocas, avalanchas y movimientos complejos).



Fotografía 3.6 Depósitos coluviales acumulados en la ladera media del acantilado de la margen derecha de la quebrada Río Seco, sector prolongación Uchumayo.

Depósitos lacustrinos (I-6). Se encuentran constituidos por sedimentos muy finos arcillo-limosos, a veces con intercalaciones de lentes areno-gravosos. Se encuentran estratificados en capas muy finas denominadas *varves*; también, ocurren intercalaciones con lentes orgánicos (fotografía 3.7). Se denominan *bofedales*, conforman generalmente planicies y están relacionados a las cuencas altas. Su génesis está relacionada a

represamientos naturales, donde se presentan aguas tranquilas; por lo tanto, el material fino se deposita por decantación, así como la depositación de material fino en cuencas endorreicas. Los depósitos lacustrinos que se presentan en el valle del río Andamayo, posiblemente tienen su origen en la formación de un lago asociado al represamiento del río, originado por el emplazamiento de la avalancha de escombros del volcán Pichu Pichu, que se emplazó en dirección E-O, hace 1.65 Ma.



Fotografía 3.7 Vista donde se puede observar los niveles finos lacustrinos, en la margen izquierda de la quebrada Agua Salada, altura del puente del mismo nombre, cerca de su desembocadura al río Andamayo.

Depósito glaciar (I-8). Dentro de esta subunidad se han considerado los depósitos de origen netamente glaciar, así como los materiales de origen glaciar que fueron transportados y redepositados por escorrentía pluvial o por deshielo de los nevados.

Depósitos glaciares se localizan en zonas de gran elevación generalmente descubiertas y cubiertas solo de nieve estacional-temporal. Esto se debe al marcado proceso de retroceso glaciar que han sufrido las zonas de Cordillera Andina por el cambio climático. Las principales exposiciones se localizan a lo largo de los flancos este y oeste del volcán Pichu Pichu cerca de la cumbre. Las acumulaciones generadas en estas vertientes como resultado de este proceso, durante el Pleistoceno y Cuaternario reciente, corresponden a las acumulaciones heterométricas de gravas angulosas, bloques, guijarros y arena, dispuestas

sin estratificación en una abundante matriz de limo y arcilla. Las masas de acumulación dejadas por estos retrocesos son gruesos volúmenes de sedimentos acumulados en forma de morrenas (que pueden denominarse según su ubicación en el valle glaciar en morrenas laterales, frontales y de fondo), así como acumulaciones de detritos de gelifracción más recientes.

Depósitos fluvio-glaciares. Estos se distribuyen principalmente a lo largo de la ladera media del flanco oeste del volcán Pichu Pichu. Son materiales glaciares (morrenas) que han sufrido removilización por acción fluvial o por gravedad. Están compuestos por material gravoso subredondeado, heterométrico, matriz areno-arcillosa, de espesor y permeabilidad variables, medianamente compactos (fotografía 3.8). Se ubican generalmente a cotas por encima de los 2900 m s. n. m. y ocupan extensas terrazas a lo largo del valle de la quebrada Honda, distrito de Chiguata, generalmente con pendiente moderada.



Fotografía 3.8 Vista aguas abajo en la quebrada Honda cerca de la localidad de Chiguata es posible observar el material gravoso subredondeado y los bloques transportados por corrientes fluviales que acarrearón depósitos de origen glaciar y los acumularon formando una extensa terraza dentro del valle.

Depósitos volcánicos y volcanoclásticos (1-9). Los depósitos volcánicos están conformados por la acumulación de caída de cenizas y tefras volcánicas, asociados a volcanes con actividad en el cuaternario (fotografía 3.9). Los principales agentes formadores son la efusividad volcánica contemporánea y los vientos.

Los depósitos volcanoclásticos son aquellos formados por actividad volcánica, generalmente explosiva, seguida de una

remoción/retrabajo de material. Tienen aspecto similar a las rocas clásticas, debido a que se transportan, depositan y acumulan por procesos similares a dichas rocas, aunque el proceso original que produce el material es volcánico. Este aspecto es similar, dado que se encuentran constituidos por material fragmentado (piroclástico o tefra). El agente que los transporta es el agua y flujos de masas con diversos grados de saturación de agua: flujos de lodo o deslizamientos de laderas por inestabilidad.



Fotografía 3.9 Vista de depósitos volcanoclásticos conformado por acumulación de lapillis (libreta amarilla) y flujos piroclásticos inconsolidados; sector Pampa Bateones en el distrito de Alto Selva Alegre.

3.2.2 Unidades del substrato

Estas unidades han sido divididas de tal forma que agrupan a las diferentes litologías según su composición principal, así como por su estado de alteración y fracturamiento. En la zona de estudio se han diferenciado tres grupos de los cinco grupos diferenciados en la especificación técnica DGAR-ET-004/2014; así se tienen:

- Rocas intrusivas (II)
- Rocas volcánicas (III)
- Rocas metamórficas (VI)

Cada unidad se ha subdividido en varias litologías particulares, las cuales se describen a continuación:

Rocas intrusivas (II). Las rocas intrusivas que afloran en la zona de estudio se extienden al lado suroeste del volcán Misti. Ocupa un porcentaje pequeño del área total (7.71 %). Los cuerpos intrusivos pertenecen al Batolito La Caldera, presentan una topografía redondeada que se eleva entre los 2000 y 3500 m s. n. m., de pendiente fuertes (hasta 30°) y drenaje de configuración dendrítica. El grupo está conformado por rocas intrusivas del Cretáceo Superior-Paleoceno, que se disponen

en dirección NO-SE. La resistencia de estos materiales rocosos varía según la composición, textura y su localización, así como por efectos del clima al que están expuestos. Las rocas intrusivas que afloran en la zona se han dividido en dos subunidades:

Granodioritas (II-2). Afloran en el extremo suroeste de la zona de estudio, forman parte del territorio de los distritos de Uchumayo, Tiabaya, Jacobo Hunter, Socabaya y Yarabamba. Formadas por la Súper Unidad Tiabaya, correspondientes a la secuencia final del Batolito de la Costa.

Litológicamente, los afloramientos están compuestos por rocas granodioritas de grano grueso, reconocibles en muestra de mano las plagioclasas, ortosas, cuarzo, biotita y hornblenda en cantidades variables; son de color gris claro, ligeramente rosado. Los afloramientos rocosos, debido al sistema de fracturas, presentan grandes bloques rectangulares que por intemperismo están afectados por disyunción catáfila, que forma bolos subredondeados a redondeados (fotografía 3.10). Las granodioritas pueden aparecer intruida por diques aplíticos y pegmatíticos, y en las superficies de las fracturas muestra manchas oscuras de turmalina; también, se presentan abundantes xenolitos de forma redondeada.



Fotografía 3.10 Vista del intrusivo granodiorítico que conforma el cerro San Ignacio; se puede observar los bolos resultantes de la exfoliación catáfila; al pie de estas laderas se ubica el pueblo joven Inmaculada Concepción, del distrito Tiabaya.

Dioritas, tonalitas, meladioritas, gabrodioritas, gabro (II-3). Constituyen intrusiones de dimensiones pequeñas a medianas. Afloran principalmente en el extremo sur y suroeste de la zona estudiada, emplazados en el borde oeste de la Cordillera Occidental Andina; forman parte de territorios de los distritos de Uchumayo, Sachaca, Tiabaya, Jacobo Hunter, Socabaya, Mollebaya y Quequeña. Corresponde al Batolito La Caldera, de edad Cretácico. La exposición de los plutones presenta formas irregulares con drenaje dendrítico. Los afloramientos intrusivos formas colinas y lomadas con pendientes moderadas (15°), con escasa a nula presencia de vegetación.

Dentro de esta subunidad destacan los siguientes intrusivos:

- **Súper Unidad Ilo:** Compuesta por tonalitas y dioritas del Cretáceo inferior, de color blanco rosáceo y gris oscuro por contaminación de los gabros y dioritas.
- **Grupo gabro-dioritas:** Son rocas oscuras, las dioritas posiblemente se produjeron a expensas del gabro. La roca tiene coloración gris oscuro y gris verdoso por alteración y

algo rojizo por intemperismo; el grano es mediano a grueso, se puede reconocer cristales de feldespato y hornblenda, y en algunos casos biotita y cuarzo (fotografías 3.11 y 3.12).

- **Súper Unidad Yarabamba:** Presenta afloramiento redondeado de diorita básica, de color gris claro a gris oscuro que por alteración se torna a un color gris rosáceo; en su composición presenta cristales de plagioclasa, hornblenda y biotita. Por efectos del fracturamiento e intemperismo se originan bloques irregulares de diferentes tamaños con aristas subredondeadas a redondeadas (fotografía 3.13); cuando el proceso de intemperismo es muy intenso se forman bolos por efectos de la disyunción esferoidal; esta roca también presenta disgregación granular. Se encuentra atravesando rocas metamórficas de edad Precámbrico, a su vez se halla cubierta por rocas volcánicas de edad Cenozoico.
- **Súper Unidad Linga:** Se encuentran dioritas de edad Cretáceo-Paleógeno con altos contenidos de feldespatos.



Fotografía 3.11 Afloramiento de gabro de coloración gris verdosa por alteración de la superficie de la roca, sobre el que se han construido viviendas, sector de calle Real, distrito de Jacobo Hunter.



Fotografía 3.12 Vista en la que se puede observar un gabro muy fracturado y ligeramente alterado, ubicado en un afloramiento reducido localizado en la margen derecha de la quebrada Río Seco, cerca del peaje de Uchumayo.



Fotografía 3.13 Dioritas de la Súper Unidad Yarabamba afectadas por disyución esferoidal y disgregación granular que manifiesta el alto grado de alteración de la roca, sector cerros Pajonal y Malpaso, distrito de Mollebaya.

Rocas volcánicas (III). Se encuentran constituidas por rocas piroclásticas, lavas andesíticas y dacíticas, ignimbritas y flujos de bloques. De buena distribución en la zona de estudio, forman parte de la planicie ignimbrítica, colinas y el estratocono del volcán Misti; sus afloramientos ocupan el 23.96 % del área total de la zona de estudio. De acuerdo con sus características litológicas principales el grupo se ha subdividido en tres subunidades principales.

Rocas piroclásticas (III-1). En sentido general, agrupa fragmentos sólidos de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva al aire durante una erupción volcánica. Petrológicamente, los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica solidificados en algún momento de la erupción, frecuentemente durante su recorrido aéreo. Según el tamaño de los fragmentos (ceniza, lapilli y bomba volcánica), se distinguen tobas, flujos piroclásticos e ignimbritas. Dentro de esta subunidad destacan las siguientes formaciones:

- **Ignimbrita Aeropuerto:** Aflora en toda la depresión de Arequipa, con espesores de entre 5 a 100 m; tiene dos

facies: una inferior de color blanco grisáceo, bastante consolidada y una superior de color rosado que se presenta no consolidada (fotografía 3.14). Los depósitos no son soldados, su composición es dacítica a riolítica.

- **Ignimbrita La Joya:** Aflora en las zonas de Yarabamba, río Chili, Yura y La Joya; los depósitos no son soldados a ligeramente soldados, con espesores de 5 a 80 m; son de composición riolítica.
- **Unidad Añashuayco:** Denominación con que se conocía a la ignimbrita Aeropuerto de Arequipa; litológicamente está constituida por tobas riolíticos y dacíticos.
- **Ignimbrita Río Chili:** Aflora en toda la depresión tectónica de Arequipa; tiene un espesor de 50 a 200 m; posee alto contenido de fenocristales de plagioclasa, anfíboles, biotita, sanidina, cuarzo y óxidos de Fe-Ti. Los depósitos en algunos sectores aparecen parcialmente soldados. En el cañón del río Chili, las ignimbritas alcanzan 150 m de espesor.



Fotografía 3.14 Dioritas de la Súper Unidad Yarabamba afectadas por disyunción esferoidal y disgregación granular que manifiesta el alto grado de alteración de la roca, sector cerros Pajonal y Malpaso, distrito de Mollebaya.

Rocas piroclásticas y lavas (III-2). Corresponde a una combinación de rocas volcánicas de origen efusivo (lavas) y explosivo (piroclástico). Sus afloramientos se presentan en el lado este de la zona de estudio, haciendo parte del cono volcánico del Misti. Se configura colinas, lomadas y mesetas. Dentro de esta subunidad destaca la siguiente formación:

- **Secuencia de flujos de lava y piroclastos del Plioceno:**
Afloran al sureste del volcán Misti, en las zonas de Cari Cari y Arenal, infrayaciendo lavas del volcán Pichu Pichu. Están conformadas por flujos de lava de composición andesítica y por secuencias de flujos piroclásticos intercalados con varios niveles de lahares.

Secuencia lávica andesítica – dacítica (III-3). Propia de las dinámicas eruptivas de mayor a menor fluidez de los magmas debido a la composición mineralógica. Contienen agua juvenil de los volátiles y la disposición de estos en el líquido es magmático. Las erupciones efusivas emiten coladas de gran

fluidez que pueden alcanzar varios kilómetros de longitud. Llegan a formar centros volcánicos, domos lávicos y edificios volcánicos. Se distribuyen a lo largo de los conos volcánicos del Chachani, Misti y Pichu Pichu. Dentro de esta subunidad destacan las siguientes unidades litoestratigráficas:

- Flujo de lava del volcán Pichu Pichu
- Flujos de lava del volcán Chachani, de composición andesítica (fotografía 3.15)
- Secuencia de flujo de lavas en bloques del Misti
- Flujos de lavas en bloques con anfíbol y piroxenos del Misti
- Flujo de lava andesítica del Misti
- Domos y flujos de lava en bloques
- Depósito de flujo de bloques con escasa ceniza
- Domo histórico
- Depósito de flujo de lava



Fotografía 3.15 Vista del afloramiento andesítico correspondiente a un flujo de lava del volcán Chachani; la roca aparece poco fracturada y ligeramente alterada que le da una coloración rojiza en superficie. Localizado en la planicie ubicada en la margen izquierda del río Chili, distrito Alto Selva Alegre.

Rocas metamórficas (VI). Las rocas metamórficas que afloran en la zona de estudio se distribuyen ocupando un porcentaje pequeño del área total (0.48 %). Se ubican principalmente en al sur del volcán Misti en los distritos de Characato y Mollebaya. De acuerdo con la litología dominante, se han diferenciado solo una de las tres subunidades consideradas en la especificación técnica DGAR-ET-004/2014; así se tienen:

Gneis (VI-2). Presentan una buena resistencia; son rocas duras poco alteradas. Dentro de esta subunidad destaca el siguiente complejo:

- **Gneis Charcani:** Son rocas de grano medio a grueso, con bandas de coloración rosado que contiene cuarzo y feldespato potásico, así como bandas de coloración verdosa que contiene anfíbol y biotita; duras y compactas (fotografía 3.16). Son rocas de muy alta temperatura y presión. Estas rocas son de edad Neo-proterozoico.



Fotografía 3.16 Gneis de Charcani, se pueden ver las bandas de coloración rosado y verde; localizado en la carretera muy cerca de la localidad de Mollebaya.

CAPÍTULO IV

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

El agua subterránea en la ciudad de Arequipa tiene diversos usos para consumo humano, riego de zonas agrícolas y uso industrial; pero, también, es uno de los factores condicionantes para la ocurrencia de peligros geológicos, principalmente los movimientos en masa.

Por otra parte, el crecimiento urbano, sin planificación, hacia las quebradas y laderas del volcán Misti resulta alarmante, debido a su tendencia a ocupar las zonas de peligro muy alto.

Para conocer detalles del comportamiento del agua subterránea relacionada a los movimientos en masa y a las demandas de la población, se realizó la evaluación hidrogeológica de la zona.

El trabajo de hidrogeología parte de un inventario detallado de fuentes de agua subterránea, el cartografiado hidrogeológico, la toma de muestras y el desarrollo de pruebas hidráulicas para determinar parámetros hidrogeológicos de las rocas, tales como la conductividad hidráulica, porosidad y gradiente hidráulico, como información necesaria para la elaboración del mapa hidrogeológico.

El mapa hidrogeológico tiene por finalidad mostrar la distribución espacial de las rocas más permeables caracterizadas como acuíferos, las zonas de surgencias de aguas subterráneas, que podrían estar relacionadas a la ocurrencia de peligros geológicos y las zonas impermeables que tienden a saturarse de agua y aumentan el peso de los materiales, caracterizados como acuitardos.

Esta información considera también una variable básica para diseñar planes y proyectos de gestión integral de los recursos hídricos, y contribuye en planes de expansión urbana.

Para conocer la composición química de las fuentes de aguas subterráneas, se ha realizado un análisis fisicoquímico con el fin de determinar su movimiento en el subsuelo, su origen y calidad, y de esta manera poder establecer el uso final del recurso.

4.1 INVENTARIO Y CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES

Para el inventario se consideró información de campañas realizadas por el Ingemmet durante los años 2009, 2012 y 2016. Los trabajos de gabinete, laboratorios, análisis de muestras, elaboración de mapas y preparación del presente informe se realizó durante los años 2018 y 2019.

El inventario de fuentes permitió encontrar las principales zonas de descarga hídrica que tienen los acuíferos, georreferenciar su ubicación, describir sus parámetros de control, estructural o litológico, y medir sus parámetros físicos *in situ*; además, se tomaron muestras para el análisis químico del laboratorio.

Los trabajos de campo se desarrollaron cubriendo la mayor parte de los afloramientos o surgencias de aguas subterráneas que tiene el área de estudio con el propósito de tener un diagnóstico completo de cómo se manifiestan las aguas subterráneas en superficie.

Se inventarió un total de 32 fuentes de aguas subterráneas (cuadro 4.1 y anexo IV), de las cuales 16 corresponden a manantiales, 11 pozos, 3 drenajes captados y 2 fuentes termales. A partir de las fuentes inventariadas, se seleccionaron 11 manantiales, 02 drenajes captados y 02 fuentes termales para la toma de muestras.

Estas fuentes, en su mayoría, afloran condicionadas por cambios de litología, por estructuras como fallas, lineamientos y fracturas presentes en el Grupo Barroso y en los depósitos volcánicos pleistocénicos. En el piso de valle, donde se ubica la ciudad de Arequipa, existe un acuífero caracterizado como acuífero poroso con más de 660 pozos de extracción de aguas subterráneas de los cuales se ha monitoreado 11.

Cuadro 4.1

Resumen de fuentes de agua subterránea, parámetros hidráulicos y físicoquímicos

Tipo de Fuente	Fuentes inventariadas	Fuentes muestreadas	Parámetros <i>in situ</i>	Descripción
	2009, 2012, 2016			
Manantiales	16	11	Caudal, temperatura, pH, CE y STD.	Se tomaron muestras en la misma surgencia u ojos de los manantiales.
Drenajes Captados	3	2	Caudal, temperatura, pH, CE y STD.	Se tomaron muestras en el mismo drenaje captado.
Pozos	11	0	Caudal, temperatura, pH, CE y STD.	Se tomaron parámetros en el mismo pozo.
Fuentes termales	2	2	Caudal, temperatura, pH, CE y STD.	Se tomaron muestras en la misma surgencia u ojos de las fuentes termales.
Total	32	15		

Fuente: Registros de campo, Ingemmet 2009, 2012 y 2016.

La presencia de estructuras geológicas como fallas, fracturas, diaclasas condiciona también el movimiento y dirección de los flujos de aguas subterráneas; los cambios de litología permeable a impermeable permiten el afloramiento de las aguas subterráneas.

Para visualizar espacialmente las fuentes de aguas subterráneas, ubicadas en la zona de estudio, se las ha clasificado por tipo de fuente (figura 4.1).

4.1.1 Clasificación de la descarga

Teniendo en cuenta las variables que condicionan la descarga y utilizando el sistema propuesto por Meinzer (cuadro 4.2), se ha clasificado los manantiales de acuerdo con su volumen de descarga. Los caudales medidos corresponden a la época de estío.

Durante las campañas de campo no se registraron manantiales de primera categoría, es decir, no existe descarga de aguas subterráneas con caudales superiores a 2830 l/s. Cabe resaltar que solo se tienen medidas de caudal de los manantiales, fuentes termales y drenajes captados; en cuanto a los pozos, no se midieron caudales de explotación.

- El manantial Yumina (1325-12) tiene un caudal de 206 L/s, que corresponde a una fuente de tercera categoría; es una de las fuentes principales de la zona de estudio, cuyo caudal abastece las áreas agrícolas del sector de Yumina (fotografía 4.1). El caudal del manantial Yumina fue aforado en mayo del 2016.
- Los manantiales Ojo del Milagro 1 (1325-14) (fotografía 4.2), Ojo del Milagro 2 (1325-15) (fotografía 4.3), (aforado el 23 de mayo del 2016), La Bedoya (1325-28) (fotografía 4.4)

y la fuente termal Agua de Jesús (1325-48) corresponden a fuentes de tercera categoría, con caudales 114 l/s, 98 l/s, 215 l/s, y 40 l/s, respectivamente. Estos manantiales poseen caudales que mantienen su caudal a lo largo del año hidrológico, con variaciones mínimas, evidencias que no provienen de un reservorio pequeño; estos caudales provienen de un acuífero importante de flujos intermedios a regionales.

- Los manantiales Sabandía CB-07 (1325-29), Tingo (1325-30), Congata CB-16 (1325-33), los drenajes captados Sachaca CB-08 (1325-31), Los Perales (1325-32), con caudales 14 l/s, 25 l/s, 19 l/s, 12 l/s, 12 l/s, respectivamente, corresponden a fuentes de cuarta categoría.
- El manantial Las Peñas Macho (1325-47) y el drenaje captado Charcani CB-17 (1325-27) son de quinta categoría con caudales de 5 l/s y 7 l/s, respectivamente.
- Los manantiales Bautista (1325-50), Agua Salada (1325-26), Villa el Golf (1325-35), Puente el Fierro 2 (1325-36) corresponden a fuentes de sexta categoría, con 2 l/s, 1.8 l/s, 3 l/s, 1.5 l/s de caudal, respectivamente.
- Los manantiales Albertazzo 1 (1325-51) (fotografía 4.5), Albertazzo 2 (1325-52), Puente Fierro 1 (1325-34) y la fuente termal Los Cornejos-El membrillo (1325-49) tienen caudales por debajo de 1 l/s, pertenecen a la séptima categoría y surgen en los materiales porosos del Grupo Barroso.

El caudal de descarga de 20 fuentes suma 777.312 l/s. Constituye un recurso importante para la región, cuya descarga es casi permanente durante el año, lo que permite interpretar que sus descargas están relacionadas a los acuíferos potenciales.

Cuadro 4.2
Clasificación de la descarga

Categoría	Unidades	Cantidad de fuentes
	(L/s)	Inventario fuentes
Primera	<2830	-
Segunda	283 - 2830	0
Tercera	28.3 - 283.0	5
Cuarta	10.0 - 28.3	5
Quinta	3.0 - 10.0	2
Sexta	1.0 - 3.0	4
Séptima	< 1.0	4

Fuente: Meinzer, 1923.



Fotografía 4.1 Aforo del manantial Yumina usando correntómetro, $Q = 206.0$ l/s.



Fotografía 4.2 Aforo del manantial Ojo del Milagro 1, usando correntómetro, $Q = 114.0$ l/s.



Fotografía 4.3 Aforo del manantial Ojo del Milagro 2, usando correntómetro, $Q = 98.0$ l/s.



Fotografía 4.4 Manantial captado de la Bedoya en el distrito de Chiguata.



Fotografía 4.5 Manantial Albertazo 1 (1325-51) ubicado en las inmediaciones de Yumina.

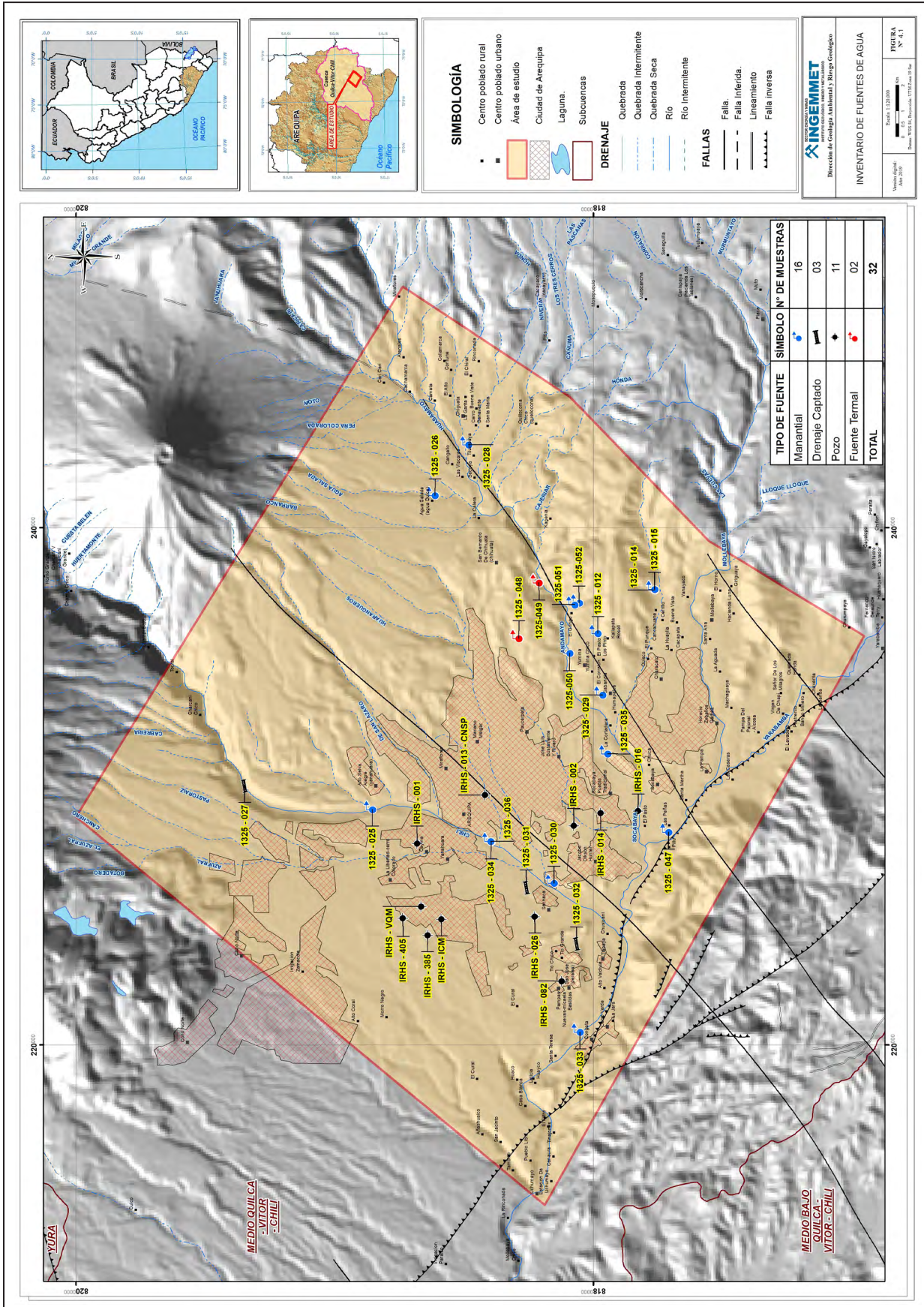


Figura 4.1 Mapa de inventario de fuentes de agua.

4.2 CLASIFICACIÓN HIDROGEOLÓGICA

En el mapa hidrogeológico de la zona de estudio a escala 1/120 000 (figura 4.4), se han zonificado los afloramientos más permeables según su capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas y clasificados como acuíferos. Las rocas que en superficie permiten la infiltración del agua corresponden a la zona de alimentación y recarga, en contraste con las rocas impermeables que son generalmente impermeables y clasificadas como acuitardos.

Para conocer cuáles de las formaciones geológicas tienen características permeables en la zona de estudio, se ha considerado la permeabilidad vertical; para ello se desarrollaron ensayos de infiltración puntual que mide la conductividad hidráulica en las rocas y suelos.

Para dicho cálculo, en la zona de estudio, se realizaron 09 ensayos de infiltración, utilizando el método de Lefranc, a carga constante, cuyos resultados comparados con la tabla convencional de permeabilidades, según Benítez 1963 y Custodio 1996 (cuadro 4.3), obtienen una correspondencia hidrogeológica a través de la conductividad hidráulica.

Cuadro 4.3

Tabla convencional de permeabilidad

Valores (m/día)	Permeabilidad										
	10-5	10-5	10-4	10-3	10-2	10-1	1	10	10-2	10-3	10-4
Calificación	Impermeable		Poco Impermeable		Algo permeable		Permeable		Muy permeable		
	Acuicludo		Acuitardo		Acuífero pobre		Acuífero medio a bueno		Acuífero		
Tipo de Materiales	Arcilla compacta Granito		Limo arenoso Limo Arcilla Limosa		Arena fina Arena limosa Caliza fracturada		Arena limpia Grava Arena fina		Grava limpia		

Fuente: Benítez, 1963.

En los volcánicos del Barroso, los flujos de lava, en la mayor parte de los sectores, tienen fracturas de densidad y ancho variable (fracturas abiertas), donde es posible la realización adecuada de este tipo de pruebas, dado que el agua del ensayo infiltra directamente sin detención. Por lo tanto, se escogió los sectores donde las fracturas se encuentran ligeramente cerradas para medir la permeabilidad de las rocas y además se desarrollaron estas pruebas en los depósitos de flujos de escombros y materiales volcanoclásticos.

4.2.1 Ensayos de infiltración

Este ensayo consiste en provocar la infiltración del agua en el subsuelo, mediante un tubo de diámetro uniforme

(permeámetro de 2”), incrustado en el subsuelo, para medir el volumen de agua absorbida en función del descenso y el tiempo (figura 4.2).

Los ensayos de infiltración puntual realizados en la zona de estudio (fotografías 4.6, 4.7 y 4.8) se hicieron por el método del permeámetro de carga constante. Para este trabajo se ejecutaron nueve ensayos de infiltración para estimar la permeabilidad de los depósitos volcanoclásticos que se ubican en la zona de influencia de los manantiales más importantes de la zona de estudio (cuadro 4.4 y figura 4.3).

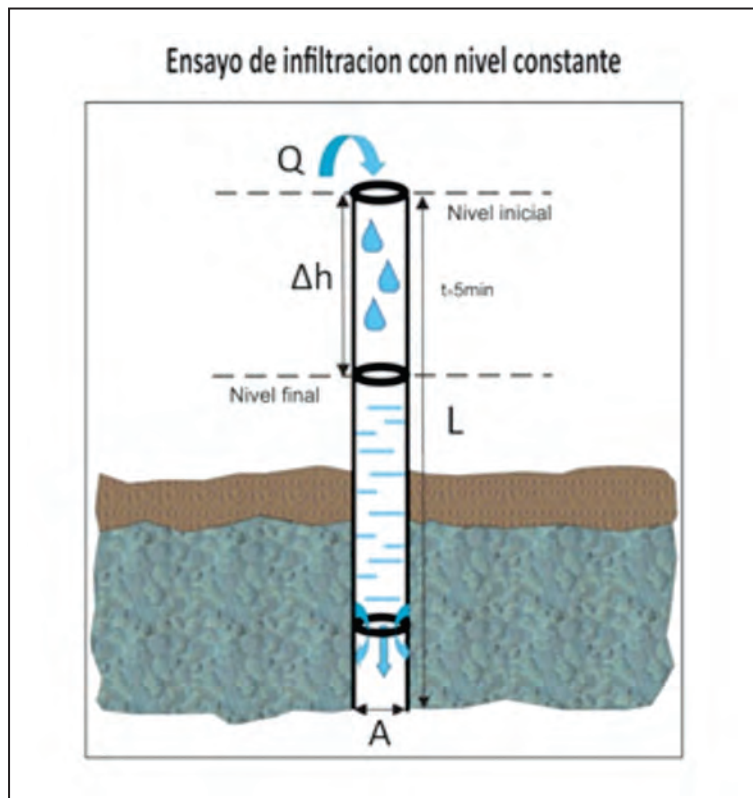


Figura 4.2 Esquema de ensayo de infiltración.

Fuente: Peña *et al.*, 2019.

Cuadro 4.4

Valores de conductividad hidráulica (m/día) registrados en la zona de estudio

N°	Código	Coordenadas			K(m/día)	Clasificación	
		E	N	Altura m s. n. m		Hidrogeológica	
1	EI-04	236312	8195000	3392	0.17	Algo Permeable	Acuífero Pobre
2	EI-05	235084	8191234	3037	0.37	Algo Permeable	Acuífero pobre
3	EI-06	228377	8196753	2942	0.29	Algo Permeable	Acuífero pobre
4	EI-07	229557	8190579	2557	0.18	Algo Permeable	Acuífero pobre
5	EI-08	230923	8190770	2578	0.34	Algo Permeable	Acuífero pobre
6	EI-09	236730	8187501	2871	0.22	Algo Permeable	Acuífero pobre
7	EI-10	238197	8183339	2834	0.23	Algo Permeable	Acuífero pobre
8	EI-12	236284	8179944	2590	0.31	Algo Permeable	Acuífero pobre
9	EI-13	235324	8178971	2604	0.43	Algo Permeable	Acuífero pobre

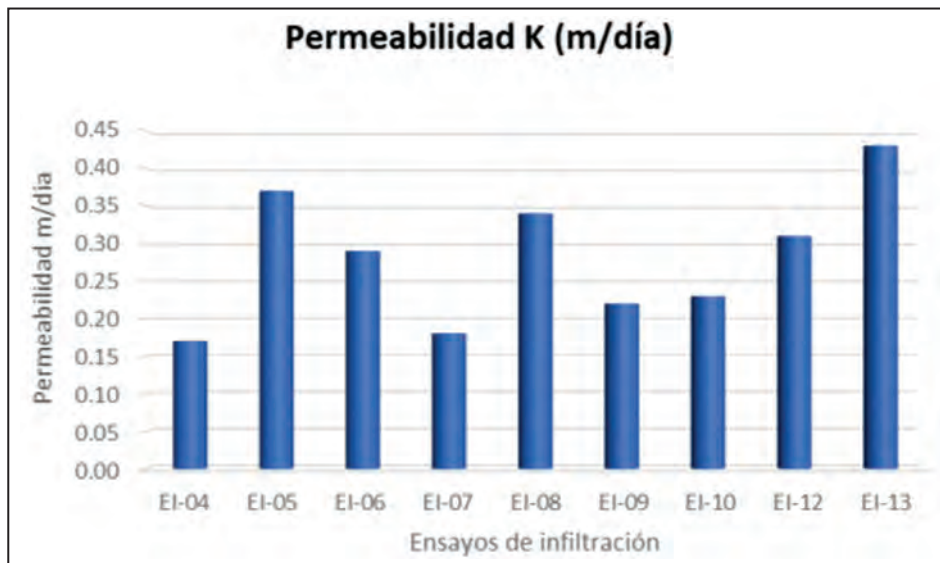
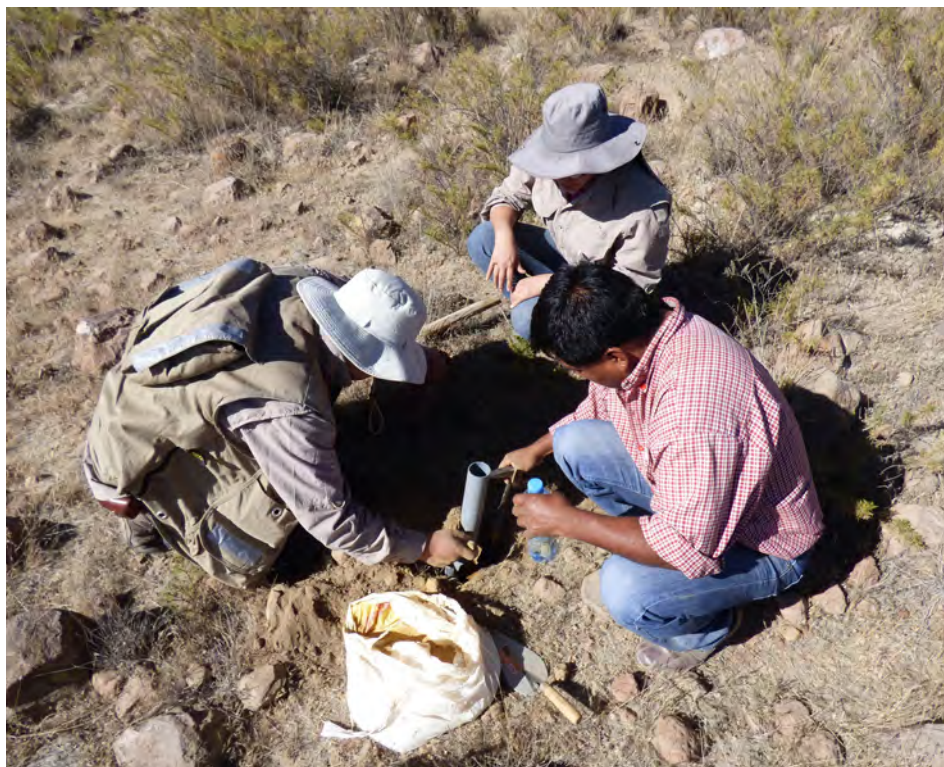


Figura 4.3 Valores de permeabilidad según ensayos de infiltración realizados en la zona de estudio.

Fuente: Peña, 2018.



Fotografía 4.6 Ensayo de infiltración EI-05 ($K=0.37$ m/día) realizado sobre lapilli con cenizas y fragmentos líticos.



Fotografía 4.7 Ensayo de infiltración EI-08 ($K=0.34$ m/día) realizado sobre flujos piroclásticos y cenizas.



Fotografía 4.8 Ensayo de infiltración EI-12 ($K=0.30$ m/día) realizado sobre rocas vulcano-clásticas, avalancha de escombros.

4.2.2 Interpretación

Los ensayos de infiltración tienen una codificación asignada (cuadro 4.4), cuyos valores se utilizaron para investigar la permeabilidad o conductividad hidráulica de los materiales ubicados en la zona de estudio. Hacia el sector oriental se ubican los manantiales de mayor caudal, como La Bedoya, Yumina, Ojo el Milagro y Ojo el Milagro 2.

Para calcular los valores de conductividad hidráulica se realizaron: 01 ensayo en roca y 08 ensayos en materiales vulcanoclásticos, los que se describen a continuación:

- El ensayo EI-04 se realizó sobre rocas volcánicas del Grupo Barroso: lavas traquiandesíticas afaníticas fracturadas, cuyo valor calculado es de 0.16×10^{-1} m/día. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeables y asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- El ensayo EI-05 se realizó sobre lapilli con ceniza y fragmentos líticos, cuyo valor calculado es de 0.37×10^{-1} m/día. Se clasificó como rocas algo permeables, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- El ensayo EI-06 se realizó sobre lavas traquiandesitas afaníticas y lahar, cuyo valor calculado es de 0.28×10^{-1} m/día. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeables, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- El ensayo EI-07 se realizó sobre lavas fracturadas con erosión diferencial, cuyo valor calculado es de 0.18×10^{-1} m/día. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeables, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- El ensayo EI-08 se realizó sobre flujo piroclástico (cenizas), cuyo valor calculado es de 0.34×10^{-1} m/día. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeables, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- El ensayo EI-09 se realizó sobre lapilli con cenizas, cuyo valor calculado es de 0.21×10^{-1} m/día. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeable, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).
- Los ensayos EI-10, EI-12 y EI-13 se realizaron sobre avalancha de escombros, con bloques subangulosos y matriz limo-arcillosa cuyos valores calculados son 0.23×10^{-1} m/día, 0.30×10^{-1} m/día y 0.42×10^{-1} m/día, respectivamente. Se clasificó estos materiales como rocas algo permeables, asignándoles una calificación hidrogeológica de acuífero pobre (cuadro 4.4).

Los resultados encontrados tienen valores de permeabilidades variables; estos valores se correlacionaron con los valores del cuadro 4.4. Se encontró que corresponden al rango de “algo permeables”, clasificándose como acuíferos pobres que permiten el paso del agua en su interior.

4.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Los materiales geológicos han sido clasificados de acuerdo con sus parámetros hidrogeológicos de porosidad y permeabilidad, y de acuerdo con su capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas, en tres grupos: porosos no consolidados, porosos volcánicos y fisurados volcánicos. A los acuitardos se los ha agrupado como sedimentarios, volcánicos e intrusivos; y a los acuífugos, como metamórficos (figura 4.4).

En la zona de estudio, el 51.5 % del área total corresponde a acuitardos, los cuales se ubican predominantemente en la parte oeste de la zona de estudio. El 48 % de las áreas corresponde a acuíferos (porosos no consolidados, fisurado volcánico y poroso volcánico), ubicados principalmente en la parte este de la zona de estudio (margen izquierda del río Chili), donde además se encuentran distribuidas la mayor cantidad de fuentes de agua subterránea.

4.3.1 Acuíferos

Se ha identificado los acuíferos con condiciones de almacenamiento y circulación de agua subterránea. Estos pueden ser porosos no consolidados y fisurados volcánicos.

Acuíferos porosos

Acuífero poroso no consolidado aluvial

Corresponde a los depósitos aluviales y algunas terrazas ubicadas en el fondo del valle del río Chili y el río Andamayo, y de las quebradas principales como Nivera, San Lázaro, Yarabamba.

Está compuesto principalmente por gravas o conglomerados poco consolidados, arenas y limos, con espesores variables. Son depósitos de algunos decímetros a varios metros de espesor; contienen además bloques subredondeados a redondeados (cantos rodados), distribuidos en una matriz de arena y limo.

En general, son buenos acuíferos, pero en la zona de estudio por tener extensión limitada tienen escaso interés hidrogeológico.

Acuífero poroso no consolidado fluvio-glaciar

Se encuentra entre las quebradas Nivera y Honda. Son materiales permeables y están conformados por una mezcla de bloques heterométricos y polilitológicos, angulosos, subangulosos y subredondeados, incluidos dentro de una matriz fina limo-arenosa. Superficialmente, afloran en extensiones muy

reducidas por lo que se consideran materiales permeables o acuíferos de escaso interés hidrogeológico.

Acuífero poroso no consolidado fluvial

Es un depósito cuaternario reconocido en el lecho del valle de los ríos Chili y Socabaya. Está constituido principalmente de gravas o conglomerados poco consolidados. En el área de estudio es considerado como acuífero permeable de escaso interés hidrogeológico debido a su reducida extensión de área superficial y escasa potencia.

Acuífero poroso no consolidado Cuico

Es un depósito pleistocénico, constituido principalmente de conglomerados, areniscas tufáceas y cineritas con intercalaciones de bancos de tufo traquíticos, dacíticos y riolíticos, limos, arcillas y niveles de tufo redepositados. En el área de estudio son considerados como materiales altamente permeables, pero como acuífero es de escaso interés hidrogeológico debido a su extensión muy localizada.

Acuífero poroso volcánico

Se encuentra emplazado en la margen izquierda del río Chili. Entre los materiales porosos volcánicos se consideran las avalanchas de escombros, los depósitos de lahares, nombrados también como materiales vulcanoclásticos de permeabilidad variable, y se clasifican como acuíferos porosos volcánicos (APV-br3). Estos materiales tienen permeabilidad variable, cuentan con sectores de permeabilidad baja y sectores de permeabilidad alta a intermedia por donde el agua subterránea puede circular sin encontrar dificultad.

Se considera uno de los acuíferos más importante, pues la ciudad de Arequipa se encuentra asentada sobre este y también alberga la mayor cantidad de fuentes de aguas subterráneas.

Acuíferos fisurados

Las características hidrogeológicas de rocas fracturadas en la zona de Arequipa están muy relacionadas a la alimentación y recarga de acuíferos. Las principales características de este tipo de acuíferos es su alta permeabilidad, debida fundamentalmente a la porosidad secundaria adquirida por fisuración. Esta permeabilidad varía de acuerdo con la densidad y el tamaño de abertura de las fracturas y diaclasas.

Acuíferos fisurados volcánicos

La actividad volcánica ocurrida en las inmediaciones de la ciudad de Arequipa y la actividad tectónica producida en la Cordillera de los Andes del sur del Perú dio origen a la presencia de numerosas fracturas y fallas regionales. Además, permitieron la aparición de aparatos volcánicos con depósitos de lavas e

ignimbritas de porosidad efectiva y gran productividad, siendo clasificados como acuíferos fisurados volcánicos (AFV-br1), dependiendo siempre de la alimentación y recarga que se produzca a partir de la precipitación pluvial.

a.1) Acuífero fisurado del Misti

El estratovolcán Misti tiene características hidrogeológicas variables, aunque en gran parte de la cartografía se puede delimitar rocas lávicas fracturadas cubiertas por materiales sueltos porosos y permeables, flujos de lavas en bloques de composición andesítica de gran potencia (hasta 150 m). Desde el punto de vista hidrogeológico, es un estratovolcán con flujos de lava de composición andesítica, que favorece la infiltración y recarga de aguas subterráneas, limitado en las inmediaciones inferiores por materiales de permeabilidad variable, vulcanoclásticos y flujos de escombros, los cuales favorecen al almacenamiento de aguas subterráneas. Las evidencias de este se encuentran en las faldas del volcán Misti, hacia los distritos de Miraflores y Mariano Melgar, a ambos márgenes de la quebrada de San Lázaro, así también en la margen derecha de la quebrada Huasamayo.

La zona de alimentación y recarga de este acuífero no es muy amplia, lo cual permite una limitada infiltración de aguas de precipitación pluvial; sin embargo, este fenómeno sirve como recarga del acuífero poroso volcánico de los distritos de Mariano Melgar, Miraflores, Characato, Socabaya, Mollebaya y Tiabaya.

a.2) Acuífero fisurado del Chachani

Corresponde a los acuíferos que forman complejos volcánicos, litológicamente formados por flujos de lavas y domos de lava de composición andesítica, ligeramente vesiculados y de textura porfirítica.

Este acuífero dentro de la subcuenca es muy importante desde el punto de vista económico y social para la ciudad de Arequipa. Los flujos de aguas subterráneas que almacena este acuífero recorren a través de las fracturas de este, llegando al contacto litológico de los depósitos piroclásticos del mismo complejo volcánico.

Desde el punto de vista hidrogeológico el acuífero de Chachani es importante como zona de recarga por los altos grados de precipitación en la zona donde afloran estos materiales; estos flujos han sido considerados como un sistema intermedio (Sulca *et al.*, 2010), el tiempo de circulación de este varía en cientos de años.

a.3) Acuífero fisurado del Pichupichu

Los depósitos volcánicos correspondientes al complejo volcánico Pichupichu, en su mayoría, están compuestos

de lavas andesíticas altamente fracturadas y de naturaleza permeable; se ubican en la parte noreste de la zona de estudio, se relacionan a los acuíferos del Misti; por ende, constituye la zona de alimentación y recarga de acuíferos. En la zona de estudio, afloran en reducida extensión, pero su continuidad hidrogeológica sobrepasa los límites del área de estudio.

4.3.2 Acuitardos

Los acuitardos son rocas prácticamente impermeables y que conforman gran parte de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio. La importancia de los acuitardos en la zona de Arequipa se debe a que estas rocas conforman estratos condicionantes para el almacenamiento y surgencias de las aguas subterráneas en los acuíferos. Se tienen los siguientes acuitardos: sedimentarios, volcánicos e intrusivos.

a) Acuitardo volcánico

Se encuentran en gran parte de la zona estudio, correspondientes al Grupo Barroso (ATV-br2) y a depósitos de la Formación Añashuayco (ATV-añ); su litología corresponde a depósitos de piroclastos, algunos sectores de los depósitos en avalancha de escombros, lapilli, cenizas, etc. Este tipo de rocas presentan un alto grado de porosidad primaria, que almacenaría cierta cantidad de agua; sin embargo, su permeabilidad es baja, solo se transmite agua a través de fracturas y presión hidrostática. Esto las hace menos importantes para la exploración hidrogeológica.

b) Acuitardo intrusivo

Se ubica en la parte sur y suroeste del área de estudio, conocido como el Batolito de la Caldera, cordillera de rocas intrusivas compuesta por diorita y granodiorita principalmente. Regionalmente, esta estructura cumple el rol de barrera de carácter impermeable que condiciona la existencia de pozos y manantiales en el valle de Arequipa.

4.3.3 Acuífugo

Dentro de este grupo consideramos las rocas metamórficas (gneis) del complejo basal de la costa, que presenta nula permeabilidad a pesar de su aspecto fracturado en superficie (fracturas y fallas).

4.4 HIDROQUÍMICA

4.4.1 Estaciones de muestreo de aguas subterráneas

En la zona de estudio se ha muestreado 15 fuentes de aguas subterráneas que corresponden a manantiales, fuentes termales y a drenajes captados, tratando de evaluar las características generales de los reservorios acuíferos. Se tomó parámetros fisicoquímicos en cada estación de muestreo.

4.4.2 Selección de la serie analítica

La serie analítica se seleccionó con la finalidad de describir las propiedades de los componentes hidroquímicos de las aguas subterráneas.

En cada estación de muestreo se registraron las coordenadas UTM del punto (proyección WGS 84) y las características físicas como apariencia, color y olor. Se tomaron parámetros de campo (pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS, etc.) y se recolectaron las muestras respectivas para los análisis en laboratorio. Para la toma de parámetros en campo, se utilizó dos equipos multiparamétricos de marca WTW y Thermo Orión. Estos equipos se calibraron utilizando sus respectivos estándares y siguiendo las indicaciones del fabricante.

4.4.3 Análisis de resultados

El laboratorio seleccionado para el análisis de las muestras de agua fue el laboratorio de Ingemmet, donde se analizaron 04 muestras de aguas subterráneas tomadas las 2016 y 11 muestras tomadas en durante 2009 y 2012.

4.4.4 Parámetros fisicoquímicos de las aguas

4.4.4.1 pH

En general, los valores muestran una tendencia neutra con valores entre 6.5 y 7.6. Sin embargo, algunas fuentes como La Bedoya (1325-028:6.04), Yumina (1325-012:6.37), Chilina (1325-025:6.33) y Agua de Jesús (1325-048:6.00) tienen valores por debajo del promedio, correspondiente a aguas ligeramente ácidas; interpretamos que se debe al contacto que tienen las aguas con las cenizas y materiales volcánicos en algún momento de la circulación en profundidad.

4.4.4.2 Temperatura

Las fuentes inventariadas en el área de estudio tienen valores variados, que van desde los 12.1 °C hasta los 23.3 °C. Existen 02 fuentes termales: Agua de Jesús (1325-048:23.0 °C) y Los Cornejos - El membrillo Membrillo (1325-049: 23.3 °C), aunque podemos deducir que no infiltran a gran profundidad, ya que para ser aguas termales tienen temperaturas relativamente bajas.

4.4.4.3 Conductividad eléctrica (CE)

De acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental - ECA, aprobados por DS-n°004-2017-MINAM, los valores de conductividad eléctrica aptos para consumo humano están por debajo de los 1500 µS/cm.

En el área de estudio, la mayoría de las fuentes se encuentran por debajo de 1500 µS/cm, aunque observamos fuentes con valores que lo sobrepasan: el drenaje captado Charcani CB-17

(1325-027:1538 $\mu\text{S/cm}$), los manantiales Villa el Golf (1325-035:2004 $\mu\text{S/cm}$), Las Peñas Macho (1325-047:2065 $\mu\text{S/cm}$); estas fuentes se encuentran con valores elevados de contenido de sales. Las fuentes que sí evidencian alto contenido de sales son las fuentes termales Agua de Jesús (1325-048: 3110 $\mu\text{S/cm}$) y Los Cornejos-membrillo (1325-049: 2720 $\mu\text{S/cm}$). Presentan valores elevados, enriquecidos en minerales; son aptas para el tratamiento medicinal, pero no para el consumo humano. Estas fuentes se relacionan a su posible estructura de circulación que puede ser una falla regional que origina una circulación profunda y mayor tiempo de residencia en el subsuelo, lo que permite que el contenido de sales se incremente.

4.4.5 Facies hidroquímicas

De las fuentes muestreadas se han evaluado las concentraciones de los componentes iónicos mayoritarios en el agua, como los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-).

El predominio de las facies hidroquímicas se ha calculado usando el software Aquachem versión 5.1, que a su vez nos ha permitido generar un mapa hidroquímico que represente los valores y el predominio de los elementos químicos mayoritarios.

Para establecer comparaciones entre los elementos predominantes se ha planteado los puntos en el diagrama de Stiff, los cuales nos permitirán visualizar figurativamente los resultados ubicados sobre un mapa hidroquímico (figura 4.5).

Para el análisis e interpretación final de datos hidroquímicos se han utilizado los diagramas de Piper y evolución de flujos de Mifflin, Stiff, Schoeller-Berkaloff, con la finalidad de dar una interpretación de su posible origen o procedencia del agua subterránea (interacción agua roca), así como su calidad para los distintos usos.

4.4.5.1 Diagramas de Stiff

Son representaciones gráficas que muestran sintéticamente las características químicas principales del agua, facilitando su clasificación. En la figura 4.5, se observan los diagramas de Stiff para cada fuente analizada, los puntos planteados en el mapa corresponden a surgencias subterráneas (manantiales y fuentes termales) y a drenajes captados.

En la figura 4.5 se observa el mapa hidroquímico de la zona de estudio con los diagramas de Stiff, representando cada punto de muestreo, analizado y clasificado con los valores respectivos.

En la zona de Arequipa, entre los manantiales, fuentes termales y drenajes captados, se observan tres rangos de valores hidroquímicos:

- De 0 a 7 meq/L (11 muestras)
- De 0 a 15 meq/L (2 muestras)
- De 0 a 30 meq/L (2 muestras)

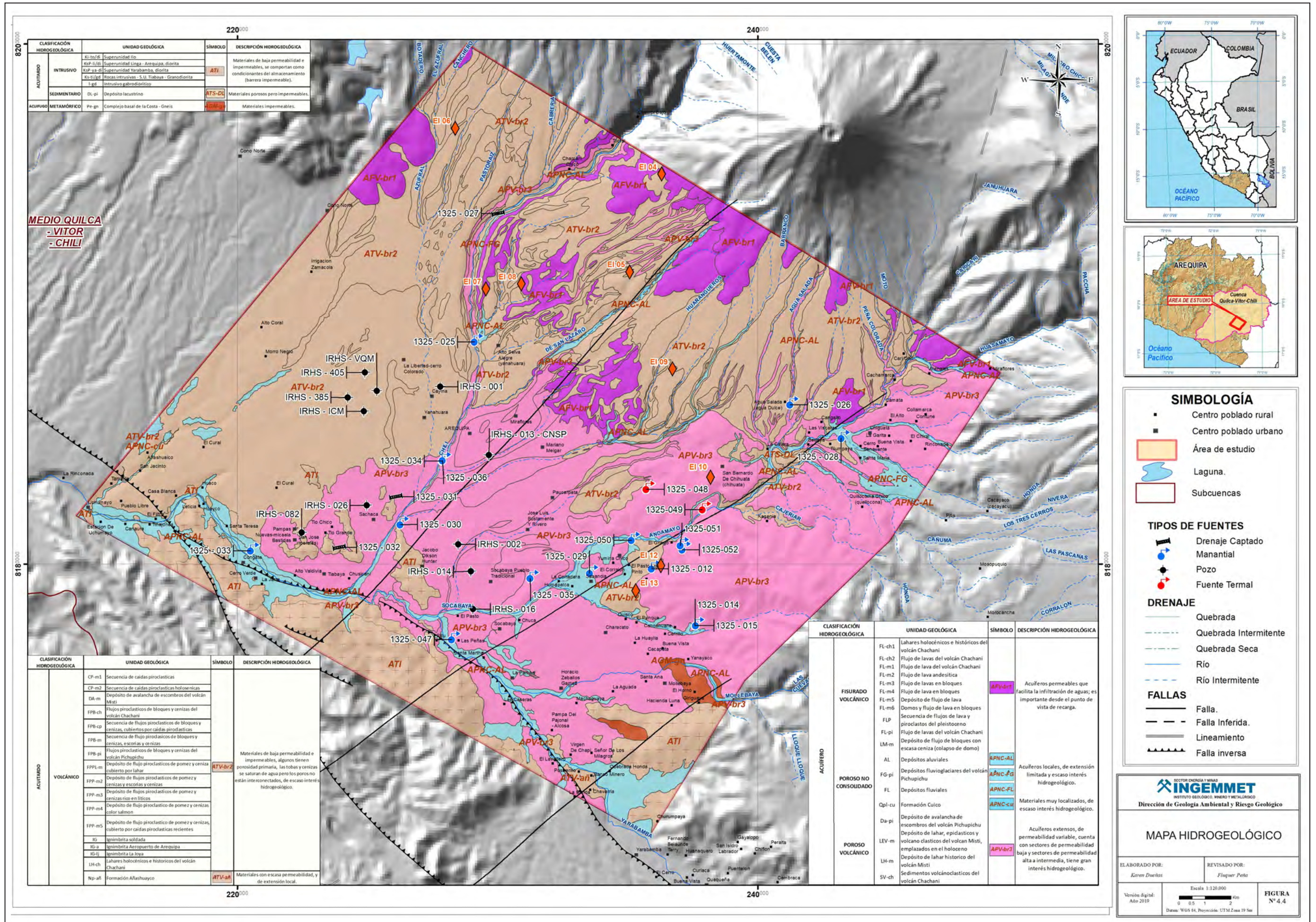


Figura 4.4 Mapa hidrogeológico.

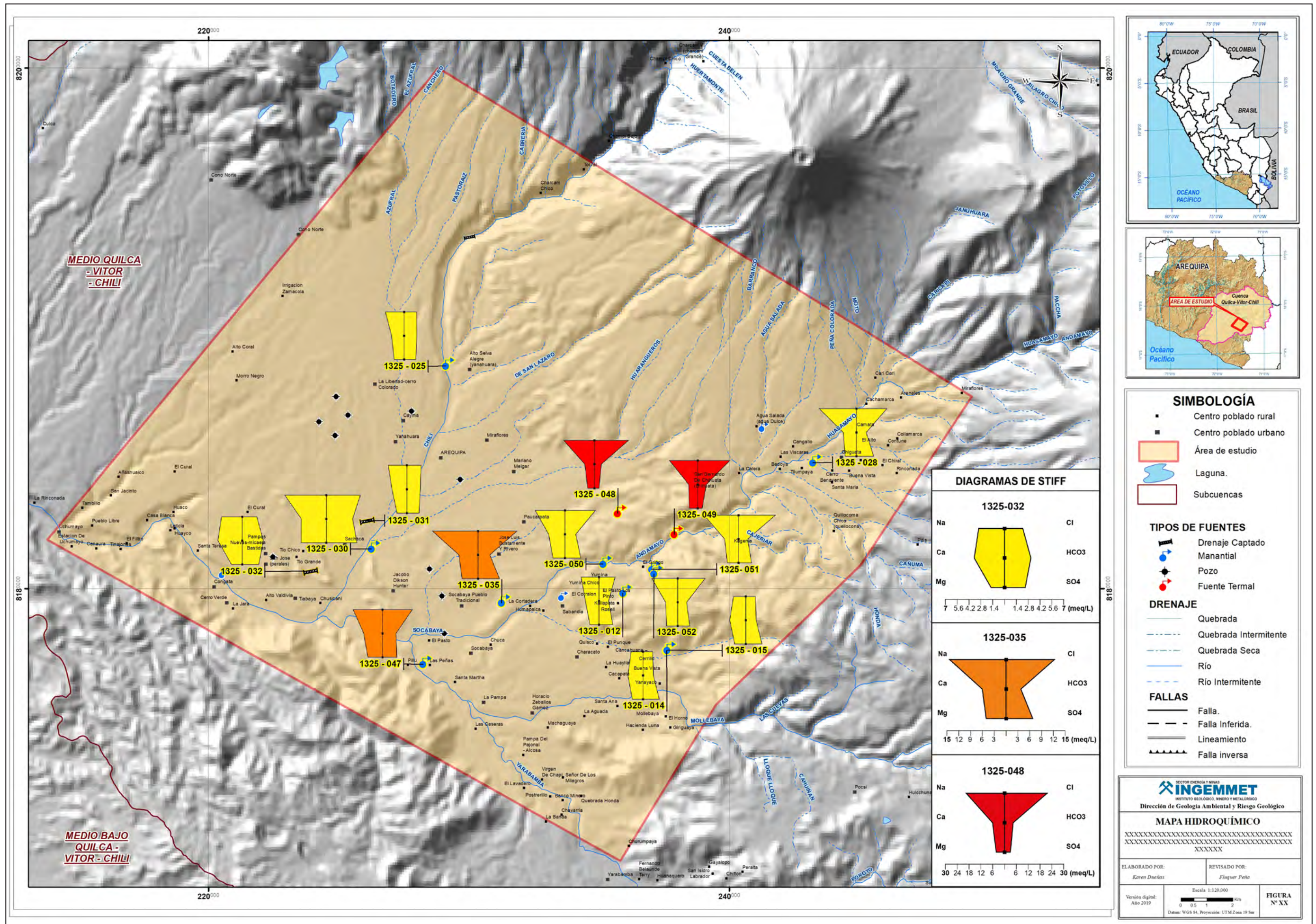


Figura 4.5 Mapa hidroquímico.

4.4.6 Diagramas de Piper y evolución de flujos Mifflin

Se ha utilizado este diagrama para plotear los resultados de elementos mayoritarios, donde se representa las fuentes evaluadas de un sistema acuífero en un mismo gráfico.

Los diagramas de Scatter nos permiten corroborar estas predominancias con la evolución de flujos utilizando la relación hidroquímica $Cl+SO_4$ vs $Na+K$ (meq/l) (Mifflin, 1988 en Ángeles *et al.*, 2008).

Interpretaciones

Considerando que las predominancias químicas están relacionadas con la evolución de flujos, se establece el gráfico comparativo entre el diagrama de Piper y el diagrama de Scatter.

a) Para acuíferos porosos

Los reservorios acuíferos porosos no consolidados se encuentran en depósitos aluviales o fluviales, y de estos acuíferos surgen los manantiales Las Peñas Macho (1325-47) y Bautista (1325-050), cuya predominancia química es clorurada sódica (Cl-Na) (figura 4.6).

Otro tipo de reservorio acuífero poroso son los acuíferos porosos volcánicos, que se encuentran en depósitos de lahares y avalanchas de escombros. En estos acuíferos encontramos dos predominancias químicas marcadas.

La predominancia sulfatada cálcica sódica (SO_4 -CaNa) corresponde a los manantiales Ojo el Milagro 1 (1325-14) y

Ojo el Milagro 2 (1325-15), que son fuentes de recorrido local a intermedio. Estas fuentes son aguas con mayor tiempo de retención en el subsuelo y con mayor distancia de recorrido; su predominancia sulfatada la adquieren del lavado de materiales salinos, de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de sustancias orgánicas que tuvieron contacto con el agua. Su segunda predominancia la adquieren de los procesos de reducción disolución y por el intercambio catiónico de las fases sólidas de sodio y magnesio con los recorridos del agua subterránea. Por lo tanto, se puede deducir que su fuente de alimentación y recarga proviene de la parte alta del cerro Pichupichu (Peña, 2018).

La predominancia clorurada sódica (Cl-Na) corresponde a los manantiales Bedoya (1325-28), Yumina (1325-12), Chilina (1325-25), Tingo (1325-30), Villa el Golf (1325-35), Albertazzo 1 (1325-51), Albertazzo 2 (1325-52); estas fuentes tienen un recorrido intermedio a regional, las aguas subterráneas que llegan a estos manantiales adquieren cloruros de la lluvia y de las rocas volcánicas por las que circulan sus aguas; la precipitación sobre rocas volcánicas fracturadas y meteorizadas otorga un fuerte componente del ion cloruro, por lo que las aguas de escorrentía también están cargadas de cloruros. La segunda predominancia, sódica, la adquieren del contacto del agua con zonas arcillosas y de ceniza, en procesos de intercambio catiónico (Peña, 2018). Esta interpretación permite deducir que las aguas de dichos manantiales provienen de la parte alta del estratovolcán Pichupichu, la cual sería su zona de recarga.

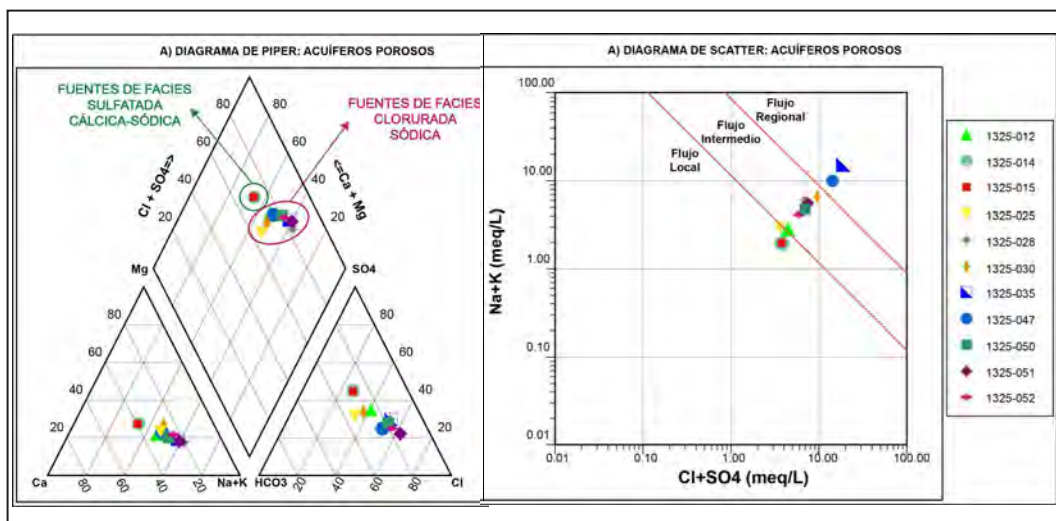


Figura 4.6 Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos porosos.

b) Para fuentes termales

Las fuentes termales tienen características especiales, circulación profunda o circulación cercana a una cámara magmática, la misma que otorga alta temperatura, y alto contenido de sales y minerales (figura 4.7).

Las fuentes termales identificadas son dos (2) y tienen predominancia clorurada sódica (Cl-Na), identificando su recorrido regional.

Las fuentes termales Aguas de Jesús (1325-048) y Los Cornejos-membrillo (1325-049), cuyas temperaturas se encuentran entre 23.0 °C y 23.3 °C, respectivamente, evidencian su largo recorrido; pero también su intermedia a baja profundidad de circulación, ya que generan temperaturas relativamente bajas.

Su predominancia clorurada sódica la adquieren de la lluvia que cae en la zona de recarga; circula a cierta profundidad muy cercana al contenido de materiales con contenido de sales o materiales arcillosos que otorgan su segunda predominancia química de Na (Peña, 2018).

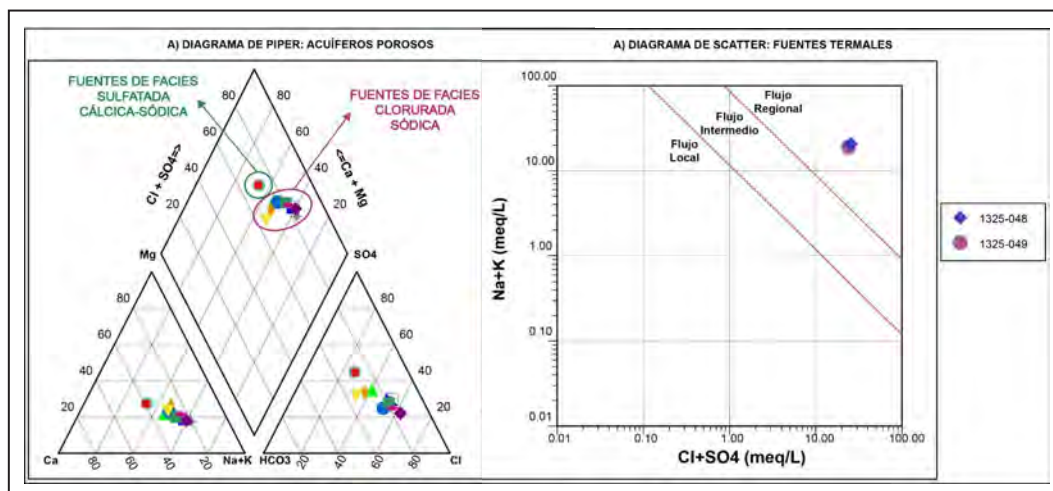


Figura 4.7 Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos relacionados a fuentes termales.

c) Para drenajes captados

En el área de estudio se encuentran tres drenajes captados (figura 4.8), los cuales fluyen superficialmente e infiltran sus aguas a los acuíferos porosos.

El drenaje captado Sachaca (1325-31) tiene una predominancia clorurada sódica cálcica (Cl-NaCa), el cloro debido al lavado de rocas volcánicas que abunda en la zona y el sodio debido al lavado de cenizas y arcillas; la presencia de calcio se debe a la interacción con aguas superficiales y suelos de superficie, ya que está asociado a los procesos de precipitación del CO_2 .

El drenaje captado Los Perales (1325-32) tiene una predominancia bicarbonatada cálcica sódica ($\text{HCO}_3\text{-CaNa}$); el ion bicarbonato procede fundamentalmente de la zona edáfica, donde hay una alta concentración de CO_2 debido a la respiración de organismos y la descomposición de la materia orgánica, y la predominancia cálcica y sódica que adquiere forma de la interacción con superficie.

Estas dos fuentes nos muestran que las aguas superficiales tienen concentraciones de cloro, sodio, sulfato; están asociados a la litología volcánica de la zona y se puede observar que una porción de estas concentraciones llega a los manantiales que corresponden a los acuíferos porosos.

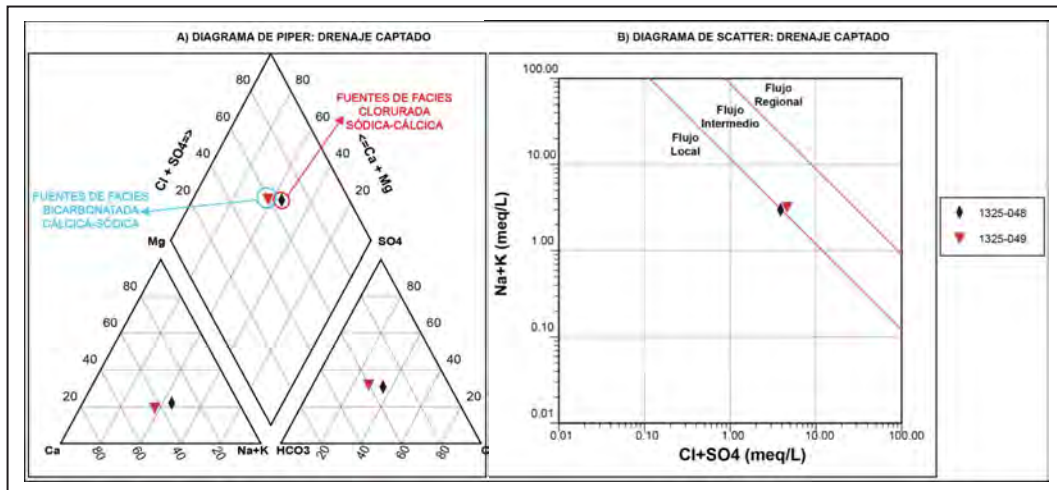


Figura 4.8 Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos relacionados a drenajes captados.

CAPÍTULO V

GEOMORFOLÓGIA

5.1 PENDIENTE DE LOS TERRENOS

La pendiente de los terrenos es uno de los principales factores dinámicos y particularmente de los movimientos en masa, ya que determinan la cantidad de energía cinética y potencial de una masa inestable (Sánchez, 2002). Este es un parámetro importante en la evaluación de procesos de movimientos en masa, considerado como factor condicionante.

Se puede decir que es más fácil que ocurran movimientos en masa en laderas y cauces, cuya pendiente principal varía entre media a fuerte ($> 30^\circ$); también, es más alta la erosión de laderas (laminar, surcos y cárcavas) en colinas o montañas, porque a mayor pendiente se facilita el escurrimiento superficial y, por ende, la erosión hídrica o pluvial.

Sin embargo, algunos procesos lentos como la reptación de suelos y ocasionales deslizamientos ocurren con un mínimo de pendiente. El caso de las inundaciones y erosión fluvial, además de influir otros factores netamente geomorfológicos y dinámicos, también ocurre en terrenos de suave pendiente.

El mapa de pendientes elaborado para la ciudad de Arequipa tiene como insumo principal el mapa topográfico y el Modelo de Elevación Digital - DEM obtenido por medio de la restitución fotogramétrica de imágenes satelitales estéreo del satélite WorldView y GeoEye, a escala 1:5000, con espaciamiento de curvas de nivel cada 5 m, las cuales se procesaron en el software ArcGis.

Se tomaron en consideración seis rangos o grados de pendiente de los terrenos, los cuales van desde muy bajo o llano, suave o de baja pendiente, moderada, fuerte, muy fuerte, hasta muy escarpada; estos se describen a continuación (mapa 2):

5.1.1 Terrenos llanos ($< 1^\circ$)

Comprenden terrenos planos de las zonas de altiplanicie, extremos más distales de abanicos aluviales y aluvio-torrenciales, bofedales, terrazas, llanuras de inundación, fondos de valles y lagunas. Estas áreas están sujetas a inundaciones de tipo fluvial y pluvial por anegamientos, principalmente cuando se presentan lluvias estacionales de carácter extraordinario.

Los principales peligros que se pueden presentar son flujos de detritos y de lodo que discurren por torrenteras; estos flujos se generaron en terrenos más elevados y sus materiales se depositan en estas zonas planas.

5.1.2 Terrenos inclinados con pendiente suave ($1^\circ - 5^\circ$)

Son terrenos planos con ligera inclinación que se distribuyen a lo largo de las zonas de fondos de valles y planicie ignimbrítica, en ondulamientos y cimas de lomadas de baja altura; también en terrazas aluviales, planicies sedimentarias y superficies de coladas de lava que descienden del cono del volcán Misti. Se incluyen además los piedemontes formados por quebradas secas de corto recorrido que se activan de forma excepcional.

5.1.3 Pendiente moderada ($5^\circ - 15^\circ$)

Los terrenos de pendiente moderada presentan buena distribución en las zonas de ladera de colinas y lomadas; también en piedemontes aluvio-torrenciales que depositaron las quebradas tributarias que bajan hacia el río Chili y vertientes glacio-fluviales.

5.1.4 Pendiente fuerte ($15^\circ - 25^\circ$)

Son pendientes que se distribuyen principalmente en los bordes de abanicos aluviales, conos, piedemontes proluvio-aluviales y planicies volcanoclásticas, y hombros y rellanos de montañas y colinas.

5.1.5 Pendiente muy fuerte ($25^\circ - 45^\circ$)

Están distribuidas principalmente en las laderas de colinas y montañas del Batolito La Caldera, ubicado en la zona sur del área de estudio; bordes de terrazas aluviales, islas fluviales de planicies lávicas y domos volcánicos que forman acantilados; y vertientes de los valles de los ríos Chili y Socabaya.

5.1.6 Pendiente muy escarpados ($> 45^\circ$)

Presentan una buena distribución a lo largo de laderas y cumbres de colinas y montañas intrusivas, estrato cono del volcán Misti, la planicie volcanoclástica inclinada, acantilados del río Chili, borde de cárcavas profundas y bordes de terrazas.

5.2 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

La geomorfología como variable temática es considerada una herramienta primordial para el análisis del medio físico. Se aplica a estudios de uso de suelo, peligros geológicos, paisaje, hidrología, cambios principales ocurridos durante el Cuaternario (volcánicos, tectónicos, sísmicos, fluviales, fluvio-glaciares, antrópicos, etc.), geología urbana, entre otros. Para interpretarla es necesario relacionarla al clima o cambios asociados a fenómenos climáticos (El Niño, glaciaciones).

La zona de estudio presenta diferentes unidades geomorfológicas que evidencian las condiciones climáticas y la actividad geodinámica preponderante en el pasado geológico y su evolución.

5.3 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

En la distinción de las diferentes unidades geomorfológicas de la ciudad de Arequipa y alrededores se consideraron distintos aspectos como la escala de trabajo (1:5000), la escala de presentación de los resultados (1:40 000) (mapa 3), el tipo de información temática, entre otros. Se tomó en cuenta para este propósito el trabajo denominado "Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación de tierras" (Villota, 2005) y el sistema español siguiendo la metodología expuesta por el Instituto Geológico y Minero de España-IGME en la "Guía para la elaboración del Mapa Geomorfológico de España a escala 1:50 000 (Martín-Serrano *et al.*, 2004). Se tuvo como insumos la base topográfica de elaboración propia, generada a partir de imágenes satelitales WorldView y GeoEye a escala 1:5000.

La cartografía en campo y gabinete permitió diferenciar tres grandes grupos de unidades de relieve morfológico y geoformas locales o individuales:

- Geoformas de carácter tectónico-degradacional y erosional
- Geoformas de carácter deposicional o agradacional
- Geoformas de carácter antrópico.

En función a la escala del presente trabajo, la diferenciación de unidades geomorfológicas considera tres aspectos fundamentales: 1) homogeneidad litológica y carácter estructural; 2) relieves o geoformas relacionadas a la erosión o sedimentación; 3) intervención de la mano del hombre. Las geoformas individuales se agrupan en tres tipos principales en función a su altura relativa y pendiente:

- Montañas, colinas y lomeríos
- Piedemontes
- Planicies o depresiones

La descripción de cada una permite conocer la pendiente del terreno, asociación litológica y control estructural. A diferencia de otros sectores del país se tiene una gran influencia volcánica, así como procesos tectónicos, fluviales y fluvio-glaciares. La asociación litológica (substrato rocoso y depósitos superficiales) se basa en los límites de las unidades geológicas diferenciadas en los cuadrángulos geológicos publicados (escala 1:50 000 y 1:25 000) y la cartografía de depósitos de acumulación reciente cuaternarios (movimientos en masa) a escala 1:5000, identificados en campo, con ayuda de las fotografías aéreas e imágenes satelitales.

A continuación, se describen las unidades geomorfológicas; en cada una se detalla su ubicación, distribución geográfica y características principales.

5.3.1 Geoformas de carácter tectónico-degradacional y denudacional

Resultan del efecto progresivo de los procesos morfodinámicos degradacionales sobre los relieves iniciales originados por la tectónica o sobre algunos paisajes construidos por procesos exógenos agradacionales. Estos procesos conducen a la modificación parcial o total de ellos a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005). Las geoformas agrupadas aquí se han generado como resultado de la erosión dejando una serie de superficies como lomas, colinas y montañas.

5.3.1.1 Unidad de montañas

Se considera dentro de esta unidad las geoformas con alturas mayores a los 300 m respecto al nivel de base local. Se reconocen como cimas o cumbres agudas, subagudas, semiredondeadas, redondeadas o tubulares, y estribaciones producto de las deformaciones sufridas por la erosión y la influencia de otros eventos de diferente naturaleza (levantamiento, glaciación, etc.). Sus laderas presentan un pendiente promedio superior al 30 % (como se cita en Villota, 2005, p. 63).

En el contexto general, se encuentra conformada de alineamientos alargados, constituidos por rocas de tipos metamórficas, intrusivas, volcánicas, volcánico-sedimentarias y sedimentarias. Se encuentra afectada por procesos de meteorización superficial en grado moderado. Dentro de esta unidad se tienen las siguientes subunidades:

Montaña modelada en roca intrusiva (RM-ri)

Corresponden a rocas de la Súper Unidad Yarabamba, de composición diorítica que luego de la erosión presentan laderas subredondeadas a convexas. Estas montañas presentan un drenaje subdendrítico (fotografía 5.1). De escasa presencia en el área de estudio, con tan solo el 1.16 % de la superficie total evaluada.



Fotografía 5.1 Vista hacia el sur donde se puede ver a los cerros Pajonal y Mal Paso que rodean a la localidad de Mollebaya.

Montaña modelada en roca metamórfica (RM-rm)

Son geoformas con pendientes muy fuertes. Estas se ubican al sur de la ciudad de Arequipa, conformando el cerro Pajonal en el distrito de Mollebaya. Presentan una reducida exposición en la zona de estudio con tan solo el 0.06 % de la superficie total evaluada.

Acantilado sedimentario (Ac-s)

Consiste en una pendiente de muy fuerte inclinación ($> 30^\circ$) a paredes subverticales, que resultan de la incisión de la planicie ignimbrítica por cursos de ríos y quebradas que dejaron colgado depósitos sedimentarios; se encuentra conformado principalmente por gravas, arenas y limo de la Formación Cuico. Parte de esta subunidad ha sido intervenida o modificada por actividad antropogénica, como es su adecuación en terrazas para realizar cultivos agrícolas o la construcción de viviendas. Representan tan solo el 0.14 % de la superficie estudiada.

5.3.1.2 Unidad de colinas y lomadas

Está representada por colinas y lomadas de relieve complejo y en diferentes grados de disección. Conforman alineamientos tipo serranías de carácter denudativo y volcánico. Pueden constituir superficies colinosas, lomadas onduladas o lomeríos en general de amplia extensión y resultantes de la degradación prolongada e intensiva de anteriores piedemontes y altiplanicies;

o resultantes del casi aplanamiento por la denudación extrema de una antigua cordillera. Estas geoformas presentan menor altura que una montaña (menos de 300 m desde el nivel de base local). Las colinas presentan una inclinación promedio en sus laderas superior al 16 % y divergen en todas direcciones a partir de la cima relativamente estrecha de base aproximadamente circular. Las lomadas presentan similar altura que las colinas, pero con cimas más amplias, redondeadas y alargadas, con gradientes entre el 8 % y el 16 % (como se cita en Villota 2005, p. 64).

Estas subunidades se ubican dentro o en los bordes de la unidad de montañas, en la zona de altiplanicies y conformando las vertientes de los ríos. Dentro de esta unidad se tienen las siguientes subunidades.

Colina intrusiva (RC-ri)

Esta subunidad de superficie presenta pendientes fuertes que han sido modeladas en plutones gabrodioríticos, dioríticos y granodioríticos como, por ejemplo, las súper unidades Tiabaya e Ilo. Presentan formas convexas y en menor relevancia cóncava; están presentes en altitudes de menos de 300 m con respecto a su nivel de base local (fotografía 5.2). Representan el 1.74 % de la superficie total evaluada; parte de esta subunidad ha sido antropogenizada, como es la construcción de viviendas en las laderas de colinas.



Fotografía 5.2 Vista hacia el sur, distrito de Jacobo Hunter, se puede observar el cerro San Ignacio que configura colinas intrusivas en rocas de tipo gabrodioritas; encima se tienen colinas con bloques de roca en sus vertientes.

Escarpe intrusivo (AC-i)

Consiste en una pendiente de fuerte inclinación ($> 30^\circ$) que puede alcanzar la verticalidad, resultante de la incisión de cursos de ríos; estos se han modelado en cuerpos gabrodiórticos. Representan el 0.02 % del área de estudio.

Colina intrusiva con vertiente de bloques (RC-rib)

Esta subunidad presenta pendientes fuertes que han sido modeladas en plutones gabrodioríticos, dioríticos y granodioríticos como, por ejemplo, las súper unidades Tiabaya e Ilo. Estas colinas intrusivas se caracterizan por presentar en sus laderas y vertientes gran cantidad de bloques, que en algunos casos llegan a presentar bordes subangulosos; estos bloques son resultado del fracturamiento presente en las rocas, así como del intemperismo que sufren en la zona (fotografía 5.3). Algunos sectores de estas colinas, principalmente en las porciones inferiores de las laderas (faldas), han sido ocupados por asentamientos humanos, que son vulnerables a la caída de rocas y flujos de detritos. Esta subunidad representa el 2.79 % de la zona de estudio.

Colinas y lomadas de avalancha de escombros (RCL-av)

Las colinas presentan elevaciones entre los 50 y 200 m de altura, de pendiente media a fuerte ($>15^\circ$) y disectadas por quebradas poco profundas. Están conformadas por depósitos de avalancha de escombros de los volcanes Misti y Pichupichu (fotografía 5.4). Las colinas y *hummocks* son una morfología típica en depósitos de avalancha de escombros, las cuales están asociadas a la presencia de megabloques. Algunas de estas colinas están siendo pobladas, específicamente en el sector este y norte de la ciudad de Arequipa. Representa el 17.1 % de la superficie total evaluada.

Colina metamórfica (RC-rm)

Elevaciones del terreno de menos de 300 m de diferencia con respecto al nivel de base local, formado por afloramiento de rocas de tipo gneis del Complejo Basal de la Costa; se localiza en el lado este del distrito de Mollebaya (fotografía 5.5). Representa el 0.14 % del área evaluada.



Fotografía 5.3 Vista hacia el oeste del centro poblado Las Caseras en el distrito de Socabaya; se puede ver las colinas intrusivas con bloques de roca en sus laderas y en la parte inferior de la fotografía la planicie volcánoclastica.



Fotografía 5.4 Vistas hacia el suroeste desde el sector de Chillihua donde se ve el Cerro San Bernardo que conforma colinas y lomadas de avalancha de escombros; distrito de Chiguata.



Fotografía 5.5 Vista de colinas metamórficas a la entrada de la localidad de Mollebaya.

Acantilado metamórfico (AC-m)

Consiste en una pendiente de muy fuerte inclinación ($> 45^\circ$) que puede alcanzar la verticalidad, resultante de la incisión del curso del río Mollebaya en un afloramiento gneisítico. Tienen una reducida exposición en la zona de estudio, representando solo el 0.009 %.

Colinas volcánicas ignimbríticas (CL-ig)

Esta subunidad es resultante de los procesos erosivos a los cuales han sido sometidos los depósitos de ignimbritas acumulados en una planicie; se los considera también como el relieve residual dejado por la actividad antrópica que transformó la planicie ignimbrítica en terrenos de cultivo; se puede observar en la zona de Yanahuara, algunas de ellas ocupadas con la construcción de viviendas. Abarca el 0.39 % del área estudiada.

Colinas volcánicas lávicas (RC-rv)

Son geoformas con menos de 300 m de altura que presentan superficies topográficas con pendientes medias (15°); están localizadas en la parte central de la zona de estudio (distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores y Mariano Melgar) (fotografía 5.6); sobre estas colinas se han construido viviendas. Litológicamente están conformadas por flujos de lava andesítica y flujo de lavas en bloques. Ocupan el 1.48 % del área total.

Colinas sedimentarias (RC-rs)

Es una subunidad de reducida exposición que fue diferenciada en el valle de la quebrada Río Seco, conformada por secuencias de la Formación Cuico (gravas, arenas y limos). Representan el 0.07 % de la superficie estudiada.

5.3.1.3 Unidades volcánicas

En esta unidad se agrupan los paisajes generados por la actividad volcánica y por sus productos, los cuales han sufrido en diverso grado los efectos de la denudación, pero que todavía conservan rasgos definidos de sus formas iniciales.

Escarpe Ignimbrítico (AC-ig)

Consiste en paredes de inclinación muy fuerte ($> 30^\circ$) a muy escarpadas ($> 45^\circ$), que resultan de la incisión de la planicie ignimbrítica por cursos de ríos y quebradas. Parte de esta subunidad ha sido intervenida o modificada por actividad antropogénica, como es su adecuación en terrazas agrícolas. Representan tan solo el 0.8 % de la superficie estudiada.

Escarpe volcanoclástico (AC-vc)

Esta subunidad resulta de los procesos erosivos causados por ríos y quebradas que cortan la planicie volcanoclástica, dejando en sus márgenes paredes fuertemente inclinadas hasta subverticales (fotografía 5.7); algunos de estos escarpes han sido modificados con la habilitación de terrazas agrícolas o para la construcción de viviendas. Abarcan el 3.5 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.6 Vista hacia el suroeste donde se puede observar una colina volcánica lávica andesítica; urbanización Mariano Bustamante, distrito Mariano Melgar.



Fotografía 5.7 Vista hacia el oeste donde se puede apreciar la zona encañonada amplia del río Chili, conformada por acantilados volcánoclasticos subverticales; al pie de estos acantilados se tienen piedemontes coluvio-deluviales.

Manto de piroclastos (Ca-cv)

Esta subunidad comprende los depósitos finamente estratificados de bomba, lapillis y cenizas volcánicas, consolidados o no, que proceden de lluvias de piroclásticos resultantes de un volcanismo explosivo, especialmente erupciones riolíticas y andesíticas.

Los materiales que caen cerca a la fuente de origen conforman un manto grueso, el cual se va adelgazando conforme se aleja de esta fuente; pero conforman una clara estratificación en la que destacan los piroclastos más gruesos en la base de la capa y una granulometría progresivamente más fina hacia el tope. Este sorteamiento es el resultado de la proyección de las partículas

de cenizas a mayor altura, en donde estas permanecen suspendidas mayor tiempo que el material más grueso, pudiendo ser redistribuidas por el viento en distintas direcciones y a diferentes distancias. Los mantos de piroclastos resultantes de sucesivas explosiones carecen de una morfología propia. Esos se extienden amplia e indistintamente sobre relieves volcánicos o de otra índole, ya sea montañosos, colinados, ondulados, planicies, etc.; por lo general, siguen la topografía preexistente, la cual, no obstante, contribuyen a atenuar, comunicándoles cierta redondez a las formas. Esta subunidad representa el 0.92 % de la superficie de estudio (fotografía 5.8).



Fotografía 5.8 Vista con dirección al suroeste del sector de Los Portales, cerca de la Escuela Técnica Superior de la Policía Nacional del Perú, distrito Chiguata; se puede ver la superficie plana conformada por el manto de piroclastos; hacia el fondo se observan colinas de avalancha de escombros.

Colada de lavas (Ca-la)

Esta subunidad configura paisajes de forma de lenguas alargadas, relativamente estrechas y delgadas, con varios lóbulos frontales empinados (frentes de lava). Su altura está en función de la viscosidad y volumen de la lava.

Constituyen episodios de actividad volcánica del sur del Perú de edad Plioceno-Pleistoceno; se encuentran conformadas por secuencias de flujos de lava del Plioceno, flujo de lava

en bloques que forma parte del estratocono Misti 2 y flujo de lava del volcán Chachani localizado en las proximidades de Chiguata. Cubren relieves preexistentes, así como también rellenan valles fluvio-glaciares (fotografía 5.9). En conjunto representan 1.87 % de la superficie total del área de estudio. Es importante destacar que cerca de Chiguata estas coladas de lava se presentan con intervención antropógena, ya que han sido preparadas para desarrollar agricultura a través de la construcción de andenerías.



Fotografía 5.9 Vista hacia el oeste donde se puede ver la colada de lava que bajó del volcán Misti; configura una topografía subhorizontal; en los bordes se forma un acantilado.

Acantilado o frente de colada de lavas (AC-ca)

Esta subunidad corresponde a los acantilados o escarpes con pendientes muy fuertes (45°) que se forman en el frente de las coladas de lavas por efectos de la viscosidad de las lavas y el enfriamiento rápido que experimentan. Se exponen en el flanco sur del volcán Misti y representan el 0.82 % de la superficie estudiada (fotografía 5.9).

Domo y flujos de lava (Dof-v)

Son geoformas con superficies convexas o cóncavas ubicadas en la cima de complejos volcánicos o estratovolcanes y cadenas de montañas de rocas volcánicas formadas por el enfriamiento

de lavas de composición andesítica originadas en el Neógeno-Pleistoceno; se encuentran conformadas por flujos de lava del volcán Chachani y Misti (fotografía 5.10). Esta lava es extruida por un conducto central de forma lenta, con lo cual se comba y extiende a modo de un balón en expansión. Como resultado de este proceso, se forma un cuerpo cupular semejante a un domo que puede ser independiente o estar anidado en la caldera de volcanes más grandes y de distinto tipo. Este tipo de estructuras forman parte del estrato cono del volcán Misti; también, se identificaron en el sector noroeste de la zona de estudio, distrito de Cerro Colorado, estructura que forma parte del volcán Chachani. Representa el 1.35 % del área total estudiada.



Fotografía 5.10 Vista hacia el oeste donde se puede observar el domo y flujo de lava que forma parte de la estructura del volcán Chachani. De los piedemontes coluvio-deluviales acumulados en el frente de los domos se extraen áridos de construcción en la actualidad.

5.3.1.4 Unidad de planicies

Son superficies que no presentan un claro direccionamiento, porque provienen de la denudación de antiguas llanuras agradacionales o del aplanamiento diferencial de anteriores cordilleras. Están determinadas por una acción prolongada de los procesos denudacionales y por la acumulación de material volcánico piroclástico que cubre superficies preexistentes.

Planicie sedimentaria (PI-s)

Esta subunidad se caracteriza por presentar un relieve predominantemente llano, donde los procesos de agradación superan los de degradación (erosión). Se pueden encontrar elevados con respecto de los terrenos circundantes por efectos de la erosión diferencial o por efecto tectónico y presentar ligera inclinación. Está conformada por secuencias de rocas sedimentarias poco consolidadas de la Formación Cuico (gravas, arenas y limos), de edad Pleistoceno. Parte de esta planicie es utilizada actualmente como terreno de cultivo. Representa el 0.42 % de la superficie total estudiada.

Superficie plana ignimbrítica (Sfp)

Conocida también como superficie con flujo piroclástico; esta subunidad es resultante de la depositación de flujos incandescentes de piroclastos (nubes ardientes, flujos de bloques, de pómez, de cenizas) descargados de las calderas masivas de estratovolcanes durante erupciones de tipo vulcaniano y pliniano. Debido a que los flujos de piroclastos se desplazan casi como un líquido, se extienden sobre grandes distancias conformando

capas de varios metros de espesor. Se mueven por gradientes muy bajas y aún fluyen cuesta arriba por cortas distancias. Además, llenan hoyos, depresiones y fluyen alrededor de obstáculos. Cuando se detienen y estabilizan, presentan una superficie plana y regular a pesar de que el terreno preexistente hubiera sido rugoso.

La soldadura o consolidación de las ignimbritas tiene lugar después del emplazamiento, mientras la temperatura es aún alta (unos 600 °C para un depósito de 10-40 m de espesor). La acumulación de flujos piroclásticos sucesivos incandescentes forma altiplanos de ignimbritas. Representan el 3.02 % de la superficie estudiada, de la cual un gran porcentaje ha sido antropogenizado con la ocupación de viviendas y adecuación como terreno de cultivo.

Superficie plana ignimbrítica degradada (Sfp-d)

También, se puede reconocer con el término de superficie con flujo piroclástico disectado; esta subunidad presenta el mismo origen que la superficie con flujos piroclásticos. Ha sufrido los efectos de la denudación y se ha encontrado con un alto grado de disección, cortado por cursos de quebradas y torrenteras que configuran un drenaje paralelo a subparalelo. Esta subunidad se encuentra distribuida principalmente en los distritos de Uchumayo, Tabaya, Sachaca y Cerro Colorado (figura 5.1). Representan el 10.24 % de la superficie de estudio, que a lo largo de los últimos 40 años ha sido objeto de adecuación como terrenos de cultivo.



Figura 5.1 Imagen Google Earth donde se puede observar la superficie plana ignimbrítica degradada en la zona de Cerro Colorado.

Planicie volcanoclástica (P-vc)

Esta superficie horizontal a subhorizontal resulta de la acumulación de cenizas volcánicas y de materiales volcánicos retrabajados, transportados y que son depositados en forma de abanicos; se ubican principalmente en el extremo sur de la zona de estudio; sobre esta subunidad se vienen desarrollando nuevas urbanizaciones de vivienda. Representa el 3.93 % de la superficie estudiada.

5.3.2 Geformas de carácter depositacional y agradacional

Estas geoformas son el resultado del conjunto de procesos geomorfológicos constructivos determinados por fuerzas de desplazamiento y por agentes móviles, como el agua de escorrentía, los glaciares, las corrientes marinas, las mareas y los vientos. Estos tienden a nivelar hacia arriba la superficie de la tierra, mediante el depósito de materiales sólidos resultantes de la denudación de terrenos más elevados. En la zona de estudio se diferenciaron las siguientes unidades y subunidades.

5.3.2.1 Origen gravitacional

Se agrupan las formas de relieve originadas por los procesos de remoción. Se consideran también las acumulaciones de depósitos coluviales asociados a movimientos de masa ubicados a lo largo de vertientes de ríos y quebradas principales que discurren por la ciudad de Arequipa.

Piedemonte coluvial (V-d)

Se forma al pie de acantilados, escarpes y laderas muy empinadas. Hay escasa o nula presencia de suelos y vegetación por la acumulación de fragmentos de roca (entre 50 y 80 %) de variado tamaño (gravas a bloques), resultantes de la meteorización física por gelifracción o termofracción de los materiales que los constituyen. Estos fragmentos, deprendidos de los escarpes, se desplazan en caída libre o rodando cuesta abajo. Van formando aglomeraciones de bloques sueltos que adoptan una forma semicónica. Se los denomina conos cuando se presentan como un depósito único y talud de detritos cuando se presentan como varios conos acomodados de forma sucesiva.

Los materiales coluviales acomodados al pie de acantilados o laderas tienen un ángulo de reposo de 35°, aproximadamente. Por otro lado, cuando los fragmentos presentan tamaños variados, se disponen en un patrón selectivo. Los bloques de mayor tamaño se ubican hacia la base debido a su mayor momento y a su facilidad para rodar. Los fragmentos más pequeños se ubican hacia el ápice del depósito.

Estos depósitos se consideran inestables, ya que no existe cohesión entre sus fragmentos. Por esta razón, es fácil que un sobrepeso (caída de nuevos bloques) produzca deslizamiento de parte de los materiales. Cuando el talud o vertiente de detritos es relativamente antiguo y el clima es propicio, se pueden desarrollar suelo y cobertura vegetal estabilizadora (Villota, 2005).

En el área de estudio, estos depósitos se han reconocido a lo largo del valle del río Chili y las quebradas Venezuela y San Lázaro (fotografía 5.11); están localizados al pie de acantilados. Representan el 0.93 % de la superficie estudiada y parte de estos depósitos ha sido ocupado por viviendas o fueron acondicionados como terrenos de cultivo por medio de la construcción de andenerías.

Cono deluvial (Co-de)

Esta subunidad se forma al pie de acantilados, escarpes y laderas de fuerte pendiente, por acumulación de fragmentos de roca y suelo, resultantes de la meteorización física por gelifracción o termofracción de las rocas; estos materiales sueltos son transportados y depositados por flujos de agua no canalizados o de corto recorrido que se forman en las laderas como resultado de las precipitaciones pluviales; los materiales al depositarse forman un cono de pendiente moderada. Representan el 0.82 % de la superficie evaluada; parte de estos conos se han utilizado como terrenos de cultivo y otros se han utilizado para construir viviendas.

Piedemonte deluvial (V-de)

Esta subunidad está conformada por la asociación de conos y abanicos de origen deluvial que se depositan de forma sucesiva al pie de laderas o acantilados; estas han sido identificadas en el valle del río Chili (fotografía 5.12) y representan el 0.09 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.11 Vista con dirección hacia el este, cerca del sector de Chilina en la margen izquierda del río Chili, donde se puede ver una zona de derrumbes en acantilado volcánico, cuyos bloques y fragmentos de roca configuran un depósito coluvial.



Fotografía 5.12 Vista con dirección hacia el noroeste, se puede observar el piedemonte deluvial acumulado sobre la gruta de la Virgen de Chapi en el valle del río Chili. Estos materiales son usados como áridos para la construcción.

Piedemonte coluvio-deluvial (V-cd)

Son acumulaciones heterogéneas de fragmentos rocosos que se ubican en las laderas de cerros y acantilados por acción de la gravedad en combinación con el agua. Agrupan los flujos y avalanchas de detritos y rocas, así como los desprendimientos de rocas.

Algunos depósitos de este tipo pueden alcanzar grandes volúmenes (de orden de kilómetros cúbicos) y pueden desplazarse hacia grandes distancias. Con frecuencia, las avalanchas son confundidas con depósitos morrénicos (Varnes, 1978).

Esta subunidad representa el 5.19 % de la superficie total evaluada, siendo también modificada por actividad antropógena (fotografía 5.13).



Fotografía 5.13 Vista con dirección hacia el norte, donde se ve la zona encañonada del valle del río Chili, hacia sus márgenes la acumulación de depósitos coluvio-deluvial.

Zona de arranque de derrumbe (ZA-dr)

Dentro de esta subunidad se han agrupado las zonas de arranque de derrumbes, localizados a lo largo de valles que presentan vertientes de fuertes pendientes (ríos Chili, Andamayo, Socabaya y Mollebaya; y las quebradas San Lázaro, Venezuela, entre otras). Representan el 1.17 % de la superficie total evaluada.

Zona de arranque de deslizamiento (ZA-dl)

Esta subunidad está conformada por los planos de falla de deslizamientos, los cuales han podido ser identificados en la escala de trabajo; tienen una escasa superficie que representa tan solo el 0.002 % del total considerado en el estudio.

5.3.2.2 Origen fluvial

Cauce de río (Río)

Se refiere a los cursos de agua que, por lo general, presentan caudales valorables durante todo el año como sucede en los ríos Chili y Andamayo. En el mapa geomorfológico de la ciudad de Arequipa, se cartografió esta subunidad en criterios de escala del mapa, es decir que no se cartografiaron los cauces de dimensiones menores. Representan el 1.08 % del área evaluada.

Llanura de inundación (PI-i)

Son superficies bajas, adyacentes a los fondos de valles principales y al mismo curso fluvial, sujetas a inundaciones recurrentes, ya sean estacionales o excepcionales. Morfológicamente se distinguen como terrenos planos compuestos de material gravo-arenoso con limos, no consolidado y removible con cada subida estacional del caudal del río (fotografía 5.14). Representan el 0.61 % de la superficie estudiada.

Terraza aluvial (T-al)

Es el depósito de materiales no consolidados acumulados por acción de los cursos hídricos. Generalmente presenta pendientes suaves y se ubica de forma adyacente al lecho de los cauces de ríos como Chili, Andamayo y Mollebaya (fotografía 5.15). Está conformado por materiales de diferentes composiciones, tamaños y de geometrías redondeadas.

Es una unidad importante por constituir una evidencia de los pasados eventos de avenidas e inundaciones en la zona; fue posible identificar hasta siete niveles de terrazas aluviales, donde un gran porcentaje de área es usada como terrenos de cultivo. Representan el 2.17 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.14 Vista con dirección al suroeste donde se puede ver la llanura inundable del río Socabaya que es límite entre los distritos de Paucarpata y Sabandía; es posible ver la ubicación de torres de alta tensión dentro de esta zona inundable.



Fotografía 5.15 Vista con dirección al oeste de la margen derecha del río Chili, sector de Vallecito, donde es posible ver hasta tres niveles de terrazas aluviales.

Escarpe o borde de terraza fluvio-aluvial (Es-tfa)

Esta subunidad configura paredes verticales originadas por la incisión de cursos de ríos en terrazas aluviales; estas alcanzan alturas de hasta 5 m en algunos casos, localizados a lo largo de las márgenes del río Chili, las quebradas San Lázaro, Venezuela y Los Incas. Representan el 0.25 % de la superficie estudiada.

Acantilado aluvial (AC-al)

Esta subunidad configura paredes de fuerte pendiente ($>30^\circ$) de más de 5 m de alto, que tienen también su origen en la incisión de cursos de río sobre terrazas aluviales (fotografía 5.16); parte de estas se han acondicionado para la construcción de viviendas y desarrollo de agricultura en andenerías. Representan el 0.07 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.16 Vista con dirección hacia el suroeste donde se puede ver el acantilado aluvial vertical y la planicie aluvial en la margen izquierda del río Chili, sector de Congata, distrito de Uchumayo.

Isla fluvial (I-fl)

Esta subunidad está conformada por las porciones de material fluvial que se localizan entre los brazos de agua que presentan un río anastomosado o trezado; estos tienen su origen en río con gran carga de sedimentos, también en cursos de ríos en

los que disminuye fuertemente la profundidad y la pendiente del cauce (figura 5.17). Estas islas, por lo general, son temporales, porque con los periodos de avenidas estacionales son inundadas y el material que las conformaba son acarreados. Representan el 0.08 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.17 Vista con dirección hacia el noreste donde se puede observar unos promontorios de material aluvio-proluvial erosionados que se constituyen en islas fluviales cuando la quebrada San Lázaro se activa.

Cauce seco de quebrada (Cs-q)

Esta subunidad corresponde a los cursos de quebradas de dimensiones variadas que son resultado de la incisión producida por concentración de escorrentía, que solo tienen caudales de agua durante los periodos de lluvia estacional anual (enero-marzo); estos cauces de quebradas forman parte de los tributarios de los ríos que cruzan la ciudad de Arequipa (fotografía 5.18).

Es importante señalar que los largos periodos de sequía que presentan estas quebradas han hecho que sean fuertemente antropogenizadas; en muchos casos, los cursos de estas quebradas se han desviado, estrechados, cerrados e incluso rellenados para realizar habilitaciones urbanas, así como también se realizan labores agrícolas dentro de estos cauces. Representan el 2.63 % de la superficie evaluada.



Fotografía 5.18 Vista con dirección suroeste donde se puede observar una quebrada seca la cual ha sido antropogenizada, se ha construido una loza deportiva en el mismo cauce, dejándose una alcantarilla para que discurra el agua que se concentra durante los periodos de lluvia.

Planicie aluvial (PI-al)

Dentro de esta subunidad se ha considerado a unos depósitos aluviales extensos que se localizan en las márgenes de los ríos Chili y Mollebaya (fotografía 5.16); estos presentan una superficie plana ligeramente inclinada hacia el valle, que son el resultado de la acumulación de material aluvial, incluso proluvial, los que se encuentran interestratificados. Representan el 0.54 % de la superficie estudiada.

Cono proluvial (Co-pr)

Esta subunidad configura una morfología de cono que se forma por la acumulación de sedimentos, que son acarreados por corrientes de agua de carácter excepcional y que están relacionadas a lluvias ocasionales, extraordinarias y muy excepcionales que se presentan en la región. Estas lluvias

pueden estar asociadas al fenómeno de El Niño. La pendiente de estos depósitos es suave a moderada (1-15°). Representan el 0.25 % de la superficie estudiada.

Piedemonte proluvial (P-at)

Conforman planicies inclinadas a ligeramente inclinadas y extendidas, ubicadas al pie de estribaciones andinas o los sistemas montañosos, formadas por la agrupación de conos proluviales próximos. Están formadas por la acumulación de sedimentos que son acarreados por corrientes de agua de carácter excepcional, relacionadas a lluvias ocasionales, extraordinarias y muy excepcionales, lluvias que pueden estar asociadas a la presencia del fenómeno de El Niño. Las pendientes de estos depósitos son suaves a moderadas (1-15°). Representan el 0.24 % de la superficie estudiada.

Piedemonte proluvio-aluvial (P-pal)

Esta subunidad fue originada por la acumulación de materiales de origen aluvial y proluvial, relacionada a episodios de desbordamientos de quebradas con regímenes de precipitación fuerte, así como a flujo de detritos originados por corrientes excepcionales; fueron formados por la actividad hídrica de las quebradas San Lázaro, Venezuela y Los Incas. Sobre esta subunidad se encuentra asentada gran parte de la ciudad de Arequipa (parte de los distritos de Arequipa, Paucarpata, Mariano Melgar y Miraflores). Representan el 10.88 % de la superficie evaluada.

Terraza proluvio-aluvial (T-pal)

Esta subunidad resulta del depósito de materiales no consolidados, acumulados por acción de los cursos de ríos en periodos de caudal normal (aluvial) y excepcional cuando presenta una gran carga sólida (proluvial). Presentan pendientes suaves y se ubican adyacentes a los cursos de ríos y quebradas; los materiales que la conforman son una interstratificación de gravas, arenas y limos redondeados, y gravas, bloques y bolos envueltos en una matriz fina (fotografía 5.19). Representan el 0.63 de la superficie estudiada.



Fotografía 5.19 Vista con dirección hacia el norte donde se observa la terraza proluvio-aluvial de la quebrada Honda, cerca de la localidad de Chiguata.

Piedemonte glacio-fluvial (P-gfl)

Esta unidad presenta abundantes acumulaciones de sedimentos que bordean zonas montañosas de litología volcánica y sedimentaria asociados a una morfogénesis de origen glacial o periglacial. Su distribución está restringida a altitudes superiores 3000 m s.n.m. La pendiente de estas acumulaciones es normalmente suave a moderada, generando superficies plano-onduladas a levemente inclinadas. Fueron reconocidos en el lado sureste de Chiguata; estos corresponden a depósitos formados con el material acarreado del volcán Pichu Pichu. Representan el 2.24 % del área estudiada.

Isla fluvial intrusiva (Is-i)

Se ha considerado dentro de esta subunidad un pequeño cuerpo intrusivo gabrodiorítico, que la escala de trabajo permitió representar, localizado en el medio del cauce del río Chili en el sector el Huayco, donde el río se estrecha hasta aproximadamente 15 m; este afloramiento intrusivo configura

una pequeña isla en este sector, siendo incluso utilizada como apoyo del puente vehicular que cruza el río Chili en ese punto (fotografía 5.20).

Cárcavas (Car)

Son incisiones como resultado de un proceso erosivo por escorrentía, que generalmente sigue la pendiente máxima del terreno y constituye camino para el agua proveniente de las lluvias. De preferencia se produce en materiales inconsolidados. Los episodios de precipitación y los procesos de meteorización comienzan con canales muy delgados con profundidades pequeñas (de algunos centímetros) que a medida que persiste la erosión, tienden a profundizarse hasta alcanzar decenas de metros. En esas condiciones, la escorrentía formada genera redes de quebradas dendríticas, jerarquizadas con diferentes escalas de magnitud que confluyen en un colector principal. En el área evaluada se ha observado su presencia en casi todas las laderas que rodean a la ciudad de Arequipa (fotografía 5.21). Ocupan el 1.61 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.20 Vista del río Chili donde se puede ver un afloramiento intrusivo gabrodiorítico en medio del cauce a manera de isla, la cual ha sido usada para colocar un pilar del puente que cruza el río.

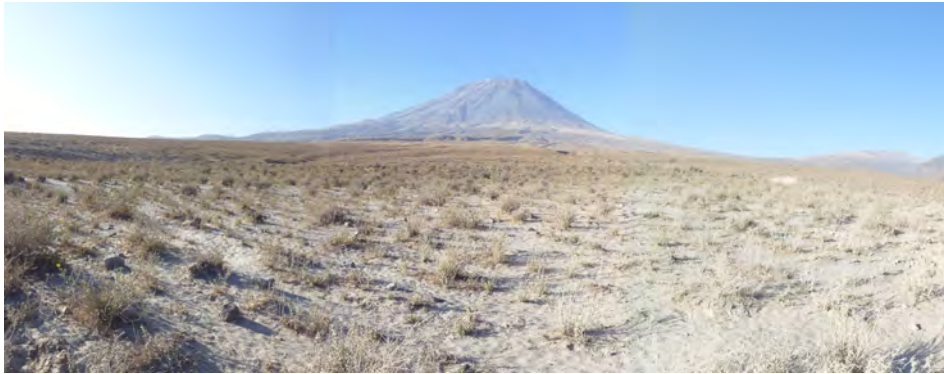


Fotografía 5.21 Vista en la que se puede observar las cárcavas formadas por escorrentía superficial concentrada que corta las ignimbritas rosadas; sector avenida 1 (antigua carretera a Yura), distrito Cerro Colorado.

Piedemonte volcanoclástico disectado (V-vcd)

Es una superficie inclinada de baja pendiente que está ubicada al pie de los volcanes Misti y Chachani, conformada por secuencias volcanoclásticas, resultante de la acumulación de cenizas y

materiales volcánicos reabajados, transportados y que son depositados en forma de abanicos (fotografía 5.22). Parte de esta subunidad viene siendo urbanizada, principalmente en los distritos de Cayma y Cerro Colorado. Abarca el 14.25 % de la superficie de estudio.



Fotografía 5.22 Vista hacia el norte, donde se ve en primer plano el piedemonte volcanoclástico de baja pendiente; hacia el fondo se encuentra el volcán Misti.

5.3.2.3 Origen lacustre

Terraza lacustre (T-lg)

Esta subunidad está representada por terrazas de origen lacustre, principalmente conformada por material fino (lutitas, lutitas limolíticas y diatomita); se encuentra en el lado sur del volcán Misti, en la zona del río Andamayo y Chiguata. Su origen puede estar asociado a la formación de un lago en la zona a consecuencia del represamiento del río Andamayo². Representa el 0.003 % de la superficie evaluada.

Cuenca seca de laguna (Cs-lg)

Esta subunidad está representada por las concavidades o depresiones que se formaron por el emplazamiento de domos volcánicos o por el avance ondulatorio que tuvieron las lavas emitidas por el volcán Chachani; tienen un drenaje endorreico. Estas cuencas almacenan temporalmente el agua asociada a precipitaciones pluviales. Están localizadas en el cerro La Rinconada del distrito Cerro Colorado (figura 5.2). Representa el 0.28 % de la superficie evaluada.



Figura 5.1 Imagen Google Earth donde se puede observar la superficie plana ignimbrítica degradada en la zona de Cerro Colorado.

² El represamiento del río se originó por la avalancha de escombros del volcán Pichu Pichu, que se emplazó con una dirección E-O (Mariño *et al.*, 2016).

5.3.2.4 Origen eólico

Mantos de arena (M-a)

Geoforma conformada por la acumulación de arenas acarreadas y depositadas por el viento a manera de mantos. Específicamente, para la ciudad de Arequipa, estas arenas deben su origen a las cenizas emanadas durante los episodios de actividad volcánica ocurridas en el sur, las cuales al estar

suspendidas en el aire son acarreadas y depositadas por los vientos; estas cenizas cubren terrenos planos a plano ondulados de la planicie ignimbrítica, así como laderas de colinas y montañas, las cuales sirvieron de trampas y favorecieron la acumulación de esta arena (fotografía 5.23). Representan el 0.49 % de la superficie estudiada y se localizan principalmente en el sector sur, cubriendo colinas intrusivas.



Fotografía 5.23 Vista con dirección hacia el sur, en el sector de Tingo Grande, distrito Jacobo Hunter, donde se puede ver las laderas del cerro San Ignacio cubiertas con depósitos eólicos conformados por cenizas volcánicas.

5.3.2.5 Otras formas poligénicas

Piedemonte poligénico colgado (V-polc)

Esta subunidad se encuentra conformada por los restos de un piedemonte que se encuentra colgado sobre laderas de colinas; la génesis de esta geoforma es dudosa, ya que no está bien definido el proceso que la formó, o también porque su origen es mixto o resultado de varios procesos superpuestos. Presenta interstratificación de horizontes conformados por materiales de caídas, aluviales, proluviales, material piroclástico y niveles de materiales producidos en procesos del deslave de la ladera. Representa una muy reducida superficie dentro de la zona de estudio.

Monte isla (Mo-i)

Son remanentes reducidos de cordilleras que configuran cerros aislados o pequeños grupos de cerros de corta longitud; para el caso de la ciudad de Arequipa se encuentran conformados por rocas intrusivas del Cretáceo inferior, tipo tonalitas y dioritas de la Súper Unidad Ilo.

También, se forman los montes islas por procesos de meteorización y erosión desigual en las rocas. Resaltan por su forma y elevación dentro de la planicie que los rodea. Como ejemplo de esta subunidad se tienen los cerros de baja altura que es posible diferenciar dentro de la planicie de los distritos de Cerro Colorado, Sachaca y Tiabaya (fotografía 5.24).



Fotografía 5.24 Vista hacia el sur desde la vía paisajística en el distrito de Jacobo Hunter, donde se puede ver un monte isla de roca intrusiva gabrodiorítica que sobresale a la planicie aluvial antropizada de la margen derecha del río Socabaya.

5.3.2.6 Formas antropogénicas

Incluyen aquellos fenómenos que modifican o alteran de forma importante el desarrollo o manifestación de algunos de los procesos naturales (movimientos de ladera, erosión, inundaciones, procesos de sedimentación asociada, etc.) (Martín-Serrano *et al.*, 2004), así como también aquellos que modifican el paisaje de forma drástica.

Terraza antrópica (T-ant)

Dentro de esta subunidad se han considerado grandes andenerías construidas por el hombre principalmente para adecuar el terreno a la realización de labores agrícolas. Representan el 0.17 % de la superficie de estudio.

Cantera (Cant)

Dentro de esta subunidad se han considerado los límites de actividades de explotación minera a cielo abierto de la que se obtienen áridos para la construcción (fotografía 5.25). Representan el 0.49 % de la superficie estudiada.

Cantera urbanizada (Cant-u)

Esta subunidad que comprende los límites de antiguas explotaciones de áridos los cuales con el tiempo fueron

urbanizados y en la actualidad son habitados. Representan el 0.06 % de la superficie estudiada.

Botadero de desmonte (Bot-d)

Esta subunidad está conformada por los montículos resultantes de la acumulación de material resultante de la demolición de viviendas y de residuos sólidos de actividades de construcción (fotografía 5.26). Estos materiales son acumulados y no son compactados.

Montículo de áridos (Mon-a)

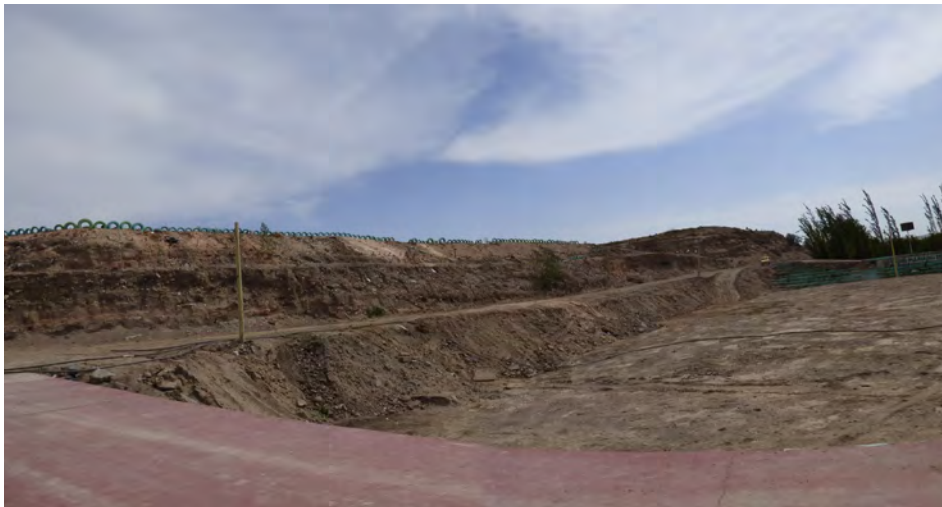
Esta subunidad comprende montículos de acumulación de áridos en canteras que pueden ser representados en la escala de trabajo; su ubicación y dimensiones son temporales, dependiendo del ritmo de trabajo en su extracción y venta final.

Relleno antrópico (Re-ant)

Esta subunidad comprende los materiales dispuestos en laderas, bordes de acantilados y talud inferior de carreteras para acondicionarlos, y que permitan la construcción de viviendas y vías para vehículos (fotografía 5.27). Representan el 0.25 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.25 Vista con dirección hacia el este donde se puede observar una cantera de extracción de áridos ubicado en la margen izquierda del río Chili, distrito de Uchumayo.



Fotografía 5.26 Vista con dirección hacia el sur donde es posible observar un montículo formado por la acumulación de desmonte; también, se está cubriendo un campo deportivo con estos materiales; sector de Huaranguitos, distrito Sachaca.



Fotografía 5.27 Vista con dirección hacia el noreste, aguas arriba de un tributario de la quebrada Gamarra en la Pampa Cura, distrito Cayma, donde se puede ver los rellenos antrópicos de material de desmonte colocados en borde de acantilados.

Plataforma antrópica (Pla-ant)

Esta subunidad comprende plataformas horizontales construidas por el hombre; generalmente consiste en cortes en laderas de colinas y montañas para la explanación del terreno o la construcción de carreteras y vías férreas. Representan el 0.06 % de la superficie evaluada.

Talud artificial (T-art)

Esta subunidad considera los taludes inclinados resultantes de los cortes realizados en el terreno (colinas, montañas, planicies, etc.) por la construcción de carreteras, explotación de canteras

y taludes formados en los bordes de botaderos de desmonte y rellenos en bordes de carreteras. Representan el 0.2 % de la superficie estudiada.

Botadero de basura (Bot-b)

Dentro de esta subunidad se ha considerado los montículos o rellenos resultantes de la acumulación de residuos sólidos domésticos, industriales y médicos; estos materiales son depositados en zonas de planicies, laderas y concavidades del terreno sin ningún tratamiento previo; algunas veces son quemados y posteriormente son cubiertos con tierra (fotografía 5.28). Representan el 0.13 % de la superficie de estudio.



Fotografía 5.28 Vista con dirección hacia el sur, donde se puede ver el botadero de basura localizado al final de la avenida Ecológica en el distrito de Alto Selva Colorada, la basura es acumulada, quemada y cubierta.

Desmorte de cantera de sillar (Dc-s)

Dentro de esta subunidad se han considerado los montículos de material de desmorte que resulta de la explotación de bloques para construcción de viviendas en las canteras de sillar; en algunos casos, esta acumulación de material de desmorte es

de gran volumen, lo depositan dentro de cauces de quebradas, rellenan y cierran los mismos; ejemplo de estos depósitos podemos encontrar en las quebradas Río Seco y Estanquillo del distrito Cerro Colorado (fotografía 5.29). Representan el 0.17 % de la superficie de estudio.



Fotografía 5.29 Vista con dirección hacia el suroeste donde se ve puede observar el cauce de una quebrada seca, la cual ha sido cubierta completamente por el desmorte producto de la extracción de bloques de sillar; distrito Cerro Colorado.

Muro de Tierra (M-t)

Esta subunidad está conformada por la acumulación de material fluvial y aluvial de un río, dispuestos en sus márgenes

como medida de mitigación ante desbordes que produzcan inundaciones; estos se identificaron principalmente a lo largo del curso del río Chili (fotografía 5.30). Representan el 0.023 % de la superficie de estudio.



Fotografía 5.30 Vista con dirección hacia el norte, aguas arriba del río Chili cerca a la confluencia de la quebrada Venezuela, donde se puede ver en el centro de la imagen el muro de encauzamiento formado con la acumulación de material aluvial del mismo cauce del río; distrito de Arequipa.

Muro de encauzamiento de concreto (Mec)

Dentro de esta subunidad se consideró muros de concreto contruidos con el fin de controlar desbordes e inundaciones, localizados principalmente en el valle del río Chili (fotografía 5.31).

Diques transversales de tierra (Diq)

Esta subunidad considera los diques de tierra que son colocados de forma transversal dentro de cauces de quebradas secas y

cárcavas con el fin de habilitar el paso peatonal, vehicular y para la construcción de viviendas. Estos diques transversales de tierra al cerrar el curso natural de las aguas condicionan y favorecen la ocurrencia de inundaciones y desbordes de quebradas secas que se activan en periodos de lluvia extraordinaria. Se presentan generalmente en las zonas de expansión urbana de la ciudad de Arequipa, específicamente en los distritos de Cerro Colorado, Cayma y Alto Selva Alegre (fotografía 5.32).



Fotografía 5.31 Vista con dirección hacia el suroeste, donde se puede observar un dique de concreto y mampostería colocada para encauzar el río Chili y proteger terrenos de cultivo de la margen derecha; distrito de Sachaca.



Fotografía 5.32 Vista con dirección hacia el norte, donde se puede observar el cauce de una quebrada seca obstruida con un dique de tierra, localizado en las nuevas zonas expansión urbana del distrito Cayma.

Cauce de quebrada cubierto (C-qc)

Dentro de esta subunidad se han considerado los tramos de quebradas que cruzan la ciudad de Arequipa, los cuales han sido cubiertos con lozas de concreto (techados) para utilizar el espacio ganado como estacionamiento para vehículos, desarrollo de centros de comercio y la construcción de viviendas. Se los encuentra principalmente a lo largo de la quebrada Venezuela y cerca de la confluencia de la quebrada Los Incas en el río Chili (fotografía 5.33).

Canal o curso antrópico (C-ant)

Se agrupa en esta subunidad las obras de ingeniería hidráulica de tipo canales de agua de gran dimensión y que son cartografiables a la escala de trabajo; estos canales fueron construidos con el fin de derivar o cambiar la dirección del curso de quebradas secas (fotografía 5.34). Representan el 0.02 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.33 Vista con dirección hacia el norte, donde se puede observar un tramo de la quebrada El Chullo cubierto por construcción de viviendas; cruce de la quebrada con la avenida Ejercito, en el límite de los distritos Cayma y Cerro Colorado.



Fotografía 5.34 Vista hacia el sureste, se aprecia el cauce desviado y encauzado con muros de gaviones de un tributario de la quebrada Venezuela, en la urbanización Alameda de Salaverry, distrito Miraflores.

Reservorio de agua (R-a)

Dentro de esta subunidad se reúnen todos los cuerpos de agua de origen artificial (represamientos), los cuales tienen dimensiones representables a la escala de trabajo.

Piedemonte poligénico antropizado (V-pola)

Esta subunidad se encuentra conformada por un piedemonte cuya génesis es dudosa, ya que no está bien definido el proceso que la formó; también, porque su origen es mixto o resultado de varios procesos superpuestos. En la zona de estudio se presenta interstratificación de horizontes conformados por materiales aluviales, proluviales y material piroclástico. Representan el 0.92 % de superficie de estudio.

Terraza ignimbrítica antropizada (T-ig-ant)

Es una subunidad en la que se han agrupado diferentes niveles de depósitos de ignimbritas que han sido adecuadas como terrazas para realizar labores agrícolas. Estas se han diferenciado en ambos márgenes del valle del río Chili, entre las localidades del Santuario de Chapi y Chilina (fotografía 5.35). Se han diferenciado hasta cuatro niveles de esta terraza, las que representan el 0.13 % de la superficie de estudio.

Colinas bajas antropizadas (Cb-ant)

Dentro de esta subunidad se han considerado geformas residuales resultantes de la erosión del piedemonte proluvio-aluvial, que configuró un terreno ondulado a manera de colinas bajas, las cuales han sido objeto de procesos de urbanización y construcción de viviendas. Representan el 1.48 % de la superficie estudiada.



Fotografía 5.35 Vista con dirección hacia el sur donde se puede observar la margen izquierda del río Chili conformada por terrazas ignimbríticas en varios niveles; Chilina y el santuario de Chapi.

CAPÍTULO VI

PELIGROS NATURALES

6.1 GENERALIDADES

Según datos estadísticos, los peligros naturales desde 1970 han causado la muerte de 3 300 millones de personas en el mundo, haciendo una cifra de 82 500 muertes al año, con grandes fluctuaciones de año a año y sin tendencias temporales pronunciadas. Las sequías son las más mortales de las cuatro categorías de peligros naturales (terremotos, inundaciones y tormentas son las otras) (Banco Mundial, 2011). Se presume que los movimientos en masa están inmersos dentro de estas estadísticas como peligros detonados por terremotos y tormentas. La ausencia de una tendencia alcista del número de muertos causados por peligros naturales, a pesar de que la exposición a los peligros crece, sugiere que se viene desarrollando en los países un trabajo de prevención efectiva.

Los daños a la propiedad derivados de todo tipo de peligros naturales entre 1970 y 2008 alcanzaron los 2300 billones de dólares (en dólares del 2008). Estos daños son variables en función de los peligros naturales, siendo los terremotos y las tormentas los que ocasionan mayores daños³. Asimismo, los daños son desproporcionadamente más elevados en países de renta media; los países pobres con pocos activos incurrir en un daño escaso y en los países ricos (con más capital) se previenen los daños de forma efectiva (Banco Mundial, 2011).

En los últimos decenios del siglo XX, se han producido episodios naturales de rango extraordinario de consecuencias funestas para la población mundial. Se ha creado la impresión de una mayor ocurrencia de eventos excepcionales, cuando lo que realmente ocurre ha sido el incremento de la exposición de las poblaciones del mundo a los peligros naturales. Los umbrales de tolerancia ante los riesgos de la naturaleza han disminuido por el propio crecimiento de la población mundial y la ocupación intensiva del territorio (Ayala *et al.*, 2002).

En este contexto es comprensible la necesidad de contar con información que permita realizar trabajos de prevención, y estos trabajos se inician con la identificación y estudio de los peligros naturales. Para nuestro caso: los peligros derivados de los movimientos en masa y los peligros geohidrológicos (inundaciones y erosión fluvial).

La prevención es importante, pero no es necesario pagar siempre más por la prevención. Una medida relativamente fácil y efectiva es que los gobiernos difundan de forma fácilmente accesible la información sobre los riesgos y los peligros –como mapas de llanuras que pueden inundarse o fallas sísmicas– (Banco Mundial, 2011). Kofi Annan, Secretario General de las Naciones Unidas (ONU) en 1999, dice en la memoria sobre la labor de la ONU que la adopción de estrategias de prevención eficaces no solo permitirá ahorrar miles de millones de dólares, sino también salvar cientos de millones de vidas. También, reconocía que promover una cultura de prevención no es fácil; sus costos deben pagarse en el presente, en tanto que sus beneficios se verán en el futuro (Ayala *et al.*, 2002).

En nuestro país el estudio y monitoreo de los peligros naturales es realizado por varias instituciones, las cuales integran el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SINAGERD); este sistema tiene entre sus objetivos principales “la identificación de los peligros, el análisis de las vulnerabilidades y el establecimiento de los niveles de riesgo para la toma de decisiones oportunas en la gestión del riesgo de desastres (GRD)”. Es en este contexto que Ingemmet con la información propia generada en los últimos años, y con apoyo en información sísmica y meteorológica que proveen otras instituciones, elabora estudios que buscan identificar, estudiar y monitorear los peligros geológicos con el fin último de prevención y gestión del riesgo de desastres ocasionados por peligros geológicos.

La información contenida en este capítulo se basa en la recopilación de información de peligros existente en la bibliografía (informes técnicos, boletines, tesis, etc.), así como información tomada en campo, basada específicamente en un inventario de peligros geológicos de movimientos en masa, peligros geohidrológicos (inundaciones y erosión fluvial), otros peligros geológicos y el cartografiado geodinámico respectivo a escala 1:5 000, sobre una base topográfica elaborada a partir de imágenes satelitales WorldView y Geo Eye de alta resolución, con la ayuda de fotografías aéreas e imágenes satelitales.

³ Los efectos secundarios de los terremotos y tormentas causan grandes daños (tsunamis, licuefacción de suelos y movimientos en masa) en el relieve terrestre.

La información temática sobre peligros generada en este estudio, como en la cartografía básica para cualquier análisis integral del medio físico en la región, está expresada en términos de susceptibilidad a movimientos en masa e inundaciones fluviales y la definición de zonas críticas.

6.2 PELIGRO/AMENAZA

Antes de introducirnos en el estudio de los peligros originados por movimientos en masa, por fenómenos geohidrológicos (inundaciones y erosión de riberas) y de los denominados otros peligros (erosión de laderas), es necesario conocer los conceptos siguientes:

Un *peligro o amenaza* es “un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009). Los peligros incluyen condiciones latentes que pueden materializarse en el futuro. Pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrometeorológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas)”.

Se define como peligro a la probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico con cierta intensidad, y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos (Perú. Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres, 2016).

Peligro/amenaza natural es “un proceso natural que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009). Este término se utiliza para describir eventos relacionados con amenazas existentes, al igual que condiciones latentes, que podrían ocasionar el surgimiento de acontecimientos futuros. Los peligros naturales se pueden caracterizar por su magnitud o intensidad, su velocidad en un principio, la duración y el área que abarcan.

Peligro/amenaza geológica es “un proceso o fenómeno geológico que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales” (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009). Los peligros geológicos incluyen procesos terrestres internos (terremotos, actividad volcánica) y procesos terrestres externos afines como el de movimientos en masas. Los factores hidrometeorológicos son elementos que contribuyen considerablemente en alguno de estos procesos.

6.3 REGISTRO DE EVENTOS PRODUCIDOS EN LA CIUDAD DE AREQUIPA

Todo análisis de peligros en cualquier ámbito o espacio geográfico requiere un conocimiento previo de los eventos peligrosos o desastres ocurridos en el pasado. La cronología de procesos geológicos e hidrometeorológicos de gran magnitud son los más importantes; sin embargo, también resultan importantes conocer eventos pequeños sobre todo aquellos de recurrencia periódica.

La ciudad de Arequipa, por sus características físicas, geográficas y climáticas, se encuentra expuesta constantemente a una serie de peligros naturales. El presente trabajo se centra en la labor de identificación y estudio de los peligros geológicos por movimientos de ladera o movimientos en masa, los peligros geohidrológicos (inundaciones y erosión de riberas) y los que aquí se denominan como “otros peligros” (erosión de laderas).

La ciudad de Arequipa es considerada muy vulnerable ante la ocurrencia de peligros geológicos (flujos) y geohidrológicos (avenidas e inundaciones), y sismos y amenaza de erupción por el volcán Misti. Los primeros se deben a su ubicación en la cuenca hidrográfica del río Chili, la cual presenta alto escurrimiento superficial y gran densidad de drenaje, parámetros que se reflejan en épocas de intensas precipitaciones (Oliver-Smith, 1994; Cruz, 2007). A lo largo de su historia la ciudad de Arequipa ha sido afectada muchas veces por fuertes lluvias, las que causaron serias pérdidas materiales y pérdida de vidas humanas.

La información de ocurrencias de peligros por movimientos en masa (disponible en los archivos técnicos del Ingemmet, en los compendios estadísticos de emergencias del Indeci, tesis e información de medio de prensa) permitió elaborar el cuadro 6.1, donde se presentan de forma resumida los eventos que afectaron a diferentes sectores de la ciudad registrados entre los años 1893 y 2019, así como los daños que estos ocasionaron. Para los datos obtenidos de informes técnicos elaborados por el Ingemmet, se debe tener presente que estos eventos involucraron volúmenes variables de material desplazado, y si cuentan con un registro de fecha, es porque representaron un alto peligro en el momento que se produjeron, lo que implicó que se realice una evaluación puntual a cada uno de ellos.

Es importante señalar que dentro del área de estudio que comprende la ciudad de Arequipa se han identificado un gran número de eventos por medio de la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución; eventos que no han ingresado en el conteo estadístico de ocurrencias, pero que pueden ser visualizados en el mapa de procesos activos (figura 6.1). Algunos de estos se encuentran activos y pueden afectar de diferente grado a poblaciones, carreteras, terrenos de cultivo y obras de ingeniería, o pueden ser el origen de procesos más grandes que pueden afectar en zonas distales de su ubicación.

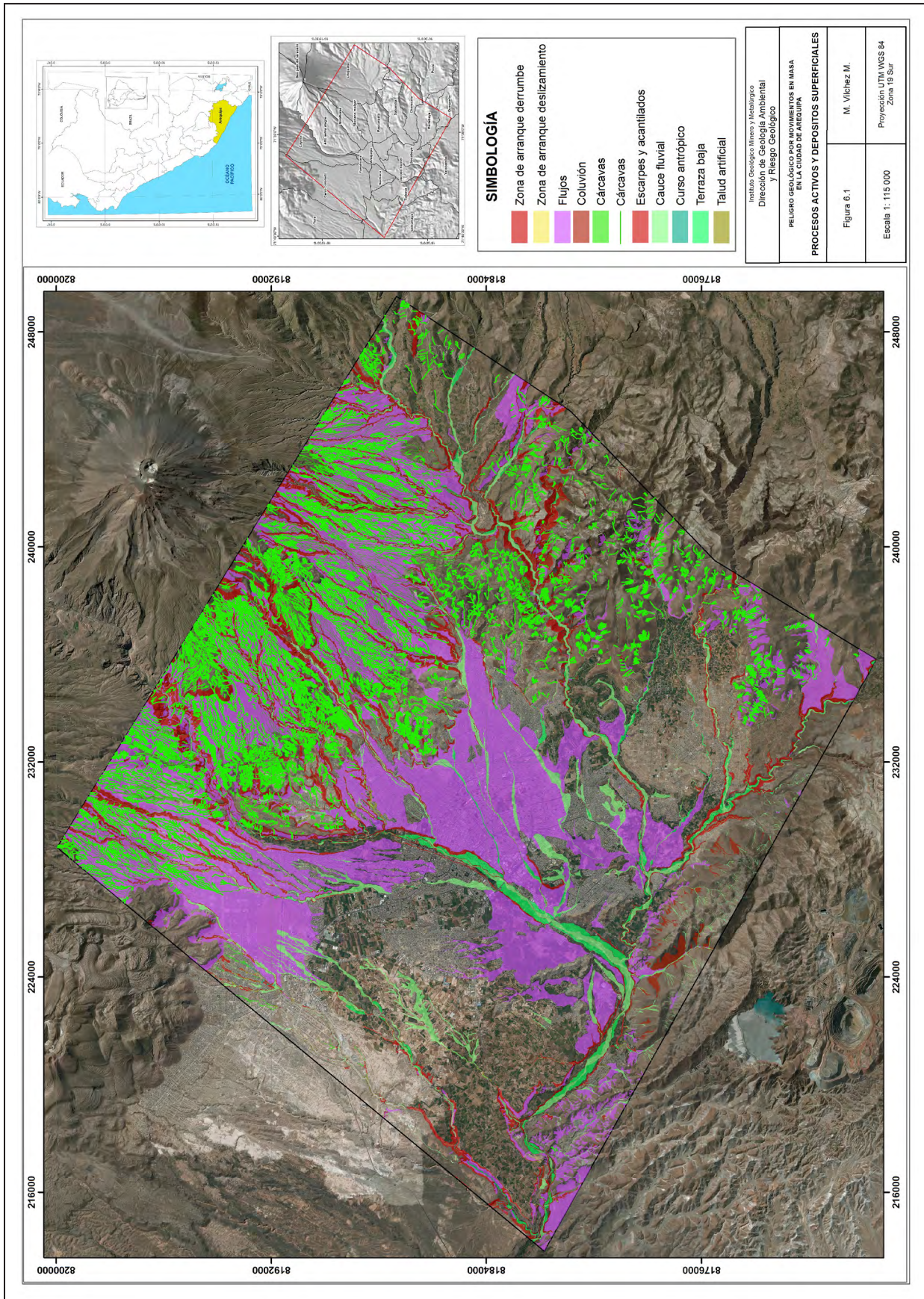


Figura 6.1 Procesos activos y depósitos superficiales.

Cuadro 6.1
Cronología de peligros geológicos ocurridos en la ciudad de Arequipa

Fecha	Evento
1893	Aluvión
14/02/1911	Inundaciones en viviendas de la ciudad de Arequipa.
31/01/1925	Inundaciones y flujos de detritos (quebradas El Chullo, San Lázaro, Primera, Segunda y Tercera), ciudad declarada en emergencia.
13/02/1925	Río arrastra puente de Sabandía, 08 personas muertas, vía del ferrocarril destruida.
21/02/1932	Se activaron torrenteras que inundaron la ciudad de Arequipa.
28/02/1935	Inundación en Huasacache, por entrada de torrentera del lugar.
18/01/1939	Intensa precipitación pluvial trajo como consecuencia la fuerte entrada de torrenteras.
04/01/1942	Inundaciones en las partes bajas de la ciudad. La torrentera de San Lázaro destruyó el puente ubicado a un costado del "Parque Selva Alegre". Ingresó por las torrenteras primera y segunda.
16/02/1943	Fuerte entrada de las torrenteras, la quebrada San Lázaro se desbordó a la altura del puente Arnao, Goyeneche. Se declara en emergencia ciudad de Arequipa.
10/02/1944	Fuertes lluvias activaron quebradas, desbordándose en varios puntos de la ciudad; inundó un colegio y la urbanización María Isabel.
02/02/1946	Ingreso de la quebrada El Chullo inundó viviendas y terrenos de cultivo.
23/03/1949	Entrada de torrenteras por fuertes lluvias, en el noreste de la ciudad.
02/02/1953	Inundaciones y flujo de lodo tras fuertes lluvias (14.5 mm; estación Córpac), que activó la quebrada El Chullo.
05/03/1954	Lluvia intensa originó el ingreso de las quebradas San Lázaro, Primera y Segunda. Produjo cuantiosos daños materiales.
13/01/1955	Ingreso de la Cuarta Torrentera, ocasionó destrozos; cortó canales de regadío, interrumpió fluido eléctrico.
20/01/1959	Se activo la quebrada El Chullo y causo inundaciones.
1961	(24/01): La primera torrentera hizo su ingreso, también las quebradas de Mariano Melgar y Miraflores. (29/01): Quebrada San Lázaro, ingresó y cortó el acceso entre Miraflores y Alto Selva Alegre (Av. Progreso). (16/02): Vuelve ingresar la primera torrentera inundando las partes bajas la urbanización María Isabel.
1967	(02/02): Se activaron las torrenteras que arrasaron barrios e inundaron casas de la zona baja de la ciudad. (09/02): Caída de un huaico en el lecho del río Chili, cortó el suministro de agua en la Planta n° 4 de la Central Eléctrica, dejando a oscuras la ciudad. (11/02): Ingreso de torrenteras.
1972	(04/01): Tercera torrentera (Dolores) afecta terrenos de cultivo en Paucarpata. (05/02): Desborde de quebradas ocasionó graves daños, en especial la de San Lázaro que cargó a una altura de 8 m, al inundarse los cauces invadidos por viviendas en la zona de Alto Selva Alegre. (11/01): Todas las quebradas se activaron, la quebrada El Chullo se desbordó en el segundo puente de la urbanización Primavera (Humacollo). La quebrada San Lázaro arrasó con viviendas ubicadas cerca de su cauce (200 familias damnificadas). Primera torrentera (Av. Venezuela) se desbordó; la segunda torrentera ingresa y corta el paso de peatones y vehículos. (06/03): La torrentera Grande arrastró un vehículo, dejando 01 persona muerta.
1973	(09/01): Ingreso de la segunda torrentera causó inundaciones. (10/01): Destruyó una granja lo que ocasionó que se ahogaran 5000 pollos. (11/01): Segunda torrentera se activa y pone en peligro los pueblos jóvenes 15 de Agosto y Jorge Chávez. (12/01): Todas las quebradas se activan y destruyen varias viviendas. (08/02): Las fuertes lluvias afectaron riberas del río Chili, arrasó viviendas y vehículos. La quebrada San Lázaro cargó nuevamente.
1974	(29/01) Ingresó la segunda torrentera, afectó las viviendas que estaban asentadas en sus márgenes. (01/02): Todas las torrenteras ingresan causando daños cuantiosos en los distritos de Mariano Melgar y Miraflores.

Continuación...

Fecha	Evento
04/03/1975	Debido a lluvias intensas, todas las torrenteras inundaron y derrumbaron viviendas que se ubican cerca a los cauces, 12 personas murieron.
1976	(22, 23 y 24/01): Entrada de torrenteras originaron inundaciones y derrumbes en varios pueblos jóvenes; cuantiosos daños en los distritos de Miraflores y Mariano Melgar.
1977	(20/02): Ingresa la torrentera El Chullo e inundó terrenos de cultivo y viviendas en Humacollo, Señor de La Caña y Tahuaycasi. Zonas destinadas a urbanizarse fueron invadidas con lodo. (12/03): Ingreso de la segunda Torrentera destruyó 60 viviendas. Pueblo Joven 9 de Octubre fue el más perjudicado, murieron 02 personas. Torrentera El Chullo volvió a ingresar sin causar daños mayores.
21/01/1986	Desborde del río Chili inundó 100 hectáreas de cultivos. Pérdidas cuantiosas en el agro. Se inunda la parte baja de la ciudad.
1989	(03 y 05/02): Desbordes del río Chili. (08/02): Lluvia intensa (37.7 mm/h) (110 l/m ²), medidas en la Estación Characato y la Estación de Pampa de Arrieros, respectivamente; ocasionó que todas las torrenteras hicieran su ingreso, causando que el caudal del río Chili aumente considerablemente su volumen y debido a algunos obstáculos que existían en su cauce se produjo la inundación del Barrio Obrero. Los pobladores perdieron todas sus pertenencias materiales. En el sector de Chilina, la entrada de una torrentera cobró una vida; el canal de la Tomilla fue rellenado por material, lo que ocasionó que toda la ciudad estuviera sin servicio de agua durante 20 días; la red de desagües en su mayoría se averió. Dique en el puente bajo Grau impidió el paso de lodo y causó el desborde hacia el barrio Obrero n° 1, La Cabezona, Las Curtiembres de la zona, el Pasaje del Solar, Quinta Salas, Vallecito y otros aledaños a la avenida La Marina.
1997	(25/01): Inundación en el sector de Uchumayo dejó 02 personas muertas y varios daños materiales. (25/02): Debido a las lluvias intensas se produce el desborde de las torrenteras San Lázaro, Miraflores, Paucarpata y Mariano Melgar que afectaron Alto Selva Alegre, P. J. Ciudad Blanca – Comité y Cercado de Arequipa. Dejó 05 muertos y muchos daños.
1999	(01/03): Lluvias intensas generan inundaciones en varios sectores de los distritos de Paucarpata, Alto Selva Alegre y Pocsí, que afectó 61 viviendas. Aumento del caudal del río Yarabamba por lluvias intensas produce la inundación de la ciudad. Afectó 75 viviendas. (11/03): Inundaciones en el distrito de Mollebaya. (18/03): Por fuertes precipitaciones, el pueblo joven Fernando Belaúnde, del distrito Quequeña fue inundado; el saldo fue de 10 viviendas afectadas.
2000	(18/01): Lluvias intensas causaron inundación de asentamientos humanos El Mirador, Pueblo Libre, Los Ángeles y Villa María del Triunfo (distrito Mariano Melgar). Inundación por fuertes lluvias en Asentamientos Humanos del distrito Alto Selva Alegre. (20/01): Viviendas inundadas por lluvias en el distrito de Paucarpata. (24/01): Lluvias intensas en la zona alta de Arequipa, activaron la Segunda torrentera que causó daños materiales en el distrito Hunter. (04/02): Se activó la segunda torrentera causando daños en viviendas y el puente del distrito Characato.
2001	(15/02): Lluvias intensas en distritos de José Luis Bustamante y Rivero, dejaron cuantiosos daños en viviendas afectadas. (16/03): Lluvia intensa en el distrito Characato. (19/03): Lluvias intensas causaron inundaciones en Cayma, Paucarpata, Socabaya, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero; y Mariano Melgar. Se produjo un huaico en el sector de Uchumayo. (20/03): Inundaciones en Alto Selva Alegre y Arequipa.
26/07/2002	Inundación en el distrito de Alto Selva Alegre.
09/01/2008	Lluvias intensas en los distritos de Alto Selva Alegre, Cayma, Hunter y Mariano Melgar.
2012	(01/01): Lluvias fuertes en el distrito Alto Selva Alegre. (06/01): Huaico en el distrito de Tiabaya. (08/02): Crecida de río en el distrito de Socabaya. (12/02): Llovió 130 l/m ² , por encima del promedio de 30 l/m ² , generándose inundaciones que produjeron grandes pérdidas. (24/02): Crecida de río en el distrito de Yanahuara.

Fecha	Evento
08/02/2013	En Arequipa, el viernes 8 de febrero se registró el valor de 124.5 l/m ² ; se originó como resultado de lluvias intensas, que se concentraron en las cabeceras de las torrenteras San Lázaro, Venezuela y Los Incas. El material fue arrastrado pendiente abajo a manera de flujo de detritos por estas torrenteras tras 4 horas de intensas precipitaciones pluviales, según el registro de precipitaciones del SENAMHI. Estos flujos afectaron pistas, viviendas, infraestructura pública y privada, además de ocasionar la muerte de personas.
2015	(01/02): Inundación en Arequipa después de 6 horas de lluvia. Colapso de drenajes en el distrito Hunter, se inundaron viviendas. En La Curva (Balneario de Jesús) distrito de Paucarpata también ingresaron caudales en las torrenteras. En Villa Continental y Buenos Aires en Cayma se produjo el ingreso de una torrentera. Desbordes de ríos en los distritos de Mariano Melgar, Chiguata y Yarabamba.
2016	(31/01): Lluvia intensa en el distrito de Yanahuara. (16/02): Zona de Santa Isabel II, en Cerro Colorado, un huaico arrasó viviendas construidas en una torrentera. (22/02): Flujo de detritos en el sector de Buenavista-Yanahuara, vías destruidas en Alto Caima. (25/02): Flujo de detritos en Characato. (26/02): Lluvia 30 mm, inundaciones en los distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, Alto Selva Alegre, Cayma y Yanahuara (50 casas afectadas y 10 declaradas inhabitables).
2017	(13/01): Viviendas afectadas en Cayma; en Cerro Colorado solo fueron afectadas las vías. En Alto Selva Alegre fueron afectados los sectores de Villa Ecológica, Independencia y Las Gardenias; 150 viviendas afectadas por los huaicos. (26/01): Huaico en la variante de Uchumayo dejó 03 personas muertas. (30/01): 01 muerto y 02 heridos en Paucarpata afectado por huaico.
2018	(16/02): Huaico en la quebrada Añashuyco en Cerro Colorado, dejó 01 persona muerta. También se produjeron daños en Cayma, donde se afectaron vías del sector de Villa Continental, calles Pioneros, Embajada Japón, Charcani y Canteras. Viviendas destruidas en la Asociación Goyeneche, 20 viviendas afectadas. En Sachaca se produjeron daños en la vía Fernandini. Se activaron quebradas de Yura, Cerro Colorado, Cayma y Yanahuara. Activación de quebradas El Chullo (Yanahuara), Añashuyco (Cerro Colorado), El Palomar (Venezuela), Mi Perú (Paucarpata - José Luis Bustamante y Rivero) y San Lázaro (Alto Selva Alegre - Cercado).
2019	(27/01) 2 viviendas destruidas en ciudad de Arequipa; inundación pluvial en avenida Pizarro del distrito de José Luis Bustamante y Rivero. Torrenteras de los distritos de Mariano Melgar y Sachaca se activaron. (05/02) 01 muerto a consecuencia del huaico que bajó por la torrentera del badén en Paucarpata. Huaicos discurrieron por la tercera torrentera sobre los distritos de Paucarpata y José Luis Bustamante y Rivero; también se activó la torrentera Los Incas.

Fuente: Elaboración propia con datos de Cornejo, J., 1990; Rojas, R., 1978; Valdivia, V., 1978; INDECI, PREDES, diario Correo.

6.4 MOVIMIENTOS EN MASA

Los movimientos en masa constituyen los procesos geológicos que involucran desplazamiento o remoción de masas rocosas (fracturadas y/o meteorizadas), depósitos inconsolidados, o ambos por efecto de la gravedad. Su ocurrencia en la región está estrechamente ligada a intensas lluvias, sismos y modificaciones antrópicas (factores detonantes). También, responde a factores condicionantes o intrínsecos, tales como la litología, pendiente, morfología, cobertura vegetal, etc.

Cruden (1991) define los movimientos en masa como todos aquellos movimientos de ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. En la literatura

inglesa se utiliza el término *landslides* para referirse a los movimientos en masa. Así, *landslides* describe una variedad amplia de procesos que causan el movimiento hacia abajo y hacia afuera de materiales que forman la ladera, incluyendo roca, suelos y relleno artificial, o una combinación de estos.

Los movimientos en masa identificados en la ciudad de Arequipa se han descrito utilizando la clasificación de movimientos en masa adoptada por el Grupo de Estandarización de Movimientos en Masa (GEMMA) del Proyecto Multinacional Andino-Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA, 2007). Asimismo, se diferencian procesos activos y antiguos⁴ (algunos reactivados). Los tipos más comunes de movimientos en masa son descritos a continuación:

⁴ En la estimación de la edad de los movimientos en masa, se emplean las cuatro categorías para edad, sugerida por McCalpin (1984). Estas son 1) Activo (con récord histórico: < 140 años), 2) Inactivo (joven: 140-5000 años), 3) Inactivo (maduro: 5000 a 10 000 años) y 4) Inactivo (viejo: antiguo > 10 000 años). Esta clasificación puede aplicarse a otros peligros con inferencia y criterio subjetivo.

Caídas (Fall)

La caída es un tipo de movimiento en masa en el que uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera sin que, a lo largo de esta superficie, ocurra un desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido el material cae desplazándose principalmente por el aire, lo que ocasiona golpes, rebotes y rodamiento (Varnes, 1978) (figura 6.2). Dependiendo del material desprendido se trata de una caída de roca o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996), es decir, con velocidades mayores a 5×10^1 mm/s.

En función al mecanismo principal y la morfología de las zonas afectadas por el movimiento, así como del material involucrado, las caídas se subdividen en 3 tipos principales: aludes, caída de rocas y derrumbes.

- Aludes. Son desprendimientos violentos de un frente glaciar (hielo/nieve) que acompañan algunas veces el substrato

rocoso y/o fragmento detrítico (morrenas), que ocurren en áreas de montañas glaciares.

- Caída o desprendimiento de rocas. Ocurre en laderas de montañas y colinas de moderada a fuerte pendiente, frentes rocosos escarpados, montañas estructurales asociadas a litologías de diferente naturaleza (sedimentarias, ígneas y metamórficas), sujetas a fuerte fracturamiento, así como en taludes al efectuarse cortes en laderas para obras civiles (carreteras y canales) (figura 6.3).
- Derrumbes. Son desprendimientos de masas de roca, suelo o ambas, a lo largo de superficies irregulares de arranque o desplome como una sola unidad, desde pocos metros hasta decenas y centenas de metros. Se presentan a lo largo de taludes de corte realizados en laderas de montaña de moderada a fuerte pendiente, con afloramientos fracturados y alterados de rocas sedimentarias, esquistos y depósitos poco consolidados. También se presentan en rocas ígneas fracturadas.

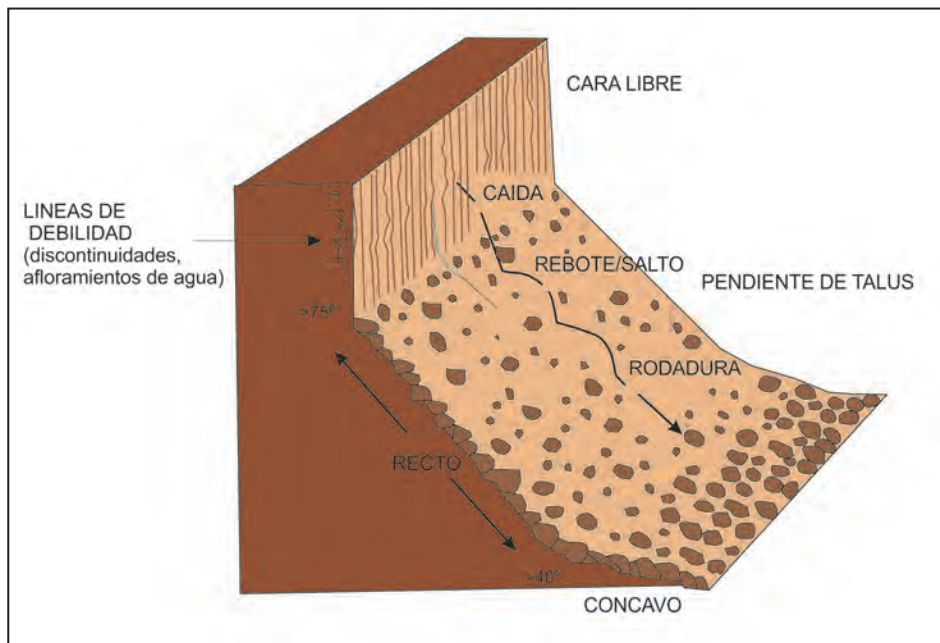


Figura 6.2 Tipo de movimientos seguidos por un bloque caído desde un talud o ladera.

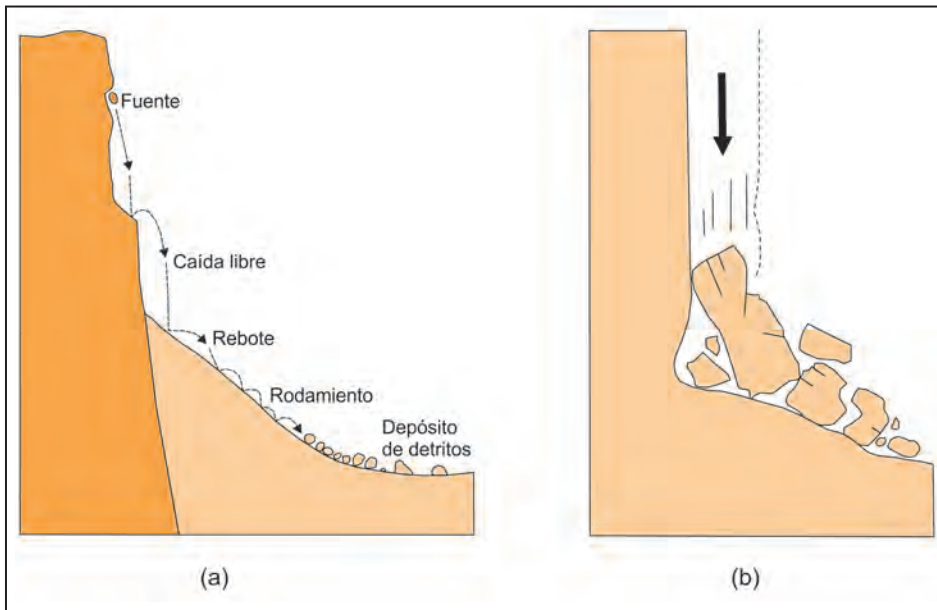


Figura 6.3 (a) esquema de la caída de rocas; (b) Corominas y García Yagué (1997) denominan a este movimiento colapso (derrumbe).

Vuelco (*Toppling*)

Este tipo de movimiento en masa tiene una rotación, generalmente, hacia delante de uno o varios bloques de roca o

suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior (figura 6.4). Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empuje de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978).

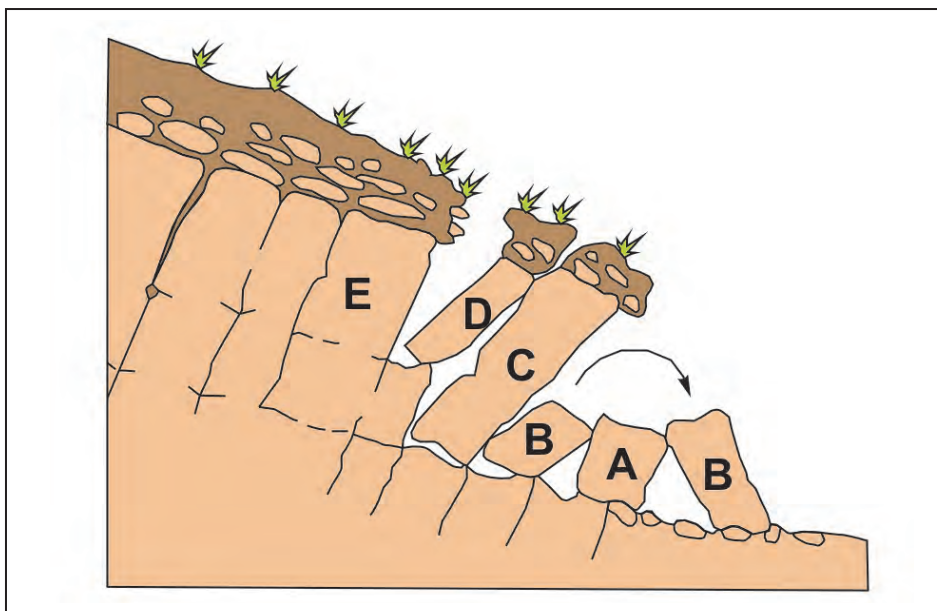


Figura 6.4 Esquema del vuelco en bloques.
Fuente: De Freitas y Waters, 1973.

Deslizamiento (*Slide*)

Es un movimiento, ladera abajo, de una masa de suelo o roca cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o de una delgada zona en donde ocurre una gran deformación cortante. Varnes (1978) clasifica los deslizamientos según la forma de la superficie de falla por la cual se desplaza el material: traslacionales y rotacionales. Los deslizamientos traslacionales, a su vez, pueden ser planares y/o en cuña.

Deslizamiento traslacional (*Translational slide*), deslizamiento en cuña (*Wedge slide*). La masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo

residual o transportado que yace sobre ella (Cruden & Varnes, 1996) (figuras 6.5 y 6.6). En un macizo rocoso, este mecanismo de falla ocurre cuando una discontinuidad geológica tiene una dirección aproximadamente paralela a la de la cara del talud y buza hacia esta con un ángulo mayor que el ángulo de fricción (Hoek & Bray, 1981).

En los casos en que la traslación se realiza a través de un solo plano, se denomina deslizamiento planar (Hoek & Bray, 1981). El deslizamiento en cuña (*wedge slide*) es un tipo de movimiento en el que el cuerpo del deslizamiento está delimitado por 2 planos de discontinuidad que se interceptan entre sí e intersectan la cara de la ladera o talud. Así el cuerpo se desplaza bien siguiendo la dirección de la línea de intersección de ambos planos o el buzamiento de uno de ellos.

La velocidad de los deslizamientos puede variar desde rápida a extremadamente rápida.

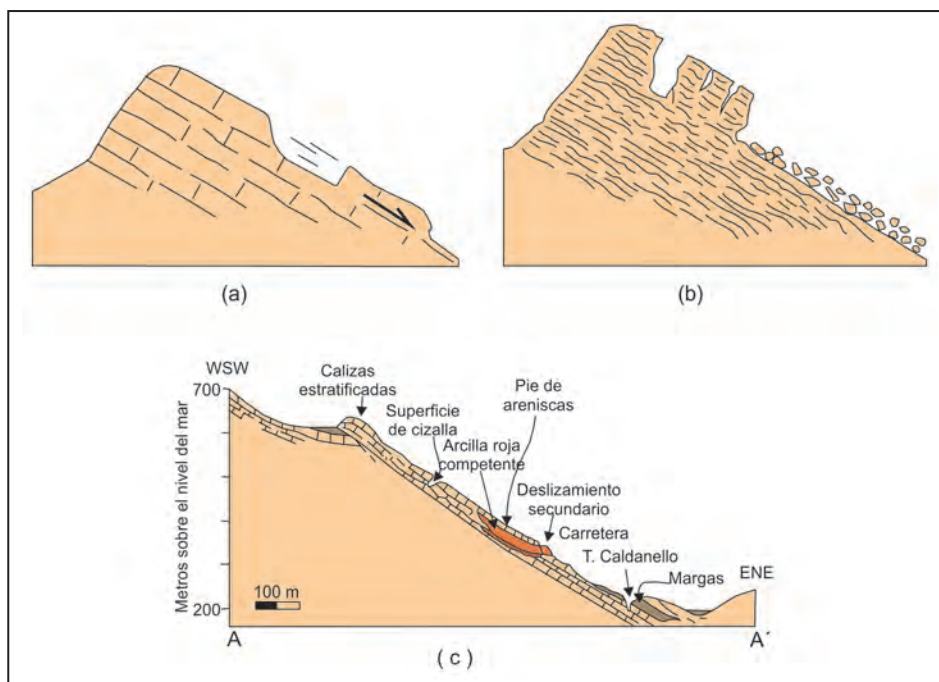


Figura 6.5 (a) y (b) esquema de un deslizamiento traslacional, llamado resbalamiento y corrimiento según Corominas y García Yagué (1997); (c) esquema de un deslizamiento traslacional en roca en Cerchiaría di Calabria, sur de Italia, según Antronico *et al.* (1993), en Dikau *et al.* (1996) (Tomado de Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).

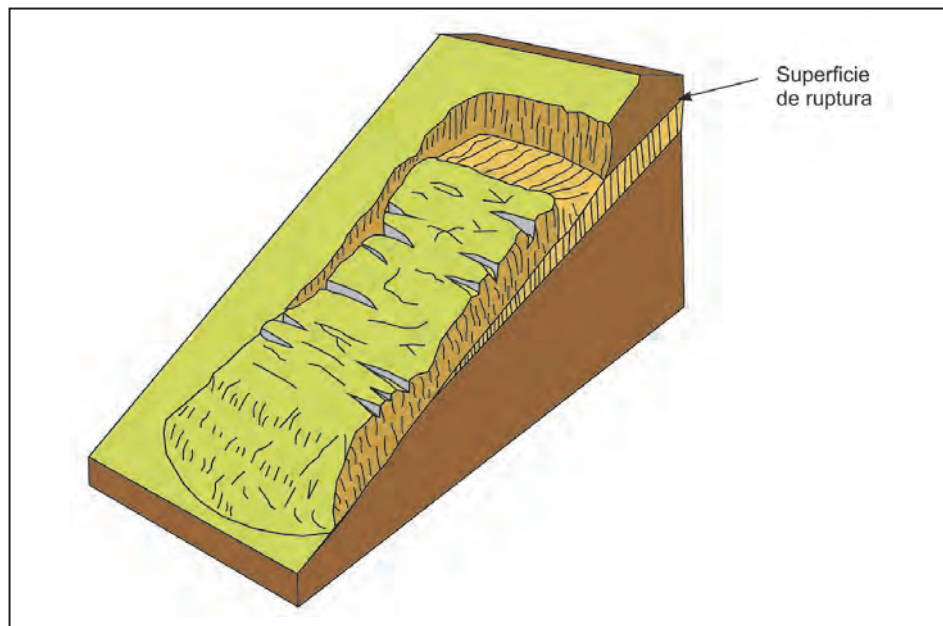


Figura 6.6 Esquema de un deslizamiento traslacional.

Deslizamiento rotacional (*Rotational slide, Slump*). En este tipo de deslizamiento, la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla, curva cóncava. Los deslizamientos rotacionales muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal (figura 6.7). La deformación interna de la

masa desplazada es usualmente muy poca. Debido a que el mecanismo rotacional es autodeslizante, y este ocurre en rocas poco competentes, la tasa de movimiento es con frecuencia baja excepto en presencia de materiales altamente frágiles como las arcillas sensitivas.

Los deslizamientos rotacionales pueden ocurrir lenta a rápidamente con velocidades menores a 1 m/s.

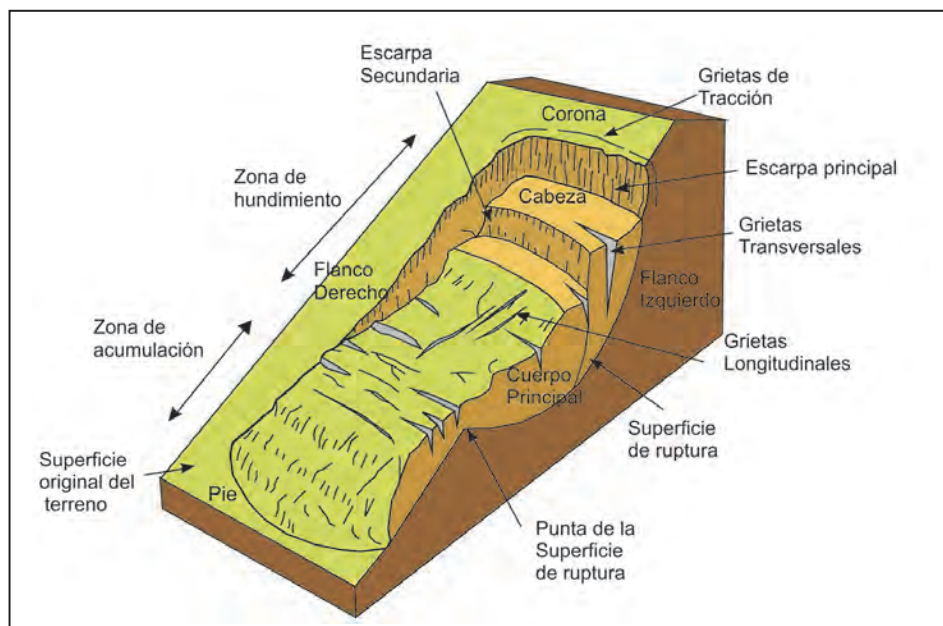


Figura 6.7 Partes de un deslizamiento rotacional.

Propagación lateral (*lateral spread*)

Tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material (figura 6.8). La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las propagaciones laterales pueden considerarse la etapa final de una serie de movimientos donde la deformación interna predomina

decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo. Varnes (1978) distingue 2 tipos de propagación: uno en que el movimiento afecta a todo el material sin distinguirse la zona basal de cizalla, típico de masas rocosas; y otro, que ocurre en suelos cohesivos que sobreyacen a materiales los cuales han sufrido licuefacción o a materiales en flujo plástico.

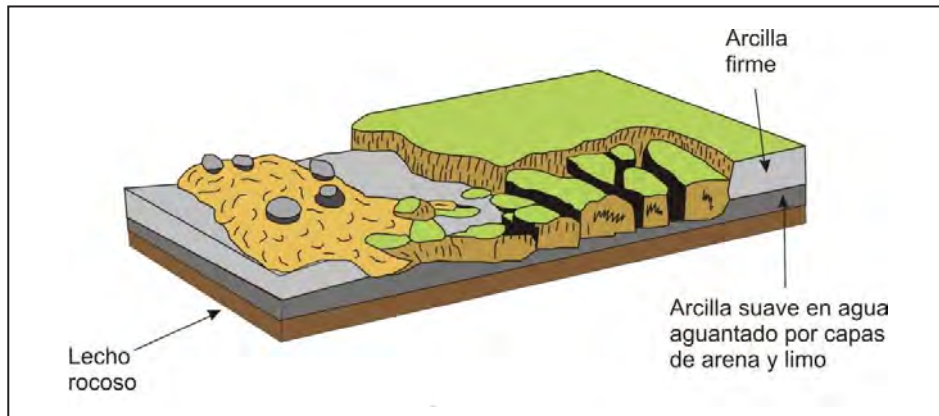


Figura 6.8 Esquema de una expansión lateral.

Flujo (*Flow*)

Es un tipo de movimiento en masa que, durante su desplazamiento, exhibe un comportamiento semejante al de un fluido. Puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se origina a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Se tienen los siguientes tipos según Varnes (1978), Hungr *et al.* (2001) y Hungr (2005):

Flujo seco. El término flujo trae naturalmente la idea de contenido de agua y, de hecho, para la mayoría de los movimientos de este tipo se requiere cierto contenido de agua. Sin embargo, ocurren con alguna frecuencia pequeños flujos secos de material granular y se ha registrado un número considerable de flujos grandes y catastróficos en materiales secos (Varnes, 1978).

El flujo seco de arena es un proceso fundamental en la migración de dunas de arena. Los flujos secos de talud son importantes en la formación de conos de talud (Evans & Hungr, 1993). Los de limo, a veces, son desencadenados por el fallamiento de escarpes empinados o barrancos de material limoso (Hungr *et al.*, 2001).

Flujo de detritos (*Debris flows*). Es un flujo muy rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor a 5 %), que transcurren principalmente confinados a lo largo de un canal o cauce

con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes. Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender en el canal y, finalmente, los depositan en abanicos de detritos (figura 6.9). Sus depósitos tienen rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de "U", trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales. Los flujos de detritos desarrollan pulsos usualmente con acumulación de bloques en el frente de onda. Como resultado del desarrollo de pulsos, los caudales pico de los flujos de detritos pueden exceder en varios niveles de magnitud a los caudales pico de inundaciones grandes. Esta característica hace que los flujos de detritos tengan un alto potencial destructivo.

La mayoría de los flujos de detritos alcanzan velocidades en el rango de movimiento extremadamente rápido y, por naturaleza, es capaz de producir la muerte de personas (Hungr, 2005).

Hay un tipo de flujo de detritos de gran magnitud que ocurre en los volcanes, ya sea durante las erupciones o en el periodo entre estas. Por lo general, movilizan depósitos de material volcánico no consolidado. Estos son denominados usualmente *lahares*. Muchos de los desastres más devastadores en el mundo, en términos de pérdidas económicas, han sido atribuidos a flujos de detritos. Entre otros, se pueden mencionar los casos de

Mayunmarca en Perú (1974), Vargas en Venezuela (1999), Taiwán (1996) y el lahar detonado por el derretimiento de nieve del volcán Nevado del Ruiz en Colombia (1985). Además, una fracción significativa de muertes, durante desastres regionales

causados por tormentas o terremotos, se debe a la ocurrencia de flujos y avalanchas de detritos en zonas de topografía abrupta (Jakob & Hungr, 2005).

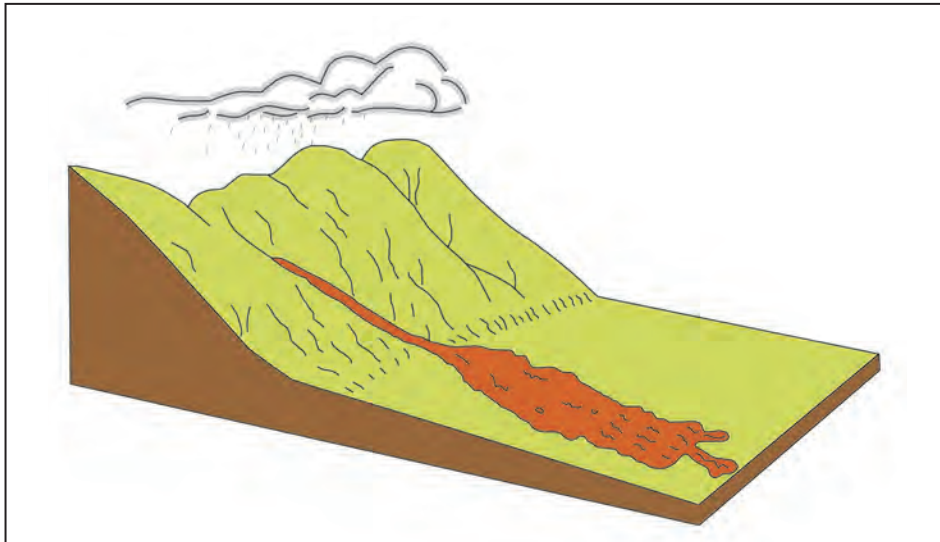


Figura 6.9 Esquema donde se muestra el depósito que forma un flujo de detritos.

Crecida de detritos (*Debris floods*). Es un flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal, usualmente también llamados flujos hiperconcentrados (Hungr *et al.*, 2001). Es difícil distinguir entre un flujo de detritos y una crecida de detritos con base en la concentración de sedimentos, por lo que deben diferenciarse según el caudal pico observado o potencial. Las crecidas de detritos se caracterizan por caudales pico 2 o 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación. De esta manera, la capacidad de daño de una crecida de detritos es similar a la de una inundación, y los objetos impactados quedan enterrados o rodeados por los detritos, con frecuencia sin sufrir daño. Sin embargo, pueden ocurrir eventos excepcionales por descargas de agua inusualmente altas, tales como las producidas por el rompimiento de presas naturales o artificiales (*outbursts*), la liberación súbita de agua de lagos glaciales (GLOFs) o subglaciales (*jökulhlaups*) (Hungr, 2005). Estos son denominados “aluviones” en el Perú, Chile y Argentina.

Los depósitos de crecidas de detritos están compuestos comúnmente por mezclas de arena gruesa y grava pobremente estratificada. Se diferencian de los depósitos de flujos de detritos en que las gravas que los forman presentan una textura uniformemente gradada sin matriz en todo el depósito e imbricación de clastos y bloques (Pierson, 2005).

Flujo de lodo (*Mud flow*). Es un flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos. Su contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (índice de plasticidad mayor al 5 %). El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material. También, se distingue de los deslizamientos por flujo de arcilla en que el flujo de lodo incorpora agua superficial durante el movimiento, mientras que el deslizamiento por flujo ocurre por licuación *in situ*, sin un incremento significativo del contenido de agua (Hungr *et al.*, 2001). En algunos países de Sudamérica se denomina “flujo o torrente de barro”.

Flujo de tierra (*Earth flow*). Es un movimiento intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico (Hungr *et al.*, 2001). Los flujos de tierra desarrollan velocidades moderadas, con frecuencia de centímetros por año. Sin embargo, pueden alcanzar valores hasta de metros por minuto (Hutchinson, 1988). El volumen de los flujos de tierra puede llegar hasta cientos de millones de metros cúbicos.

Las velocidades medidas en flujos de tierra, generalmente, están en el intervalo de 10^{-5} a 10^{-8} mm/s por lo que son casi siempre lentos o extremadamente lentos.

Avalancha de detritos (*Debris avalanches*). Es un flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápidos. Estos movimientos comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que, al desplazarse, sufre una considerable distorsión interna y toma la condición de flujo. Relacionado con la ausencia de canalización de estos movimientos, está el hecho de que presentan un menor grado de saturación que los flujos de detritos, y que no tienen un ordenamiento de la granulometría del material en sentido longitudinal ni tampoco un frente de material grueso en la zona distal (Hungar *et al.*, 2001).

Las avalanchas, a diferencia de los deslizamientos, presentan un desarrollo más rápido de la rotura. Según el contenido de agua o por efecto de la pendiente, la totalidad de la masa puede licuarse, al menos en parte, fluir y depositarse mucho más allá del pie de la ladera (Varnes, 1978). Las avalanchas de detritos son morfológicamente similares a las avalanchas de rocas.

Avalancha de rocas (*rock avalanches*). Las avalanchas de rocas son flujos de gran longitud extremadamente rápidos, de roca fracturada, que resultan de deslizamientos de roca de magnitud considerable (Hungar *et al.*, 2001). Pueden ser bastante móviles y su movilidad parece que crece con el volumen. Sus depósitos están usualmente cubiertos por bloques grandes, aun cuando se puede encontrar bajo la superficie del depósito material fino derivado parcialmente de roca fragmentada e incorporada en la trayectoria (figura 6.10). Algunos depósitos de avalanchas pueden alcanzar volúmenes del orden de kilómetros cúbicos y desplazarse a grandes distancias. Con frecuencia son confundidos con depósitos morrénicos.

Las avalanchas de rocas pueden ser muy peligrosas, pero afortunadamente no son muy frecuentes, incluso en zonas de alta montaña. Algunas avalanchas de roca represan ríos y pueden crear una amenaza secundaria asociada al rompimiento o colmatación de la presa. Las velocidades pico alcanzadas por las avalanchas de rocas son del orden de 100 m/s y las velocidades medias pueden estar en el rango de 30-40 m/s.

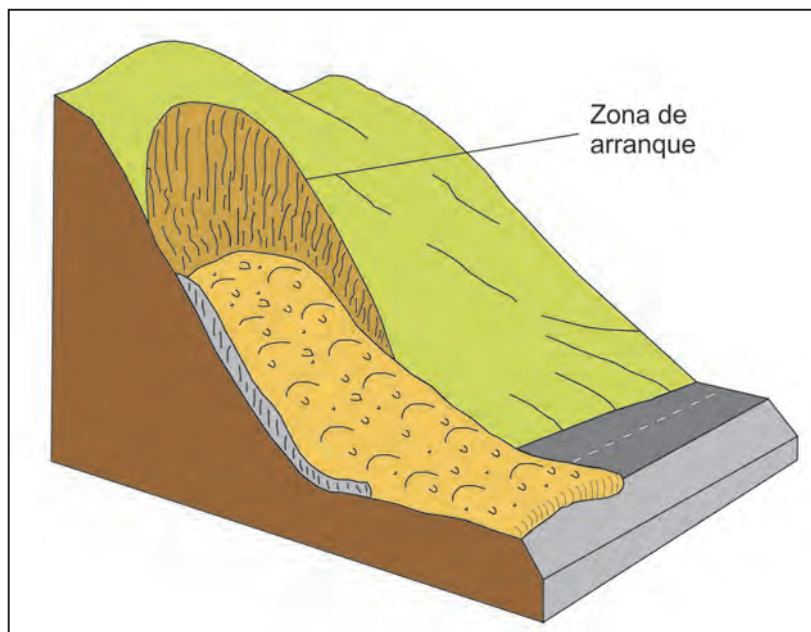


Figura 6.10 Esquema de una avalancha de rocas.

Reptación

Se refiere a aquellos movimientos lentos del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser estacional cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo (figura 6.11).

Dentro de este movimiento se incluyen la solifluxión y la gelifluxión. Este último término está reservado para ambientes

periglaciales. Ambos procesos son causados por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 metros de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo.

La reptación de suelos y la solifluxión son importantes en la contribución a la formación de delgadas capas de suelo coluvial a lo largo de laderas de alta pendiente. Estas capas pueden ser subsecuentemente la fuente de deslizamientos de detritos superficiales y de avalanchas de detritos.

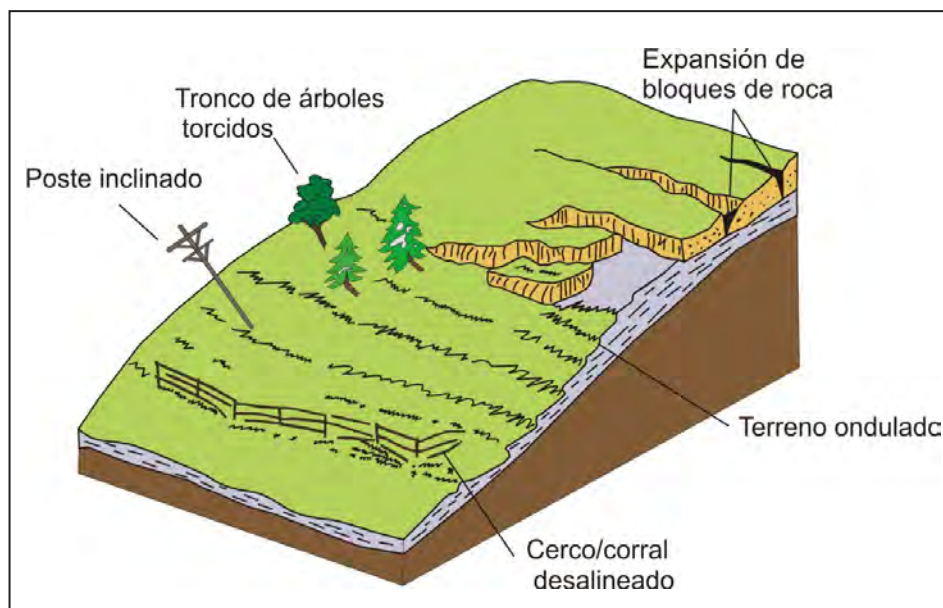


Figura 6.11 Esquema de una ladera afectada por reptación de suelos.

Movimiento complejo. Se produce por la combinación de uno o más de los tipos de movimientos en masa descritos anteriormente. A este tipo de evento que involucra varios tipos de movimientos, se le denomina “complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro, a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en una caída o en un deslizamiento en flujo.

6.5 OTROS PELIGROS GEOLÓGICOS

Erosión de laderas

Este tipo de movimientos es considerado predecesor de la ocurrencia de grandes eventos de movimientos en masa. La erosión de los suelos es producto de la remoción del material superficial por acción del agua o viento. El proceso se presenta debido a la presencia de agua en forma de precipitación pluvial (lluvias) y escorrentías (escurrimiento), que entra en contacto con el suelo (figura 6.12). En el primer caso, por el impacto; y, en

el segundo caso, por fuerzas tractivas que vencen la resistencia de las partículas (fricción o cohesión) del suelo y se generan los procesos de erosión (Duque *et al.*, 2016).

La construcción de muchas obras de ingeniería, así como el asentamiento de centros poblados y la habilitación de muchas zonas como terrenos de cultivo, exige la remoción de la cobertura vegetal y excavaciones del suelo. Estas acciones conllevan a la generación de problemas en laderas y cursos de agua por la generación e incorporación de suelo removido a las corrientes, las cuales pueden alterar ecosistemas naturales y generar problemas de sedimentación.

La erosión hídrica causada por el agua de lluvia abarca los siguientes procesos:

Saltación pluvial. El impacto de las gotas de lluvia en el suelo desprovisto de vegetación ocasiona el arranque y arrastre de suelo fino. El impacto compacta el suelo, disminuye la permeabilidad e incrementa escorrentía.

Escorrimento superficial difuso. Comprende la erosión laminar sobre laderas carentes de coberturas vegetales y afectadas por saltación pluvial, que estimula el escurrimiento del agua arrastrando finos.

Escorrimento superficial concentrado. Se produce en 2 formas: surcos de erosión –canales bien definidos y pequeños, formados cuando el flujo se hace turbulento y la energía del agua

es suficiente para labrar canales paralelos o anastomosados– y cárcavas –son canales o zanjas más profundos y de mayor dimensión, por las que discurre agua durante y poco después de haberse producido una lluvia–. El proceso se da en 4 etapas: 1) entallamiento del canal, 2) erosión remontante o retrogresiva desde la base, 3) cicatrización y 4) estabilización (Duque *et al.*, 2016).

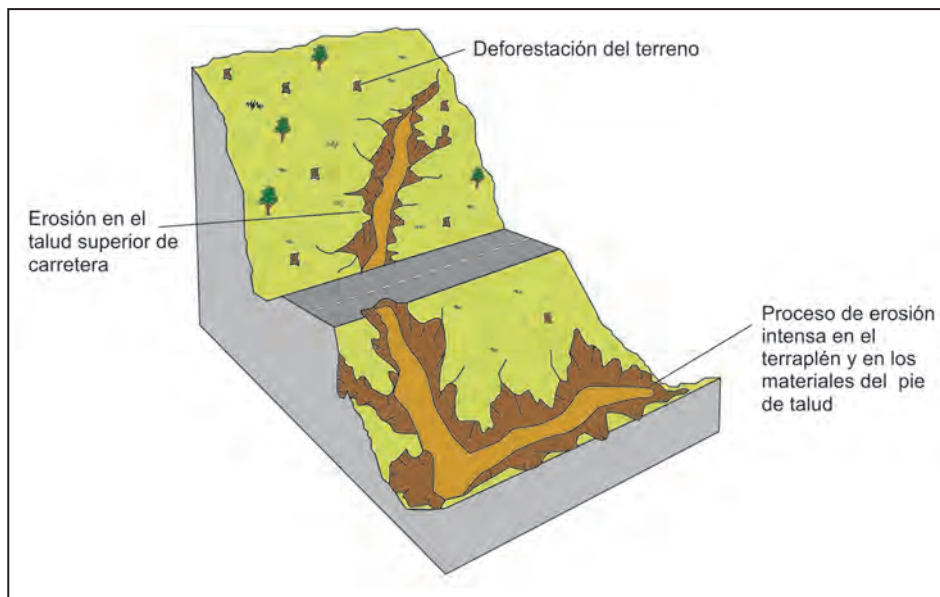


Figura 6.12 Esquema de erosión de laderas en cárcavas.

6.6 FACTORES DE INESTABILIDAD DE LAS LADERAS

Los factores que intervienen en la ocurrencia de un movimiento en masa son variados, estos son agrupados por los distintos autores bajo diferentes categorías. Para Ferrer (1987), estos factores pueden agruparse en dos categorías:

Los factores internos. Condicionan los diferentes tipos de movimientos en masa, los mecanismos y modelos de rotura. Dentro de los factores internos se tiene a las características intrínsecas, relacionadas con la resistencia de los materiales (litología, estratificación, consolidación, tamaño de partículas, etc.) y los estados de esfuerzos. Las características extrínsecas están relacionadas con la morfología de la ladera (pendiente de la ladera y su disposición respecto a discontinuidades geológicas, y la orientación de la ladera), y con las condiciones ambientales de la zona (cambios estacionales de temperatura, tipo de vegetación).

Los factores externos. Actúan sobre los materiales modificando las condiciones originales de las laderas. Además, provocan

roturas al producirse variación en su estado de equilibrio. Estos son la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas.

Según Villota (2005), los factores que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa pueden agruparse de la siguiente manera:

Naturaleza de los materiales. Los movimientos en masa pueden afectar a toda clase de materiales. No obstante, existen materiales más susceptibles que otros. Esto se determinará por su grado de cohesión, fricción interna, presencia de fallas, diaclasas, planos de estratificación, de exfoliación, buzamiento de los estratos, discontinuidades litológicas con alternancia de materiales duros y blandos, o por permeabilidades e impermeabilidades.

Factores topográficos. Los movimientos en masa se han reconocido en todo tipo de relieve, pero estos alcanzan grandes concentraciones en zonas montañosas y colinosas, con pendientes fuertes. El grado de pendiente determina, en gran medida, la velocidad del movimiento. En terrenos con pendientes entre 5° y 30° se produce todo tipo de movimientos

en masa más o menos lenta. Por encima de los 30° ocurren con mayor frecuencia movimientos rápidos. En pendientes verticales a subverticales se producen caídas de rocas por ser escasa la presencia de suelos. Otra forma de incidencia de la topografía está relacionada con la ruptura de la continuidad de la ladera, determinada por fallas, o por acción antrópica (construcción de carreteras), socavamiento por corriente fluviales y por olas. Todo esto crea frentes libres que hacen susceptibles a la generación de movimientos en masa.

Factores climáticos. Los movimientos en masa también se producen en cualquier clima. El más frecuente refiere aquel que ocurre en zonas donde se presentan lluvias fuertes y prolongadas que humedecen y saturan materiales poco o nada coherentes, porosos e intensamente fracturados. En zonas frías se producen deformaciones en el terreno por periodos de congelamiento y rápido deshielo de suelos. En climas subhúmedos a semiáridos, donde se alternan periodos secos y húmedos, se ve favorecida la formación de grietas en suelos arcillosos y su expansión se debe a variaciones en su estado de humedad. Así, la formación de grietas favorece la infiltración de agua. Los cambios bruscos de temperatura producen la expansión y contracción de los materiales que conforman suelos y rocas, fenómeno que favorece su debilitamiento. Por último, fuertes vientos pueden provocar desprendimientos de materiales incoherentes en taludes y escarpes.

Factores edáficos. El agua en el suelo de tipo gravitacional o capilar es un elemento que interviene en la ocurrencia de movimientos en masa. Por lo tanto, esta puede disminuir el ángulo de fricción interna entre horizontes, capas de estratos, debido a las presiones hídricas generadas. También, puede reducir la cohesión entre partículas o suelos, debido a tensión capilar y hasta sobrepasar el límite de plasticidad. Además, puede producir el flujo (límite líquido); los suelos pueden cambiar de estado sólido a líquido cuando aumentan los contenidos de humedad y, simultáneamente, sufren impulso (la atracción gravitacional en terrenos de fuerte pendiente) o un choque (vibración sísmica en zonas más planas) que promueve su flujo. En este estado, los materiales fluyen por su propio peso en terrenos confinados o se deforman en laderas rectas y convexas de poca inclinación. El agua también aumenta el peso de los materiales al rellenar los espacios porosos.

Factores biológicos. La vegetación también influye en la ocurrencia de movimientos en masa. Por ejemplo, cuando se tienen árboles de raíces superficiales, estos no amarran el suelo ni retienen los movimientos. Tampoco absorben el exceso de agua infiltrada a alguna profundidad, como sucede con las especies de raíces profundas y ávidas de agua, como el eucalipto. El pastoreo y pisoteo excesivo de ganado en los terrenos de ladera favorecen la ocurrencia de movimientos en masa.

La actividad antrópica. Está reflejada en trabajos de construcción de vías férreas, carreteras, presas, túneles, labores agrícolas, explotación de canteras y demás actividades mineras, tala y quema de bosques. Los suelos se tornan más propensos a la ocurrencia de movimientos en masa.

El tiempo. Aunque no se considera un factor, resulta ser un parámetro fundamental en la estabilidad que determina la seguridad en los taludes. Aquel influye sobre aspectos como la geometría del talud, la resistencia de los materiales y la oscilación de los niveles piezométricos (Alonso, 1986). Su influencia se observa en la distinción entre estabilidad a corto, medio y largo plazo (Santacana, 2001). Los factores que influyen en la ocurrencia de movimientos en masa pueden cambiar con el tiempo. Por ejemplo, la meteorización que actúa sobre una roca puede, con el tiempo, generar horizontes de suelos donde antes no los había. Estos suelos pueden ser propensos a la ocurrencia de un movimiento en masa.

6.7 EVIDENCIAS DE INESTABILIDAD RECONOCIDAS

La cartografía geomorfológica-geodinámica efectuada en la zona de estudio (ciudad de Arequipa) puso especial atención a las geoformas relacionadas con procesos de movimientos en masa, tanto de eventos antiguos como recientes. Para ello, se utilizaron fotografías aéreas disponibles del año 1955 e imágenes estéreo de los satélites WorldView y GeoEye de alta resolución con los cuales se elaboró un mapa topográfico a escala 1: 5000.

La evolución de las vertientes o laderas, las formas de los depósitos y/o erosiones reconocidas asociadas a movimientos en masa son las siguientes:

Formas de depósitos de movimientos en masa:

- Depósitos de movimientos en masa de dimensiones medias a reducidas (deslizamientos, derrumbes y avalanchas de rocas), cartografiados a escala 1:5000.
- Depósitos de flujos antiguos de dimensiones variables, tanto de origen deluvial como proluvial que muestran cierres parciales de valles.
- Conos y abanicos de mayor dimensión (aluvionales y proluviales), por ejemplo, los que descienden del flanco sur del volcán Misti, sobre el cual se asienta parte de la ciudad de Arequipa.
- Depósitos de movimientos en masa de diferente tipo con represamientos de valles principales o secundarios.
- Depósitos de vertiente o piedemonte con formas irregulares, muchas veces asociadas a movimientos en masa.

Formas de erosión:

- Canales o surcos de erosión pluvial, cárcavamientos, por ejemplo, procesos de erosión de laderas que forman surcos y cárcavas, que cortan o disectan la superficie plana ignimbrítica, los piedemontes volcanoclásticos y colinas comprendidas en la zona de estudio.
- Cicatrices de deslizamientos antiguos, caídas o derrumbes y vuelcos recientes.
- Irregularidades en el terreno en laderas de baja a fuerte pendiente por procesos de reptación, que involucran rompimiento de cobertura vegetal (pastizales).

6.8 PELIGROS GEOHIDROLÓGICOS

Dentro de este tipo de peligros se ha considerado la erosión fluvial o de riberas y la inundación fluvial.

Erosión fluvial

Este fenómeno está relacionado con la acción hídrica de los ríos, pues socava los valles, los profundiza, ensancha y alarga (Dávila, 1999).

Se consideran como los factores más importantes que condicionan la ocurrencia de erosión fluvial: la cobertura vegetal, la geomorfología, la naturaleza de los materiales y el clima.

En la ciudad de Arequipa, en los periodos de lluvia (enero-marzo), la erosión fluvial se produce a lo largo de las márgenes de los ríos Chili, Andamayo, Socabaya y Mollebaya. Esta situación se agrava cuando se presentan lluvias extraordinarias (muy intensas) o lluvias relacionadas al fenómeno de El Niño. En ambos casos se producen procesos de erosión fluvial e inundaciones por desbordes en los ríos Chili, Andamayo, Socabaya y Molevaya; también, en las quebradas San Lázaro, Venezuela, Los Incas, El Chullo y todos sus tributarios.

Con lluvias muy intensas se activan quebradas secas y afluentes de ríos principales, se registran caudales elevados, que producen una intensa erosión fluvial a lo largo de sus márgenes, así como migración y cambios en sus cursos.

Inundación fluvial

Las inundaciones fluviales se producen cuando la precipitación pluvial extraordinaria caída en una cuenca hidrográfica se concentra y, en consecuencia, la capacidad de carga de sus canales de drenajes (ríos y quebradas) se ve superada por la gran cantidad de agua que transporta y se producen desbordes e inundación de tierras adyacentes. Se producen sobre todo en época de intensas y prolongadas lluvias, debido al incremento del caudal de los cursos de agua, sobre su nivel habitual (Pedraza *et al.*, 1996).

Este es un peligro que se produce y ha sido evidenciado en los valles de los ríos Chili, Andamayo, Socabaya y Mollebaya; se produce con lluvias estacionales de carácter extraordinario debido a la gran cantidad de precipitación caída en el flanco sur del volcán Misti.

Los problemas que usualmente se asocian a las inundaciones son los siguientes (Leopold *et al.*, 2012):

- Anegamiento de llanuras de inundación y daños de áreas urbanas y urbano-marginales, obstrucción de tramos viales, daños en áreas agrícolas.
- Anegamiento en zonas urbanas con deficiencias de drenaje pluvial en quebradas que descienden hacia ellas.
- Erosión sobre márgenes del cauce principal, generando cambios de curso permanentes y pérdida de áreas productivas (tierras de sembríos) principalmente zonas de valles.
- El ensanchamiento del cauce de un río y la destrucción de parte de la llanura de inundación son resultados frecuentes durante la ocurrencia de estos fenómenos.

6.9 INVENTARIO Y FRECUENCIA DE OCURRENCIAS DE PELIGROS GEOLÓGICOS

Los primeros estudios efectuados por Rojas (1978), Valdivia (1978), Cornejo (1990), Ingemmet (2002, 2003) y otros efectuados por Indeci (1995-2018) indican que las quebradas con mayor actividad en peligros geológicos y geohidrológicos, en los últimos 100 años, han sido Polanco, San Lázaro, Venezuela, Los Incas, Mariano Melgar e Ichuza. Otros estudios presentan evidencias de erosión fluvial en el área urbana, así por ejemplo Cruz (2007) hace aportes en la evaluación de riesgo de desastre ante inundaciones y deslizamientos asociados a lluvias excepcionales en el ámbito de la torrentera El Huarangal (quebrada Los Incas).

En el presente estudio, los peligros geológicos por movimientos en masa, los denominados "otros peligros geológicos" (erosión de laderas) y los peligros geohidrológicos (erosión fluvial e inundaciones) fueron cartografiados utilizando el mapa topográfico de elaboración propia generados a partir del modelo de elevación digital (DEM). Para el inventario de ocurrencias, se usó la "Ficha de inventario de peligros geológicos y geohidrológicos en el Perú"-DGAR-F-148, donde se consignan datos morfométricos, geomorfológicos, geológicos, geotécnicos y de evaluación del peligro de forma adecuada y fácil llenado.

Cada ocurrencia tiene un código de identificación, que ha sido asignado de acuerdo con la numeración de hoja topográfica del IGN a escala 1:100 000. Los datos consignados en las

fichas fueron ingresados en la base de datos de Ingemmet (BDGeocientífica) y trabajados en un sistema de información geográfico (SIG), lo cual permitió su representación gráfica, debidamente ilustrada, con ejemplos de los tipos principales de peligros (figura 6.13). Además, permitió a la vez la actualización del banco de datos de peligros geológicos del Perú y efectuar el análisis estadístico sobre frecuencia y ocurrencia. Cada ocurrencia tiene, adicionalmente, una o más fotografías ilustrativas.

En la zona de estudio, se ha inventariado un total de 233 ocurrencias de peligros geológicos, otros peligros geológicos y peligros geohidrológicos siguiendo la metodología descrita en el capítulo I. Es necesario precisar que los eventos que se muestran en el mapa geomorfológico de la región representan una mayor cantidad de ocurrencias. Muchas de estas no cuentan con ficha de inventario, porque proceden de los

trabajos de interpretación de imágenes satelitales, por lo que se recomienda que, en los trabajos de evaluación del peligro, se use de forma conjunta el mapa de inventario de peligros y el mapa geomorfológico. Los trabajos de campo en la ciudad de Arequipa se realizaron durante los años 2015 y 2016 en un total de 80 días.

En la figura 6.14 se aprecia un primer análisis estadístico de las ocurrencias de peligros geológicos según su origen de la ciudad de Arequipa. Se tiene que los peligros geológicos por movimientos en masa representan la mayor cantidad de ocurrencias con un total de 164 eventos; esto representa el 70.39 % del total; los denominados “otros peligros geológicos” tienen 27 ocurrencias y representan el 11.59 %; finalmente, se tienen los peligros geohidrológicos con 42 ocurrencias, lo que representa el 18.02 % del total de eventos inventariados.

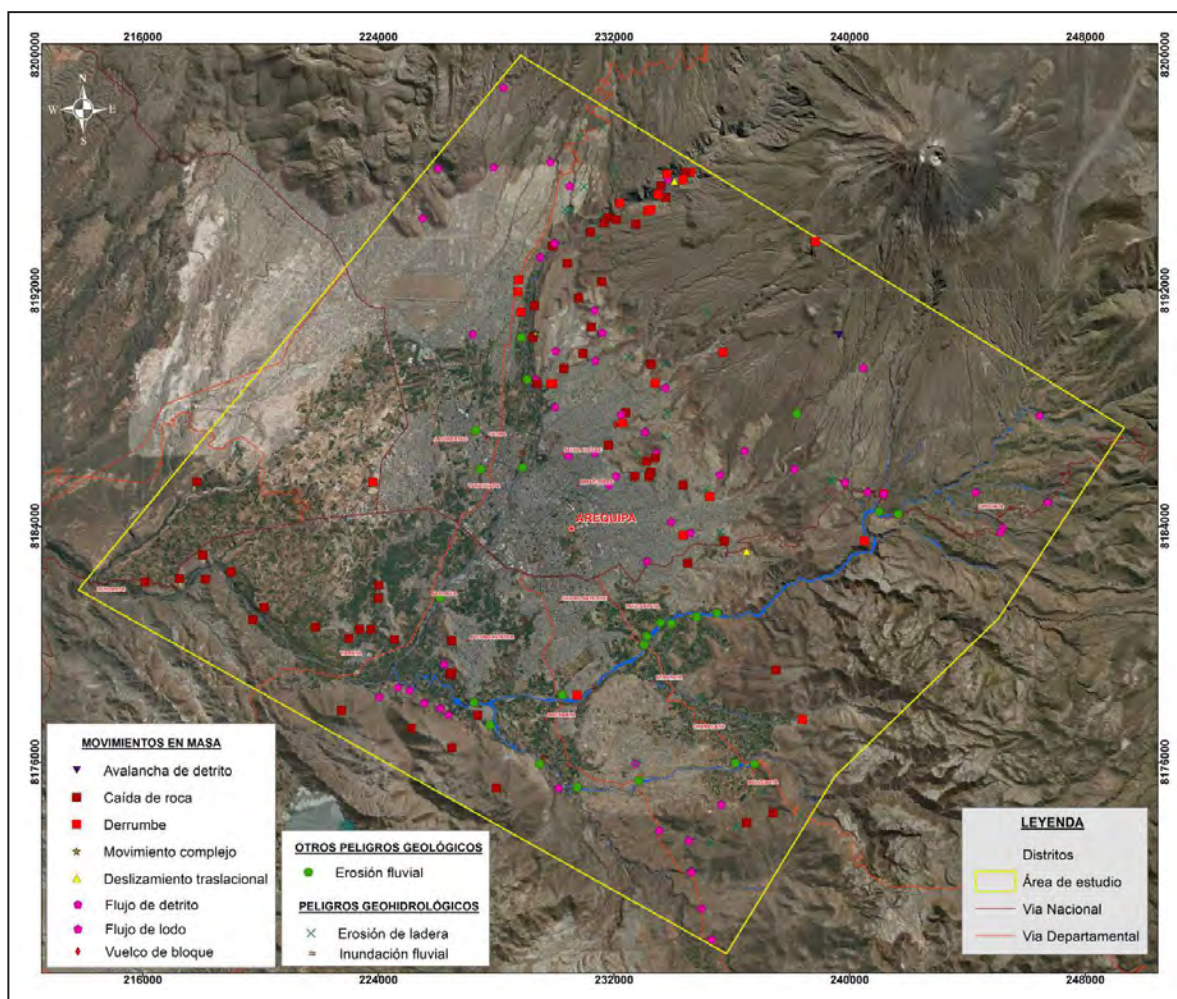


Figura 6.13 Mapa de inventario de peligros de la ciudad de Arequipa y alrededores.

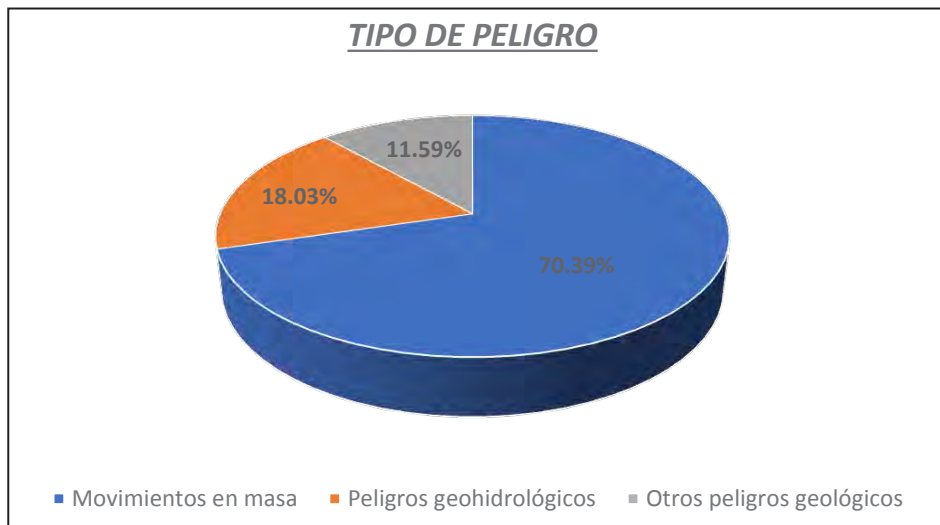


Figura 6.14 Ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa, geohidrológicos y otros peligros geológicos.

Al realizar un análisis estadístico de los peligros geológicos por movimientos en masa, del total de 164 eventos inventariados (figura 6.15), se puede observar que se encuentran los flujos de detritos, con 68 ocurrencias (41.46 %); siguen las caídas de rocas, con 57 ocurrencias (representa 34.76 % del total); los

derrumbes, con 26 ocurrencias (15.85 %); flujo de lodo, con 08 ocurrencias (4.88 %); los deslizamientos traslacionales, con 02 ocurrencias (1.22 %); y finalmente están los vuelcos de bloques, avalancha de detritos y movimientos complejos, con una sola ocurrencia cada uno (0.61 %).

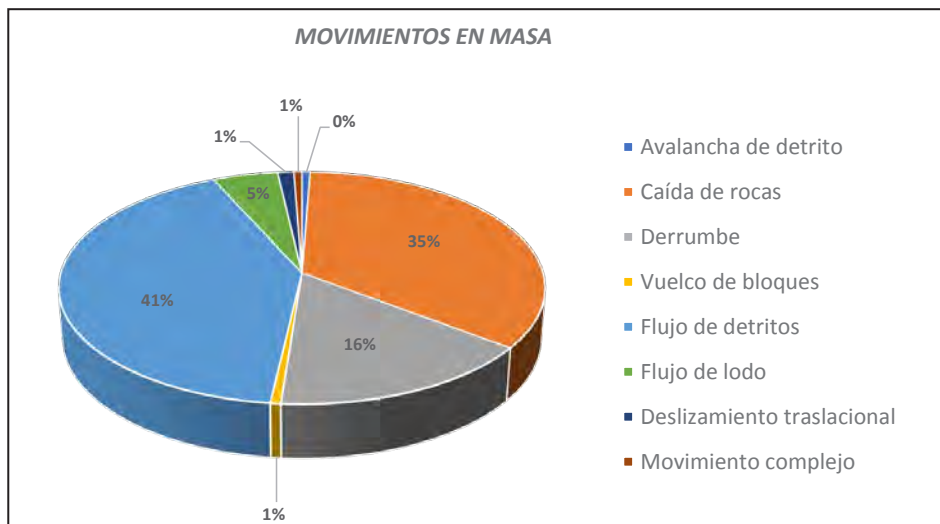


Figura 6.15 Ocurrencia de movimientos en masa en la ciudad de Arequipa.

La figura 6.16 muestra la distribución estadística de los denominados “Otros peligros geológicos” y “Peligros geohidrológicos”, que hacen un total de 69 ocurrencias. Esta información permite observar que los procesos de erosión fluvial son 31 eventos, que representan el 44.93 % del total inventariado; siguen los procesos de erosión de laderas (laminar, surcos y cárcavas) con un total 27 ocurrencias inventariadas,

que representan el 39.13 %; estos no corresponden a eventos puntuales, sino que constituyen sectores afectados por estos procesos como laderas de montañas cortadas por surcos y cárcavas, o cabeceras de quebradas donde la incisión en el terreno es por medio de cárcavamientos con avances retrogresivo y laterales.

En los surcos y cárcavas se pueden generar flujos de detritos, así como deslizamientos o derrumbes. Cuando la erosión de laderas alcanza un estado muy avanzado se forman los denominados

badlands o tierras malas. Finalmente, se tienen los sectores afectados por inundaciones fluviales que son 11 ocurrencias inventariadas, que representan el 15.94 %.

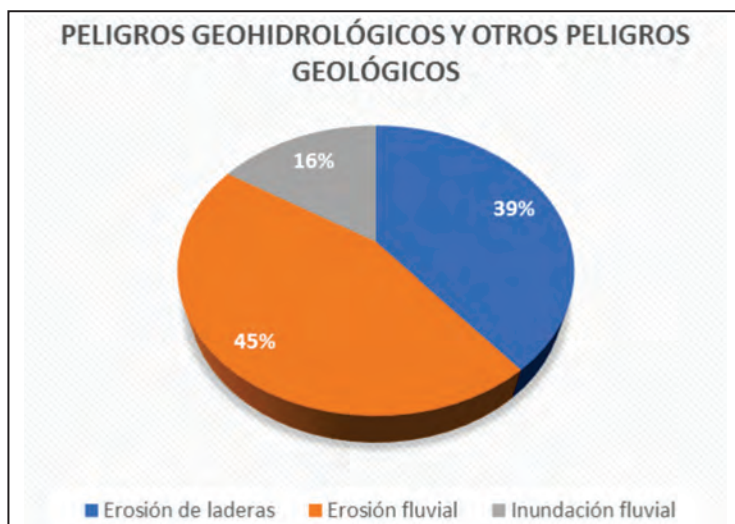


Figura 6.16 Ocurrencia de peligros geohidrológicos y otros peligros geológicos en la ciudad de Arequipa.

Tipología de movimientos en masa

El cartografiado geomorfológico y geodinámico ha permitido diferenciar procesos de movimientos en masa, tomando como base la Clasificación de Varnes (1978, 1996) y Hungr *et al.* (2001), y la terminología sobre Movimientos en Masa en la Región Andina preparado por el Grupo GEMMA (PMA: GCA, 2007). La ocurrencia de estos eventos, en su mayoría periódicos, tienen como origen o causas principales las siguientes:

- Litología del sustrato, en muchos casos son de mala calidad, tanto por su grado de meteorización y/o fracturamiento (rocas volcánicas hidrotermalizadas con argilitización); esto condiciona mayor erosión en el suelo residual generado y mayor disponibilidad en las rocas fracturadas.
- Formaciones superficiales o suelos de escaso espesor (suelos residuales y residuo-coluviales), con poca cobertura vegetal (pastizales y arbustos).
- Pendiente natural de los terrenos o laderas (media, fuerte a muy fuerte), y las modificaciones de los taludes hechos tanto en los cortes de la carretera Panamericana, y otras vías de acceso, dejando zonas inestables.
- Lluvias de gran intensidad –corta duración o de moderada intensidad– y de larga duración, generalmente localizadas en las cabeceras de los ríos o quebradas; ocasionan, por un lado, la erosión por escorrentía pluvial en terrenos impermeables y, por otro, la infiltración que ayuda al

incremento de la presión intersticial (en el caso de suelos permeables), disminuyendo el esfuerzo cortante.

- Presencia de filtraciones y manantiales.
- Existencia de depósitos antiguos de remoción en masa, potentes, con presencia de escarpas de deslizamientos o derrumbes, reactivados por erosión fluvial o socavamiento del pie del valle, infiltraciones naturales y de riego.

6.10 INUNDACIONES Y FLUJOS DE DETRITOS QUE AFECTAN A LA CIUDAD DE AREQUIPA

En zonas semiáridas como Arequipa, donde se presentan lluvias fuertes anualmente entre los meses de enero y febrero, es común que las inundaciones sean frecuentes, causando destrucción y cambien rápidamente la configuración geomorfológica del terreno (Ettinger *et al.*, 2015; Martínez Ibarra, 2012). Acerca de la ocurrencia de inundaciones, varios autores coinciden en que esta es muy variable, y se asocia a lluvias intensas y localizadas (Ettinger *et al.*, 2014). El fenómeno ocurre del siguiente modo: intensas precipitaciones producen riadas y/o avenidas, las cuales a su vez generan erosión, desborde e inundación.

Los primeros registros de los eventos geohidrológicos datan de fines del siglo XVIII, que señalan se debieron a graves trastornos climáticos (se atribuye al evento El Niño) que originó intensas lluvias e inundaciones que afectaron las ciudades de Cusco y Arequipa (Cruz, 2007).

En 1868, fue necesaria la renovación urbana de la ciudad de Arequipa posterior al sismo registrado ese año, que destruyó parcialmente la localidad. En aquel tiempo se reconstruyó la infraestructura sin considerar la geografía, la topografía y los peligros naturales que amenazan esta zona. Esto produjo áreas urbanas vulnerables como, por ejemplo, las urbanizaciones ubicadas en las terrazas aluviales del río Chili.

Posteriormente, en 1997, marzo de 1999 y marzo de 2001, la ciudad volvió a verse afectada por inundaciones asociadas al evento El Niño. La intensidad de las lluvias en los tres casos fue de 45,43 mm (1997); 29,97 mm (1999) y 34,10 mm en el 2001 (Cruz, 2007). El 11 de marzo de 2012, se produjo el desborde de la tercera torrentera de Paucarpata por la avenida Los Incas con un caudal de 30 m³/s, y en Pablo VI. Los efectos fueron la destrucción de terrenos de cultivo e inundación de viviendas. Además, se registraron vehículos varados en la carretera Panamericana Sur, y desbordes aguas abajo del río Chili (Cacya *et al.*, 2013).

El 8 de marzo del 2013, la precipitación en la ciudad de Arequipa alcanzó los 124,5 mm, lo que originó flujos de detritos en las quebradas San Lázaro, Venezuela y Los Incas, que se desbordaron y causaron inundaciones que afectaron 50 km de vías, el sistema de agua potable y desagüe, destruyendo 79 viviendas y afectando otras 10 000, además de los centros comerciales (Cacya *et al.*, 2013).

6.10.1 Caracterización de las torrenteras

Las torrenteras que cruzan la ciudad de Arequipa se encuentran ubicadas en la margen izquierda del río Chili, presentan una dirección aproximada NE-SO. A lo largo de su historia, la ciudad de Arequipa ha sido afectada muchas veces por fuertes precipitaciones pluviales, las que causan serias destrucciones materiales y en muchas ocasiones han cobrado vidas humanas.

Debido a la falta de nombres de las torrenteras, la denominación de estas corresponde a los distritos o zonas (avenidas) en donde se localiza su mayor recorrido, lo que permite su inequívoca identificación; a continuación, se describe brevemente cada una de estas quebradas:

- Polanco (sin denominación tradicional): Torrentera irrelevante hasta épocas pasadas recientes, adquiere importancia actual debido a que recientemente se han instalado en su zona de influencia dos asentamientos humanos de alta significación Independencia y Pampas de Polanco (Alto Selva Alegre). Se ubica inmediatamente al norte de la torrentera de San Lázaro.

- San Lázaro (Segunda Torrentera): Se origina en la quebrada del mismo nombre (distritos de Miraflores y Alto Selva Alegre), en dirección noreste de la ciudad de Arequipa, presentando una dirección aproximada NE-SO, hasta su desembocadura en el río Chili a la altura del Puente Grau.
- Venezuela (Tercera Torrentera): Se origina en las depresiones topográficas occidentales del cerro El Botadero (distritos de Mariano Melgar, Miraflores y Arequipa). A partir de su origen hasta el Cuartel Mariano Bustamante presenta un rumbo NO-SE, seguidamente el de NE-SO hasta su desembocadura en el río Chili, situada 150 metros antes del Puente Trébol del inicio de la Variante de Uchumayo.
- Los Incas (Cuarta Torrentera): Se origina en las quebradas denominadas El Chilcal y Guarangal (distritos de Mariano Melgar y Paucarpata), presentando una dirección general de este a oeste hasta su desembocadura en el río Chili a la altura del Cuartel Arias Aragüés en Tingo.
- Huarangal (Quinta Torrentera-Alameda Dolores): Tiene su nacimiento en las depresiones del cerro Alto Jesús (distritos de Paucarpata y José Luis Bustamante). Su dirección general es del NE hacia el SO hasta la altura de Ciudad Mi Trabajo, cambiando de rumbo hacia el SE hasta su desembocadura en el río Socabaya entre Bellapampa y Huasacache.

6.10.2 Condicionantes para la generación de movimientos en masa en la ciudad de Arequipa

En el caso particular de la ciudad de Arequipa, se puede decir que, de acuerdo con lo observado durante los trabajos de campo, las características del territorio en cuanto a morfología (pendientes), tipos de rocas y suelos, la hidrología, la hidrogeología, la cobertura vegetal y el grado de impacto antropogénico en su medio físico son los principales factores condicionantes de la generación de peligros por movimientos en masa y peligros geohidrológicos.

Entre las principales formas de impacto antropogénico en el medio físico de la zona de estudio se puede destacar:

- Los cursos de quebradas y torrenteras han sido desviados por trabajos de asfaltado de carreteras; muchas de las torrenteras de primer orden han sido canalizadas y desviadas hacia cauces principales por las cunetas de la carretera. Las quebradas principales cuentan con alcantarillas que permiten el paso de las aguas de precipitación pluvial; sin embargo, estas alcantarillas al parecer resultarían ser muy pequeñas y no cumplen el objetivo de servir como drenajes de aguas de escorrentía formada en periodos de lluvia (fotografía 6.1).



Fotografía 6.1 Vista de alcantarillas colocadas en la carretera que sube por el sector de Cabrería en el distrito de Cayma. Vista hacia el suroeste.

b) Los trabajos de explanación de terreno, como los realizados en los sectores de Fundo Cabrería y la Asociación de vivienda Villa Real, con fines de urbanización para la construcción de viviendas, han borrado el trazo de muchas quebradas y torrenteras; se constató que muchas de estas

quebradas están comenzando a retomar sus antiguos cauces que fueron alterados, socavando y erosionando los terrenos que fueron allanados; esta incisión que hacen las quebradas en el terreno puede significar peligro para las viviendas que se construyen en zonas que antes fueron cauces de quebradas (fotografía 6.2).



Fotografía 6.2 Quebrada del Fundo Cabrería cuyo cauce ha sido borrado por la explanación del terreno, para habilitar una nueva urbanización de viviendas. Vista hacia el suroeste.

En las asociaciones de vivienda Los Jazmines de Cayma y Mirador Transoceánica, se observó que los trabajos de explanación de terreno han sido realizados sin ningún criterio técnico, ya que se obstruyen quebradas y torrenteras con materiales colocados como terraplén de vías de acceso, y en el peor de los casos las quebradas son borradas totalmente. No se ha realizado una canalización de la quebrada.

- c) Alteración de los cursos de quebradas y ríos por medio de la obstrucción de cauces con los terraplenes colocados

para habilitar vías de acceso, así como la ocupación de curso de quebrada con la construcción de viviendas entre las diferentes asociaciones de vivienda (fotografía 6.3). Por ejemplo, la alcantarilla de un terraplén de una de las trochas carrozables que cruza la quebrada Pastoras fue destruida por los caudales que discurren por la quebrada; este paso vehicular ha sido rehabilitado, pero ya no se colocó la alcantarilla y el material colocado está formando un pequeño dique (fotografía 6.4).



Fotografía 6.3 Vista donde se puede observar la obstrucción de dos cauces de quebradas con el material colocado como terraplén para habilitar vías de acceso hacia la urbanización Villa Real. Vista hacia el noreste.



Fotografía 6.4 Alcantarilla destruida por flujos que discurren por la quebrada Pastoras. Vista con dirección al noreste.

En el sector denominado Complejo habitacional Dean Valdivia, los cauces han sido alterados, los cursos de torrenteras tributarias han sido tapadas y las calles constituyen los nuevos drenajes, produciendo que las aguas concentradas de la precipitación pluvial sean conducidas hacia las quebradas de mayor dimensión como son las quebradas Pastoras y Gamarra. Los cauces son cerrados para ganar terrenos y dar paso a la construcción de lozas

deportivas cerca o en el mismo curso de las quebradas (fotografía 6.5).

- d) Los cursos de quebradas y torrenteras son usados para arrojar basura y material de desmonte; por ejemplo, en las vertientes de las quebradas Gamarra, Pastoras y demás torrenteras son comúnmente usadas como botaderos de desmonte y basura (fotografías 6.6).



Fotografía 6.5 Sector Seis en el Complejo habitacional Dean Valdivia; a partir de este punto la quebrada ha sido borrada con obras de explanación de terreno con fines de urbanización, las aguas de precipitación pluvial tienen como nuevo curso de drenaje las pistas asfaltadas. Vista hacia al noreste.



Fotografía 6.6 Desmonte arrojado en la margen izquierda de la quebrada Pastoras. Vista hacia el noreste.

e) Trabajos de encauzamiento de quebradas y techado de cauces hechos sin criterio técnico. El curso del río Chili, en la zona de Puente Tingo, a unos 350 m aguas arriba, específicamente en la margen izquierda, ha sido alterado drásticamente; aquí se han realizado trabajos de encauzamiento del río, en una zona donde este tenía una amplia llanura de inundación de aproximadamente 87 m de ancho, fue reducido hasta un máximo de 18 m de ancho; estos trabajos se realizaron con fines de ampliar terrenos para construcción. Además, se ha realizado el techado de la

torrentera Los Incas cerca de su confluencia en el río Chili, constituyéndose esta condición un peligro alto si se tiene en cuenta los antecedentes de los eventos sucedidos en el Cercado de Arequipa el año 2013. Ante la ocurrencia de nuevas lluvias excepcionales se puede producir un nuevo represamiento u obstrucción de esa torrentera techada, lo que ocasionará desbordes e inundaciones en las zonas colindantes. Los propietarios de los terrenos en la margen izquierda del río Chili en este sector no han respetado la denominada faja marginal (figuras 6.17).



Figura 6.17 Secuencia de imágenes donde se observa cómo se ha impactado y alterado el cauce del río Chili y de la quebrada Los Incas tributaria por su margen izquierda; esta última se ha cubierto o techado el tramo final de la quebrada.

Existe la tendencia de la población de obstruir y ocupar los cauces de quebradas secas en la ciudad de Arequipa. Por ejemplo, se identificó en la Asociación de Vivienda San Luis Gonzaga, del distrito Alto Selva Alegre-Zona A, localizada en la

parte alta de la quebrada San Lázaro, un local comunal y una loza deportiva construida en el mismo cauce; la loza deportiva presenta un canal de drenaje que pasa por debajo de la loza (fotografía 6.7).



Fotografía 6.7 Local comunal y loza deportiva de la Asociación de Vivienda San Luis Gonzaga, del distrito de Alto Selva Alegre-Zona A, construida en el mismo cauce de la quebrada San Lázaro (cuenca Alta). Vista hacia el suroeste.

Los cauces de las quebradas Venezuela, Los Incas, San Lázaro y Alameda Dolores, presentan modificaciones, estrechados por la construcción de pistas y viviendas; en algunos casos, se encuentran como “canal cubierto”, en los tramos que

atravesan la ciudad de Arequipa; también son estrechados por el arrimado de material de desmonte y basura en sus cuencas altas (fotografías 6.8 y 6.9).



Fotografía 6.8 Quebrada San Lázaro, cuyo cauce está obstruido con un puente vehicular.



Fotografía 6.9 Cauce techado o "canal cubierto" de la quebrada Venezuela.

Las observaciones realizadas en las quebradas que cruzan los distritos de Mariano Melgar, Paucarpata, José Bustamante y Rivero, Sabandía, Characato, Socabaya y Mollebaya permiten describir el grado del impacto antropogénico que han sufrido:

- Una gran cantidad de las viviendas que se construyeron cerca de las quebradas y torrenteras se ubican sobre terrazas bajas y hasta en la llanura de inundación, donde ha sido necesario realizar obras de defensa ribereña y encauzamiento de la quebrada para mitigar los daños que podrían sufrir por el peligro al que se encuentran expuestas;

dentro de estas obras se tiene la construcción de muros de concreto.

- De forma general, se puede decir que los trabajos de encauzamiento de torrenteras y quebradas que bajan por estos distritos han sido realizados con poco o casi nada de planeamiento y diseño de obras; se pudo constatar que existen deficiencias que impiden cumplir al 100 % el drenaje del agua de precipitación pluvial (figura 6.18, fotografías 6.10-6.12).

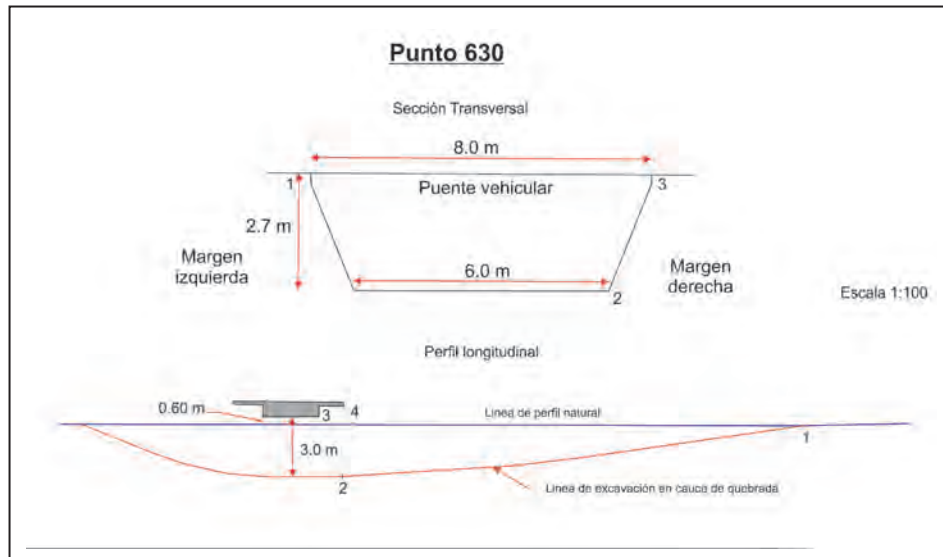


Figura 6.18 Sección transversal de la quebrada Pozo Negro en el distrito Paucarpata (punto de control n° 630) con poca profundidad del lecho de la quebrada, donde la construcción de un puente recto redujo la altura de la quebrada (por la colocación de vigas para sostener la plataforma del puente), y que ante la ocurrencia de lluvias que acarreen carga sólida, este puente serviría de dique y propiciaría la obstrucción del canal de la quebrada, lo que generaría desbordes que pudieren afectar las viviendas que se encuentran en sus márgenes. El tirante o altura de la sección de la quebrada en este punto es de aproximadamente 0.60 m con el puente construido. La solución adoptada por los constructores del puente fue alterar el perfil de equilibrio de la quebrada y realizar una excavación en el lecho del cauce por debajo del puente, conformado una concavidad que eleva el tirante de la sección hasta los 3 m, la que en tiempo de lluvias se colmata de agua y sedimentos, y no permite que discurra el caudal de agua.



Fotografía 6.10 Vista aguas arriba de la quebrada Pozo Negro, donde se observa la excavación realizada por debajo del puente vehicular.



Fotografía 6.11 Vista aguas abajo de la quebrada Pozo Negro, también es posible distinguir la excavación realizada por debajo del puente vehicular.



Fotografía 6.12 Vista donde se observa las marcas del agua en los estribos del puente, así como las bolsas de plástico y lodo que se acumula debajo de su estructura, los cuales marcan el nivel de carga que alcanza la quebrada por los flujos de lodo y agua que discurren por la quebrada.

- Los muros de encauzamiento de torrenteras han sido realizados de dos formas; la primera presenta solo el muro de concreto como elemento de protección (figura 6.19 y fotografía 6.13); y en la segunda se tiene un muro de concreto y un refuerzo de material arrimado en la cara posterior del muro (figura 6.20 y fotografía 6.14).

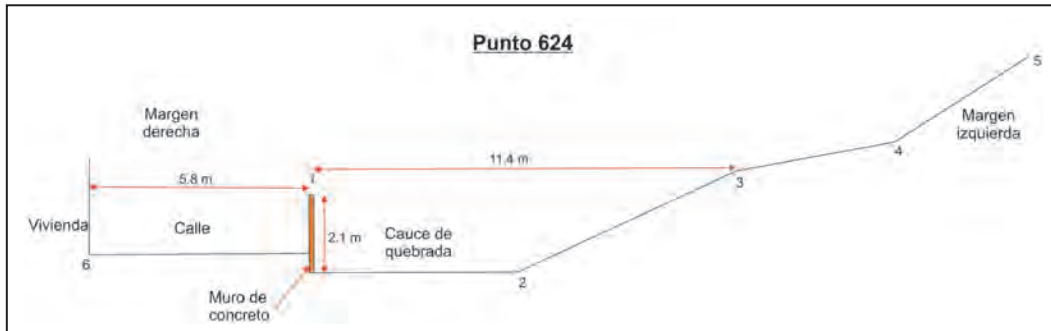


Figura 6.19 Sección transversal de torrentera en la cual se colocó un muro de encauzamiento en la margen derecha, donde se ubica la calle Torrentera y las viviendas (punto de control n° 624). La sección muestra que el nivel del lecho se encuentra a tan solo 0.50 m del nivel de la calle.



Fotografía 6.13 Vista aguas abajo de quebrada encauzada en la calle Torrentera (punto de control n° 624), se observa el muro de concreto y el desnivel existente entre la calle y el lecho de la quebrada. Vista con dirección hacia el suroeste.

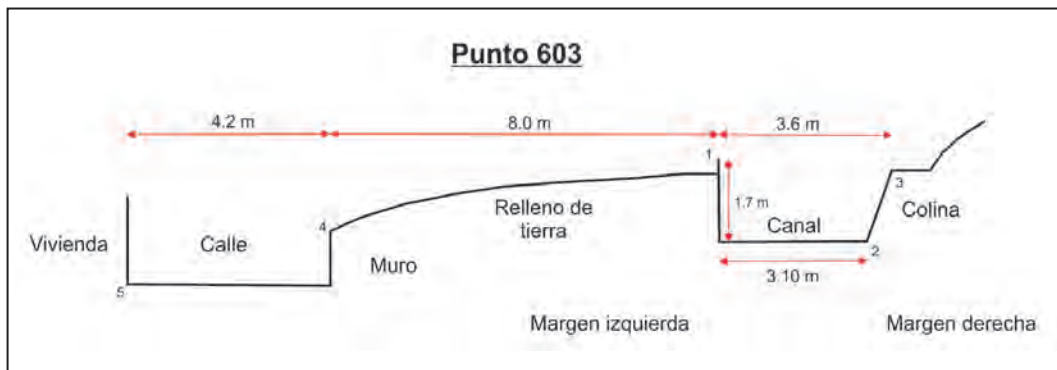


Figura 6.20 Sección transversal medida en la calle Capitán Novoa (punto de control n° 603), donde se puede observar el muro de encauzamiento de concreto y el relleno de tierra colocado en la cara posterior del muro; también, se puede observar claramente el nivel de la calle en el extremo izquierdo de la sección, que se encuentra por debajo del nivel del lecho actual de la quebrada.



Fotografía 6.14 Vista agua arriba de quebrada seca en la calle Capitán Novoa, donde se puede apreciar la ubicación del muro de concreto, el relleno y la calle (lado derecho de la fotografía). Vista con dirección hacia el sureste.

f) Se identificó la presencia de depósitos de flujos de detritos en el lado sur del distrito de Jacobo Hunter, en lo que vendría a constituir las zonas de expansión urbana del distrito; estas áreas no constituyen zonas seguras para la construcción de viviendas, parte de los lotes de vivienda demarcados se encuentran ubicados en conos de flujos de detritos antiguos. Los flujos son de corto recorrido, pero presentan acumulación de material proluvial importante. Por

otro lado, las laderas superiores a estas quebradas están constituidas por un intrusivo de tipo tonalita, afectada por una meteorización de tipo disyunción esferoidal, que separa los bloques de roca a través de las fracturas y los moldea con una forma circular, lo que puede facilitar su recorrido ladera abajo ante la presencia de fuertes lluvias o sismos, pudiendo aplastar todo lo que se encuentre ubicada ladera abajo (fotografías 6.15 y 6.16).



Fotografía 6.15 Quebrada seca de corto recorrido en cuyo cono proluvial y laderas con bloques sueltos, viene siendo ocupado por las viviendas de la Asociación de Viviendas La Rinconada, distrito Jacobo Hunter. Vista con dirección hacia el suroeste.



Fotografía 6.16 Tamaño alcanzado por los bolones subredondeados, producto de la disyunción esférica sobre las tonalitas. Este evento puede afectar a la Asociación de Vivienda La Rinconada, distrito Jacobo Hunter. Vista con dirección hacia el suroeste.

- g) En las zonas de expansión urbana en el extremo sureste de la ciudad de Arequipa, específicamente en los distritos de Quequeña y Mollebaya, se vienen desarrollando muy cerca de cursos de quebradas secas, incluso se interrumpe o corta

el mismo cauce; esto ocurre en la quebrada Churumpaya, donde las viviendas se construyeron dentro del mismo cauce seco de la quebrada (fotografía 6.17).



Fotografía 6.17 Vista aguas arriba de la quebrada Churumpaya, en donde las viviendas se vienen construyendo dentro del cauce de esta. Vista con dirección al este.

- h) En cuanto a los peligros geohidrológicos que se presentan con cierta recurrencia en la ciudad de Arequipa, se concluye que estos eventos no están asociados en general a la presencia del Fenómeno del Niño, puesto que la ocurrencia de lluvias extraordinarias de fuerte intensidad que se presentan durante el verano (meses de enero-abril) –la característica de estas lluvias es ser muy localizadas–, generan inundaciones y procesos de erosión fluvial; por

ejemplo, la lluvia ocurrida durante el verano del 2016, entre los distritos de Yanahuara y Cerro Colorado, que favoreció el aumento del caudal de la quebrada Chullo, encauzada con muros de concreto y ladrillo, así como por la construcción de viviendas que estrechan el cauce, con la consecuente destrucción total de una vivienda y la afectación de las bases de otra (fotografías 6.18 y 6.19).



Fotografía 6.18 y 6.19 Vista del mismo sector de la quebrada Chullo, encauzada con muros de concreto y viviendas, localizada en el cruce de las avenidas Pancho Fierro y Arequipa, tomadas con una diferencia temporal de 16 meses, donde es posible ver la intensidad de la erosión producida con la crecida de la quebrada en la temporada de lluvias del año 2016; se produjo la destrucción de una vivienda en la margen derecha, destrucción de muro de ladrillos en la margen izquierda y socavamiento de las bases de otra vivienda de cuatro pisos.

6.10.3 Secciones transversales medidas en los cauces de quebradas

Se realizó la medida de perfiles transversales a los cursos de las quebradas para obtener secciones de los canales que nos permitan observar las variaciones existentes en sus cursos, como los observados en la quebrada San Lázaro para el tramo que cruza la ciudad de Arequipa, que presenta un cauce antropogenizado (figura 6.21).

Los perfiles medidos a la altura del pasaje Chilina en el valle del río Chili presentan hasta siete terrazas, a primera vista consideradas como aluviales; sin embargo, teniendo en cuenta su forma y posición, estas terrazas corresponden a depósitos de ignimbritas de la Formación "Ignimbrita La Joya", que pudieron haberse formado por erosión fluvial del río Chili, que fue migrando desde su margen derecha a izquierda y a la

vez profundizando en el valle; sobre estas terrazas se realizan labores agrícolas las cuales cubren el substrato de ignimbrita.

En los perfiles transversales medidos en el valle del río Chili, entre el sector de Chapi Chico y Arancota (tramo de aproximadamente 14 km de longitud) (figura 6.21), es posible diferenciar cambios importantes en la morfología del terreno, controlada por la depositación de flujos piroclásticos, flujos de lava y flujos de detritos (lahar) provenientes de los volcanes Chachani y Misti, que acumularon una gran cantidad de material. El río Chili esculpió un valle profundo y formó paredes encañonadas, que posteriormente se va abriendo a un valle amplio de hasta 350 m de ancho, con acantilados subverticales de hasta 150 m de altura; en el tramo comprendido entre las zonas de Vallecito y Arancota, el valle del río Chili se abre y se observan terrazas bajas, sin presencia de grandes acantilados (figura 6.22).

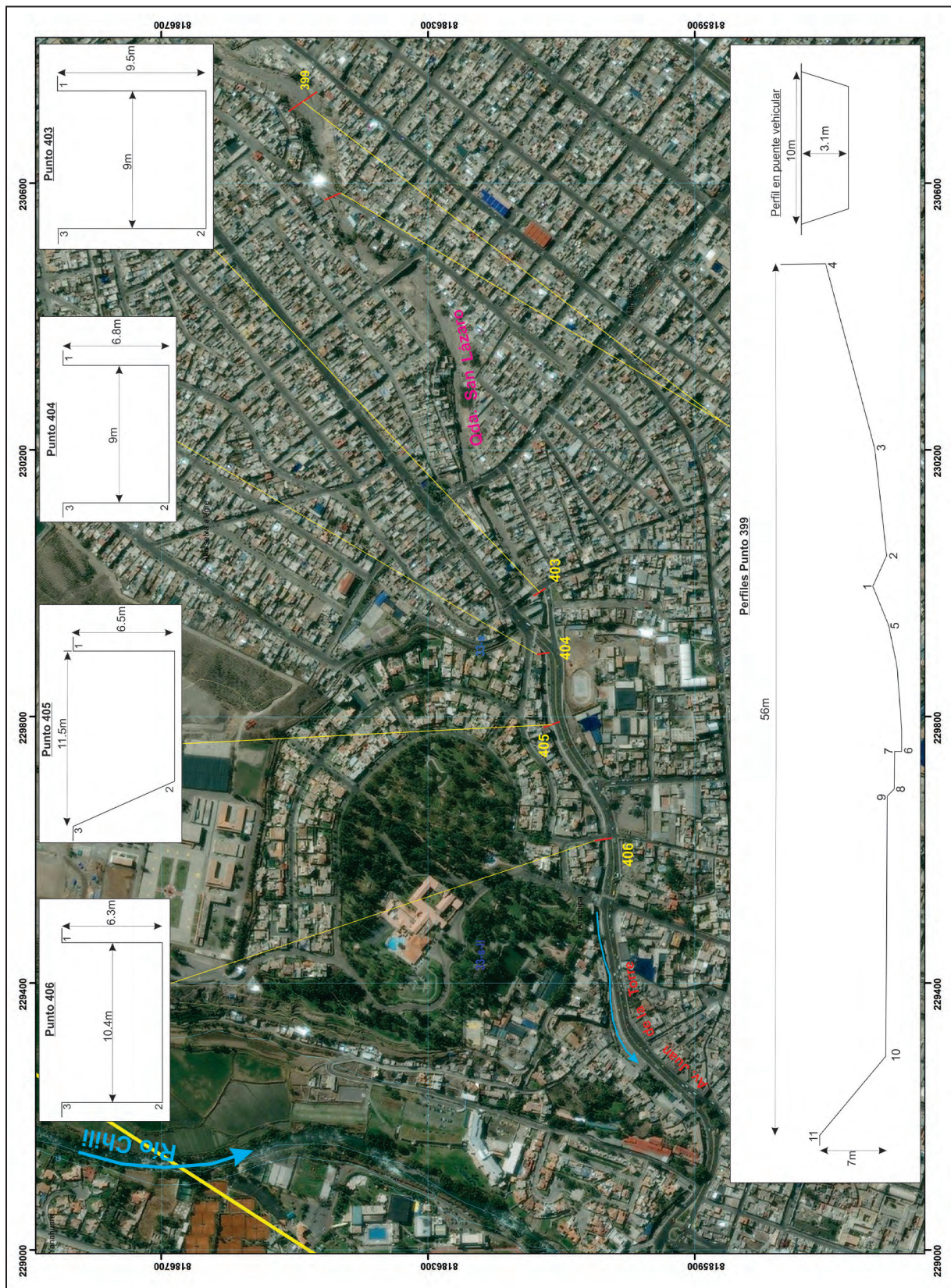


Figura 6.21 Ubicación de secciones transversales al curso de la quebrada San Lázaro.

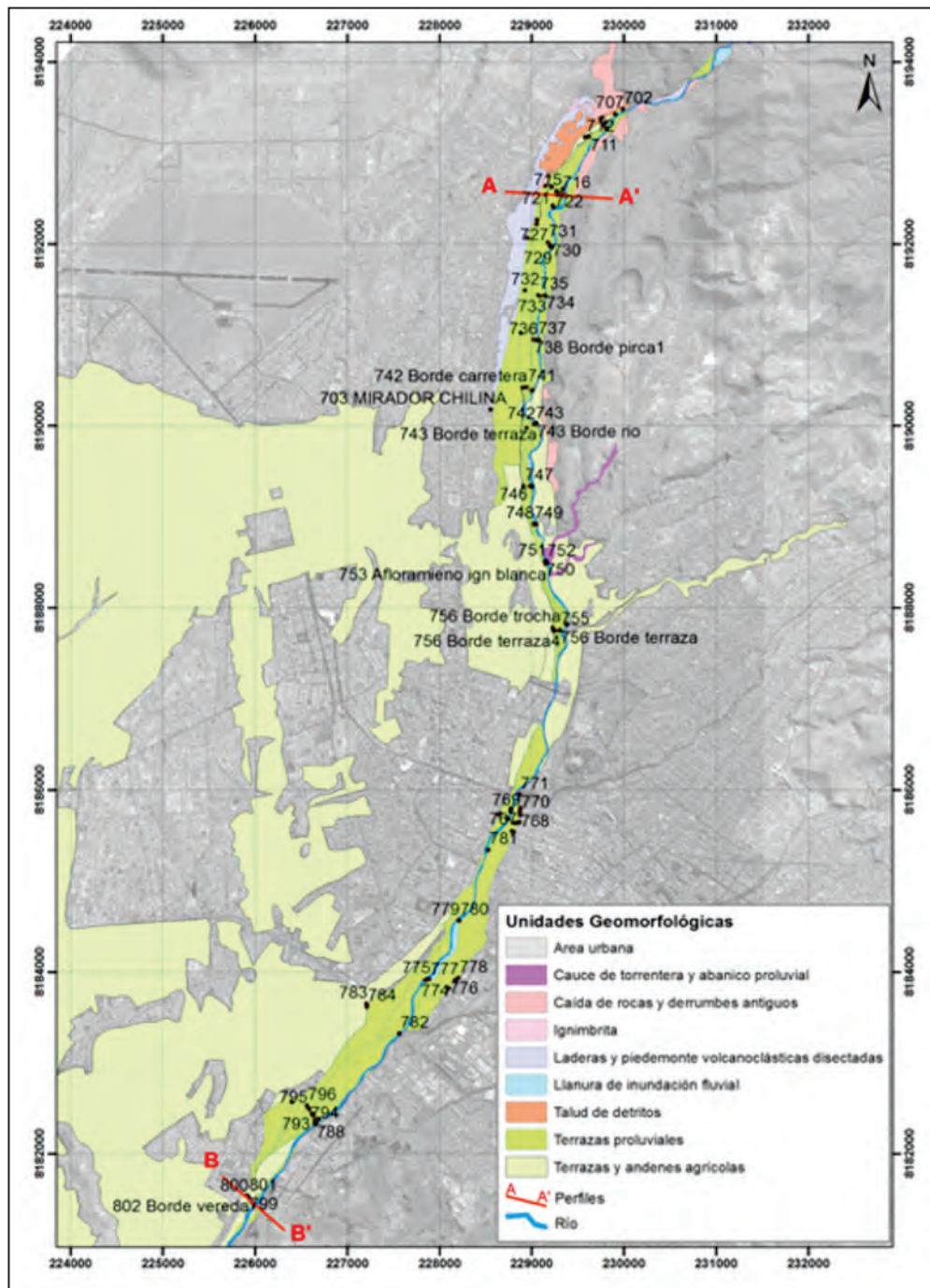


Figura 6.22 Mapa de ubicación de los perfiles transversales al río Chili, medidos en la zona de valle con terrazas altas y en Arancota.

En el perfil A-A' (figura 6.23), medido en el punto de control n° 719, localizado a 1.2 km aguas debajo del santuario de Chapi Chico, se puede observar hasta cuatro terrazas de cultivo en la margen izquierda, que alcanzan los 12.5 m de altura con respecto al valle; mientras en la margen derecha se tienen hasta seis terrazas, que se levantan hasta 20 m por encima del valle del río Chili. Todas estas terrazas se encuentran antropogenizadas, con trabajos de empircado con bloques de sillar.

En el perfil B-B' medido en la zona de Arancota (figura 2.24), se muestra un valle más amplio con terrazas bajas, que alcanzan como altura máxima unos cinco metros en la margen derecha, con respecto al nivel de agua del río Chili. Esta zona se encuentra protegida por diques de enrocados y arrimado de material, que busca mitigar los daños posibles por eventos de inundación y erosión fluvial.

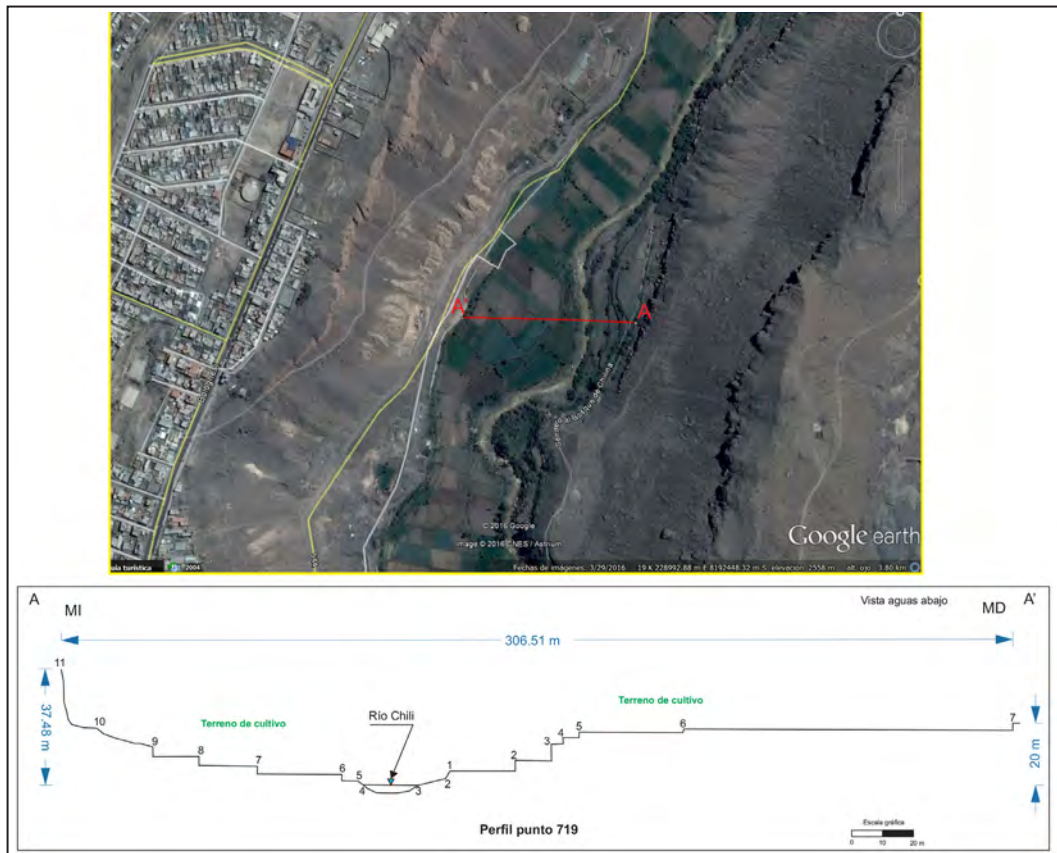


Figura 6.23 Perfil transversal al río Chili, en el cual es posible observar los niveles de terrazas en ambas márgenes.

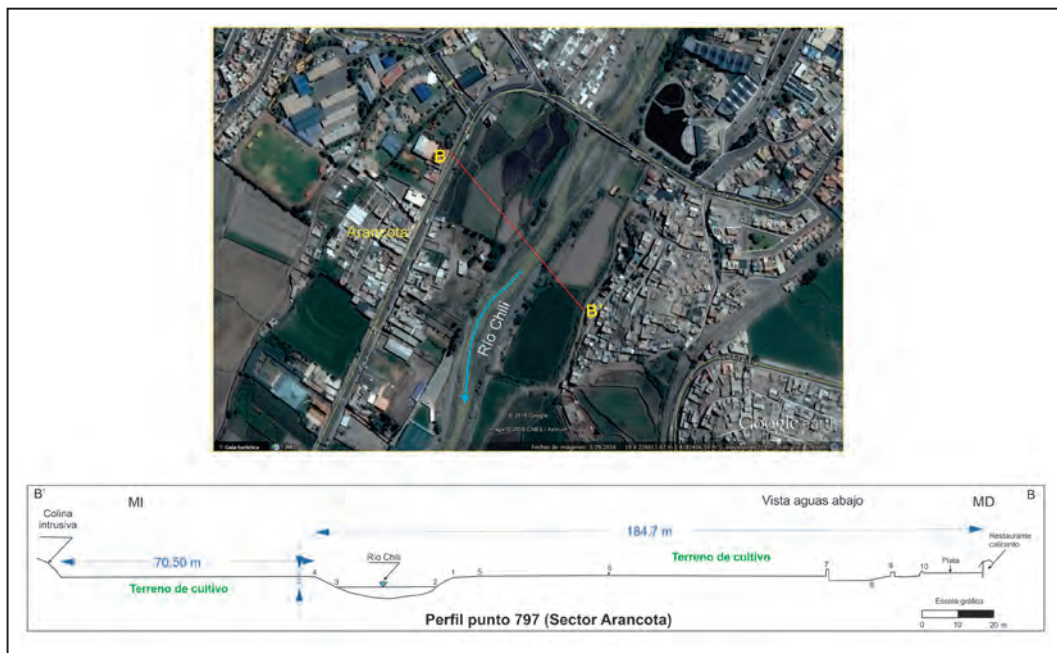


Figura 6.24 Perfil B-B', medido en el sector de Arancota, donde es posible observar las terrazas fluviales de menor altura en ambas márgenes del río Chili.

La morfología del valle del río Chili vuelve a cambiar en el sector de Congada, donde el valle alcanza un ancho máximo de 400 m, se va estrechando a una distancia de dos kilómetros aguas abajo en el sector de Estación Huayco a 290 m de ancho, aproximadamente, para luego 500 m más abajo sea estrechado

a tan solo 38 m, a la altura del pueblo tradicional El Huayco; el estrechamiento obedece a la presencia de rocas intrusivas de tipo gabro del Cretáceo Inferior, que ofrecen mayor resistencia a la erosión fluvial (figura 6.25).

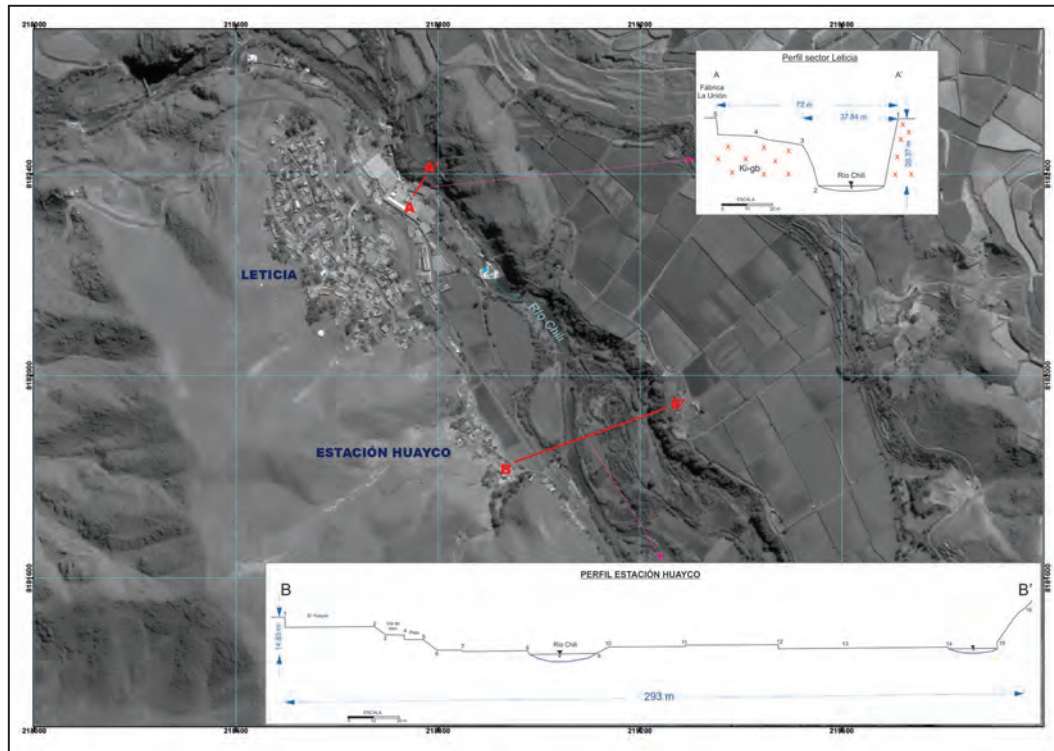


Figura 6.25 Ubicación de perfiles medidos en el cauce del río Chili, en donde es posible observar el estrechamiento del cauce de casi 300 m a tan solo 38 m en el sector del pueblo tradicional El Huayco.

6.11 ZONAS CRÍTICAS

Las zonas críticas son áreas o lugares que luego del análisis de la susceptibilidad a los procesos identificados y la vulnerabilidad a las que están expuestas las obras de infraestructura y centros poblados, se considera necesario ejecutar obras de prevención y/o mitigación; o en algunos casos las medidas adoptadas anteriormente necesitan ampliarse o mejorarse (Fidel *et al.*, 2006).

Para la identificación y descripción de “zonas críticas” en la ciudad Arequipa, se determinó el grado de peligro potencial individual y/o el análisis de densidad de ocurrencias de peligros potenciales en un área o sector, donde se exponen

infraestructura o poblaciones, vulnerables a uno o más peligros geológicos.

Como complemento del informe técnico Zonas críticas de la cuenca del río Quilca-Vitor-Chili” (Zavala *et al.*, inédito) y el “Estudio de peligro geológico en la región Arequipa” (Luque y Rosado, inédito), se han identificado 23 zonas críticas que se encuentran dentro de la zona de estudio (figura 6.26). En el cuadro 6.2 se describen sucintamente las características de cada una de estas zonas como los peligros identificados, los daños y zonas afectadas y algunas recomendaciones. Los códigos asignados a las zonas críticas corresponden al estudio de peligros geológicos realizado a nivel de la región Arequipa.

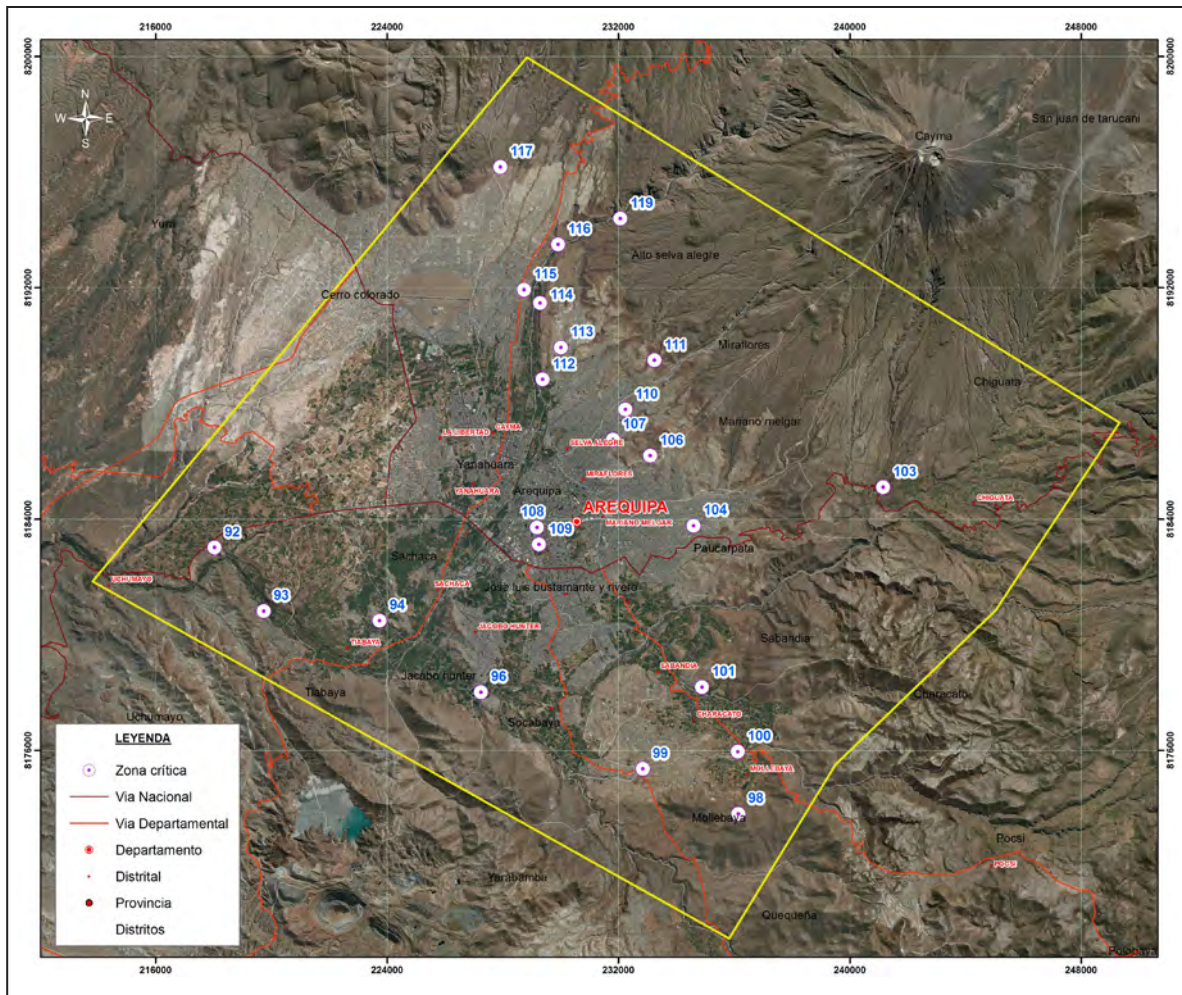


Figura 6.26 Zonas críticas de la ciudad de Arequipa.

Cuadro 6.2
Zonas críticas en la ciudad de Arequipa

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
92. Casa Blanca (Uchumayo)	Área sujeta a caída de rocas. Las rocas presentan un diaclasamiento con orientación favorable a la pendiente. Terreno con pendiente media. Sin vegetación. Otro factor que ha influenciado es el corte de talud de carretera y de canal, que ha desestabilizado en parte al talud.	El tramo afectado tiene una longitud de 1500 m, por sectores. Presenta alturas no mayores a los 40 m. También afectaría al canal de regadío	Mantener el sistema de sostenimiento. Desatar bloques sueltos. Forestar.
93. Congata-Estación Huayco (Uchumayo)	Área sujeta a caída de rocas. Causas: sustrato de mala calidad, rocas muy fracturadas con orientación desfavorable, pendiente fuerte de terreno, ausencia de vegetación. Ladera conformada por derrames lávicos, con longitud de arranque de 130 m y altura 30 m. Zona con ocupación antrópica. Se aprecia que las bases de las viviendas están construidas con pircas, lo cual las vuelve inestable.	Afectaría 10 viviendas y 200 m de vía férrea.	Forestar. Desquinche de bloques sueltos y medidas de sostenimiento. Mejorar el sistema constructivo de las bases de las viviendas.
94. Cerro Buenavista/Cerro San Pedro (Tiabaya)	Área sujeta a caída de rocas. En estos cerros, la población ha ocupado las laderas en una forma inadecuada. Han construido sus viviendas con cimientos a base de muros secos (pircas). Las rocas están formadas por intrusivos muy fracturados; esto genera cierta inestabilidad. Se aprecian antiguas caídas de rocas, como depósitos de canchales, ocupados por la población. Un flanco del cerro San Pedro está siendo lotizado para la construcción de viviendas. Se han realizado cortes en el talud, lo que puede generar cierta inestabilidad. En caso de un sismo es muy posible que se generen caídas de rocas, o derrumbes de los muros secos.	Si ocurriera un movimiento sísmico afectaría a las viviendas y el camino rural que ocupan los terrenos de estos cerros.	Mejorar el sistema constructivo de las viviendas. No realizar cortes inadecuados de talud. No habitar en zonas inestables como en las zonas canchales. Para construir viviendas en las laderas de los cerros deben hacerse estudios geotécnicos y de estabilidad de taludes puntuales.
96. Puente La Marina de Socabaya (Socabaya)	Área sujeta a erosión fluvial e inundación. Terrazas conformadas por gravas y bloques englobados en una matriz arenolimososa; presencia de relleno en la margen derecha que ha estrechado el cauce. La longitud que puede erosionarse es de 425 m. Este fenómeno puede ocurrir por lluvias ocasionales o de tipo excepcional. En 1980, se produjo una inundación a raíz de la obturación del puente, se formó una represa y el agua se desbordó por ambas márgenes.	Puede afectar a terrenos de cultivo y el puente La Marina. El puente tiene defensas ribereñas.	Limpieza del cauce. No arrojar desmonte y basura a los bordes del río.
98. Cerro Pajonal. Carretera a Chapi (Mollebaya)	Área sujeta a caída de rocas, flujos de lodo y erosión de laderas (cárcavas). Se presenta un sustrato de mala calidad conformado por depósitos piroclásticos, estos terrenos dan pendiente moderada. Estas se activan en tiempos de lluvias, y por sus pequeños cauces se pueden generar flujos de detritos y/o lodo.	La profundización de la erosión afecta a la carretera en una longitud de 200 m. y a terrenos de cultivo.	Forestar las laderas. Construir cunetas y badenes en la carretera.

Continuación...

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
99. Honorio Zevallos Games, río Machahuay (Mollebaya)	Área sujeta a erosión fluvial. Terrazas conformadas por rocas de fácil erosión. Dinámica fluvial del río Machahuay.	De continuar la erosión podría afectar la estructura del puente. Afecta directamente a terrenos de cultivo. La longitud que puede erosionarse es de 350 m; este fenómeno se presenta en ambas márgenes	Mejorar el enrocado en la margen derecha y enrocar la margen izquierda del puente.
100. Mollebaya (Mollebamba/Characato)	Área sujeta a erosión fluvial y derrumbes. Causas: naturaleza de suelo, pendiente de terreno, ausencia de vegetación y dinámica fluvial. Planicie donde se observa niveles de terrazas que son erosionados en ambas márgenes. También se generan derrumbes. (fotografía 6.20)	Puede afectar al canal que se encuentra en la margen izquierda del río y cultivos.	Limpieza del cauce, mejorar los muros de contención.
101. Cerro Quisco (Sabandia)	Área sujeta a erosión de laderas y flujos de detritos. Rocas volcánicas del tipo tobos, de mala calidad, de fácil erosión, que ante lluvias son de fácil erosión. Los terrenos presentan pendiente moderada y están desprovistos de vegetación. Se pueden generar flujos de lodo.	Compromete viviendas y terrenos de cultivos	Forestar. En las zonas acentuadas con erosiones colocar muros, con el fin de atenuar la erosión.
103. La Calera - Canal Cangallo - Río Andamayo, Paucarpata-Chiguata-Sabandia (Paucarpata)	Área sujeta a derrumbes, erosión de laderas y flujo de detritos. Substrato de mala calidad, ausencia de vegetación, pendiente de terreno, dinámica fluvial. Los factores detonantes son los movimientos sísmicos y precipitaciones pluviales. Se observa derrumbes antiguos ocurridos en la confluencia del río Andamayo y el canal Cangallo, eventos con longitud de arranque hasta de 300 m y altura de 20 m. Las quebradas son alimentadas por erosiones en cárcavas y estos generan flujos de detritos. Los depósitos dejados por los flujos son utilizados como canteras de agregados.	Los eventos afectarían tramo de carretera, puente y cultivos. Puede represar al río Andamayo.	Realizar medidas de sostenimiento, excavaciones con criterio técnico para no desestabilizar el talud y forestar.
104. Miguel Grau - Ciudad Blanca, Paucarpata (Paucarpata)	Área sujeta a flujos de detritos. Causas: Pendiente de terreno, ausencia de vegetación y como factor detonante precipitaciones. Quebrada con material suelto antiguo sin indicios de presencia de flujos modernos. El cauce es utilizado como botaderos de desmonte y residuos sólidos (basura). Se genera erosión antrópica por la presencia de ladrilleras.	De presentarse lluvias excepcionales, podría afectar viviendas que se encuentra situadas en el cauce.	Forestar la zona, canalizar la quebrada y limpieza del cauce.

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
<p>106. La Rinconada, El Mirador, Villa Alto Cenepa, Mariano Bustamante (Miraflores/Mariano Melgar)</p>	<p>Área sujeta a caída de rocas, erosión de laderas y flujo de detritos. Las rocas son de mala calidad (tobas), presentan una orientación favorable a la pendiente, en cauce de la quebrada se encuentra material de remoción antiguo. En las laderas se observa ausencia de vegetación. La ciudad de Arequipa sigue su progresivo movimiento de expansión acelerada hacia las cabeceras de las torrenteras sin ninguna planificación urbana, muchas de ellas se encuentran en pleno cauce de estas torrenteras. Caídas de rocas por sectores, se observan depósitos antiguos de caídas acumulados como canchales, con fragmentos de roca hasta de 0.5 m. También se presenta erosión de laderas. Los fenómenos mencionados aportan material a las torrenteras Venezuela y Los Incas y en caso de lluvias excepcionales pueden generar flujos. En sectores de la torrentera se observó canteras que han removido el material del cauce, que es de fácil transporte. Se observó también secuencias de antiguos lahares provenientes del Misti.</p>	<p>Podría afectar viviendas construidas dentro del cauce de la torrentera y en las laderas de los cerros, colegio en las laderas de los cerros, colegio Didascalfo San José.</p>	<p>Forestar ladera. Mejorar sistema constructivo de viviendas. Canalizar totalmente la torrentera. No ubicar viviendas en el cauce de la torrentera, las que se encuentran dentro de ella reubicarlas. No construir nuevas viviendas dentro de la torrentera.</p>
<p>107. Puente Amao-Tahuantinsuyo (Miraflores)</p>	<p>Área sujeta a caída de rocas y flujo de detritos. Roca volcánica, con fracturamiento a favor de la pendiente, ladera con pendiente fuerte. Se observó la ausencia de vegetación, y corte de talud que ha desestabilizado el talud. Las fracturas de las rocas son de forma mixta. La zona afectada tiene una longitud de 125 m, su arranque irregular y discontinuo, la altura que pueden tener las caídas es menor a 20 m en la cabecera de la torrentera Venezuela (ramal 02). Para la instalación de servicios básicos de agua y desagüe, se han realizado trabajos de corte y relleno, donde se observados bloques sueltos al pie del talud. (figuras 6.27 y 6.28) Estos fenómenos se pueden presentar ante movimientos sísmicos o con fuertes precipitaciones pluviales.</p>	<p>Podría afectar a los transeuntes y carretera obstaculizando el tránsito, en un tramo de 125 m.</p>	<p>Desquinchar bloques sueltos. Medidas de sostenimiento, para ello requiere de estudios más detallados.</p>

Continuación...

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
<p>108. Torrentera Venezuela, Terminal Pesquero, puente Sepulveda (Miraflores)</p>	<p>Área sujeta a flujos de detritos y lodo, erosión fluvial e inundaciones pluviales. La expansión y rehabilitación urbana ha llevado a la desaparición de la torrentera, variándose las dimensiones de su cauce a lo largo de la Av. Venezuela. La torrentera está canalizada en forma incorrecta, han reducido su cauce natural. El 8 de febrero de 2013, en un solo día se registró 124.5 l/m² (SENAMHI), que saturaron los materiales involucrados e incrementaron material al flujo. El material descendió bruscamente por la torrentera Venezuela y se canalizó por un cauce relativamente angosto (ancho promedio de 9 a 3 m, el cual lo rebasó), arrancando además maleza e incorporando el material de desmontes y basura, en algunos sectores se represó debido a las pequeñas luces de los puentes que cruzan la Av. Venezuela, los cuales fueron obstaculizados por la basura y material acarreado por el flujo (figuras 6.29 al 6.33). A esto se suma la falta de drenaje pluvial en las calles con pendiente moderada, el cual incrementó la inundación de los desagües por colapso de buzones.</p>	<p>Afectó C.C. La Negrita y Mercado Don Manuel, Tramo de la Av. Venezuela aproximadamente 135 m de longitud, al frente de la Facultad de Administración de la UNSA, terminal pesquero y mercado El Palomar, viviendas del cuartel Salaverry, tuberías de agua potable, puente Sepulveda, puente Vidal Ranzara, puente Vidaurrazaga, y terrenos ENAFER.</p>	<p>Reubicar viviendas aledañas a las riberas de las torrenteras, sobre todo las viviendas ubicadas en la urbanización Juan el Bueno entre las calles Jacinto Ibáñez y Vidaurrazaga. Elaborar un proyecto integral de alcantarillado para aguas de lluvias (drenaje pluvial). Limpiar las luces de los puentes, Reforestar las cabeceras de las torrenteras. Actualizar catastro de la ciudad metropolitana, así como un mapa topográfico base a detalle para realizar una buena planificación. Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) integrado y sostenible en el tiempo (ubicación de más estaciones pluviométricas). Se debe prohibir la construcción de viviendas en zonas de terreno rellenados (desmonte), expuestas a inundaciones, muy cerca de las márgenes del cauce de las torrenteras.</p>
<p>109. Torrentera Los Incas, puente Andrés Avelino Cáceres, puente Ernesto Gunther (Alto Selva Alegre)</p>	<p>Área sujeta a flujos de detritos y flujo de lodo, erosión fluvial e inundaciones pluviales. Como producto de las lluvias excepcionales del 08/02/2013 se produjo flujos de lodo, desbordes e inundaciones pluviales, debido al abundante material suelto en la cabecera de la torrentera, el arroyo de basura, desmontes en el cauce de la torrentera y reducción del cauce de la torrentera de 13 a 4 m, aguas abajo generó severos daños en el área urbana de Arequipa. El acarreo de basura y escombros obstruyó las luces de los puentes que cortan esta torrentera originando en muchos sectores desbordes. En los sectores Las Peñas y Solidaridad el ancho del cauce es de 14.3 m, el cual se encuentra colmatado, y el dique transversal está muy socavado, presenta erosión fluvial en la margen izquierda. Paralelamente ocurrieron procesos similares en las torrenteras contiguas. (figura 6.34)</p>	<p>Puede afectar puente Ernesto Gunther (Av. Arturo Ibáñez, puente contiguo al Centro Comercial Gran Terminal del Sur El Altiplano hasta el Terminal Terrestre, mercado Mariscal Castilla en la Av. Los Incas, viviendas alrededores de la torrentera.</p>	<p>Elaborar un proyecto integral de alcantarillado para aguas de lluvias (drenaje pluvial). Limpieza de cauce, de igual manera, la luz libre bajo el Puente con Av. Andrés Avelino Cáceres se encuentra colmatada, no existe la luz suficiente, por lo que es necesario retirar dicho material. Reubicar viviendas aledañas a las riberas de las torrenteras. Actualizar catastro de la ciudad metropolitana, así como un mapa topográfico base a detalle para realizar una buena planificación. Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) integrado y sostenible en el tiempo (ubicación de más estaciones pluviométricas). Se debe prohibir la construcción de viviendas en zonas de terreno rellenados (desmonte), expuestas a inundaciones, muy cerca de las márgenes del cauce de las torrenteras.</p>



Fotografía 6.20 Río Yarabamba. Botadero de desmonte en la margen derecha que estrecha su cauce.

Fuente: Zavala, 2012.



Figura 6.27 Cabecera de la torrentera Venezuela, presenta derrumbes, caída de rocas, erosión de laderas que en época de lluvias excepcionales como las del 08/02/2013 discurren huaicos por las laderas con material suelto, aportando material al cauce de la torrentera, además del mal diseño de obras, como se aprecia en la fotografía del lado izquierdo en el sector Mariano Bustamante, Villa Alto Cenepa; derrumbes y huaicos en el A. H. Villa El Triunfo.



Figura 6.28 a) caída de rocas en el puente Arnao Tahuantinsuyo; b) fuerte erosión y colapso de muros de viviendas dentro del cauce de la torrentera, puente Arnao.



Figura 6.29 Flujo de detritos en la torrentera y derrumbes en ambas márgenes de la torrentera, cabecera de la torrentera Venezuela, sector San Juan XXIII, confluencia de ramal I y II.



Figura 6.30 a) colapso de muros de contención en la margen izquierda de torrentera, con pérdida de plataforma de la calle Virgen del Pilar, descubriendo un muro antiguo a más de 1 m detrás del actual con 17 m de ancho; b) colapso de muros de los puestos del mercado del Altiplano; c) el cauce de la torrentera se ha estrechado a 4.54 m, por construcción de edificaciones, por efecto del flujo socavó los cimientos del muro de contención en la margen izquierda, generando el colapso de las columnas de la fábrica textil y rebose en ambas márgenes, en el pasaje Victoria; el puente en forma de arco a 11 m aguas abajo tiene un ancho de 3.78 m, el cual estranguló aún más la torrentera; d) en la intersección de la Av. Venezuela con el pasaje Jacinto Ibáñez, en la margen derecha de la torrentera, frente a la urbanización Juan El Bueno, se encuentran ubicadas 6 viviendas, que han invadido el cauce natural de la torrentera; el 08 de febrero de 2015, se incrementó el caudal de la torrentera, se represó el cauce a la altura del puente Vidaurrazaga (letrero de centro comercial), al desfogar erosionó 93 m en su margen derecha; e) cauce de torrentera, invadido por edificaciones.



Figura 6.31 Erosión de la vía izquierda de la Av. Venezuela hasta la berma central; por la margen derecha de la torrentera Venezuela afectó aproximadamente 135 m de longitud. El canal se había reducido a un ancho de 11 m.



Figura 6.32 Vistas del estrangulamiento del cauce de la torrentera Venezuela, afectado por inundaciones de lodo; el depósito de flujo de lodo alcanzó hasta 1 m de altura.



Figura 6.33 En la izquierda, vista aérea del sector del Terminal Pesquero, se observa la reducción del cauce en forma escalonada de 6 a 3 m de ancho. En la derecha, ampliación de la vista, se puede observar la erosión en la margen izquierda de la torrentera Venezuela.



Figura 6.34 a y b) las cabeceras de las torrenteras se encuentran afectadas por deslizamientos y flujos; además, los cauces se encuentran colmatados de material, sector La Rinconada, distrito Mariano Melgar; c y d) presenta erosión de la vía asfaltada en la Av. Venezuela, a la altura del mercado Mariscal Castilla, debido al socavamiento de los cimientos de muros de sillar, llegaron a colapsar; e) av. Los Incas y Agricultura (altura de la Gerencia Regional de Salud); estrechamiento del cauce por obras del *by pass*, de 13 a 4 m de ancho, con muros de contención de 4.5 m de alto.

Continuación...

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
<p>110. Quebrada San Lázaro, Puente Ricardo Palma, quebrada Honda/ Churupara, Peregrinos de Chapi (Miraflores/Mariano Melgar)</p>	<p>Área sujeta a flujos de detritos, erosión fluvial. El cauce de la torrentera San Lázaro se encuentra con material suelto, generado por las labores antiguas y actuales de canteras (agregados), desmonte y basurales. A lo largo del cauce de la torrentera se han construido edificaciones que han reducido el mismo. En caso de lluvias excepcionales se podrían generar flujos de detritos que se desplazarían a lo largo del cauce de la torrentera como el ocurrido el 08/02/2013. Sobre el cauce de la quebrada Honda/Churupara está asentado el poblado de Los Peregrinos de Chapi. Se tienen algunas canteras (ladrilleras), que han removido el cauce de la quebrada, originando material suelto. Aguas abajo, frente a la edificación de la empresa Michell & Cia. S.A., se encuentran 03 árboles de gran tamaño en pleno cauce de la quebrada y que constituyen barreras que podrían embalsar el agua y posteriormente causar inundaciones. Bajo el puente que conduce a la urbanización Paisajista, existe gran cantidad de material que ha disminuido la luz libre de este puente, representando un peligro. (figura 6.35, fotografía 6.21)</p>	<p>Afectó edificaciones ubicadas a lo largo de la torrentera y quebrada, como también vías de acceso y puentes.</p>	<p>Canalizar el cauce de la quebrada y limpieza. No eliminar desmonte y residuos sólidos al cauce de torrentera. No construir más viviendas en el cauce y en los bordes de la torrentera. Reubicar viviendas ubicadas en el cauce.</p>
<p>111. Margen izquierda de la quebrada San Lázaro (Alto Selva Alegre)</p>	<p>Área sujeta a caída de rocas. Roca de tipo volcánica, presenta un diaclasamiento con orientación favorable a la pendiente, terreno con pendiente fuerte. Al pie del talud se encuentran ubicadas viviendas.</p>	<p>Por desprendimiento de rocas pueden ser afectadas viviendas y camino rural.</p>	<p>Forestar las laderas. Desatar o desquincar bloques sueltos o inestables con sismo. No realizar corte inadecuado en el talud. No construir más viviendas en la ladera del cerro.</p>
<p>112. Torrentera Chilina (Alto Selva Alegre)</p>	<p>Área sujeta a derrumbes, flujos de detritos y erosión fluvial. Substrato rocoso de mala calidad, diaclasas con orientación desfavorable, terreno con fuerte pendiente, ausencia de vegetación. Cuando se presentan flujos o huacos se produce erosión fluvial en ambas márgenes, como factores detonantes las precipitaciones pluviales y sismos. Las caídas de rocas se presentan en la margen izquierda de la quebrada; se pueden generar derrumbes y erosión de laderas (cárcavas). Estos fenómenos alimentan con material suelto a la torrentera que en caso de lluvias excepcionales puede generar flujo. (fotografía 6.22)</p>	<p>Afectaría terrenos de cultivo, viviendas que se ubican próximos al talud y carretera de acceso. Existen algunas canteras en el cauce de la torrentera que están removiendo el material del cauce.</p>	<p>Forestar. Canalizar cauce de la torrentera. Muros de contención hacia la margen izquierda, completar el muro de contención. No permitir el crecimiento urbano hacia el cauce de la torrentera.</p>

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
113. Quebrada Peral/Milla Ecológica Sector D (Alto Selva Alegre)	<p>Área sujeta a flujo de detritos y caída de rocas. Las causas de los flujos son un cauce con material suelto incompetente de fácil vegetación, ausencia de vegetación, pendiente de terreno. El fenómeno puede desencadenarse con lluvias ocasionales a excepcionales. También se presentan erosiones de ladera. Sobre el cauce de la quebrada se tienen viviendas y terrenos de cultivo.</p> <p>Esta quebrada tiene sus nacientes en el volcán Pichu Pichu.</p> <p>Área sujeta a caída de rocas, como causas tenemos diclasamiento favorable a la pendiente, ausencia de vegetación, ladera pendiente fuerte.</p> <p>En este sector si se presentaran movimientos sísmicos o intensas precipitaciones pluviales es muy probable que el fenómeno se reactive. Las rocas son de tipo volcánico, andesítico.</p> <p>La forma de arranque de la caída es regular y discontinua, con longitud de 200 m y altura 50 m.</p> <p>En la parte inferior del talud se tienen viviendas. (fotografía 6.23)</p>	<p>De presentarse el fenómeno afectaría viviendas, canal de riego y áreas de cultivo.</p>	<p>Canalizar desde las partes altas, muros de atenuación de flujos a lo largo de la quebrada.</p> <p>Reubicar viviendas situadas al pie del cerro.</p> <p>Forestar las laderas.</p>
114. Margen izquierda del río Chili (Alto Selva Alegre)	<p>Área sujeta a caída de rocas.</p> <p>Causas: substrato fracturado compuesto por derrames lávicos, pendiente muy fuerte de terreno, ausencia de vegetación, corte natural de talud por dinámica fluvial, lluvias y movimiento sísmico. (fotografía 6.24)</p>	<p>Fenómeno que afectaría terrenos de cultivo, torres de alta tensión y provocaría el represamiento de cauce del río Chili.</p>	<p>Forestar la zona, colocar muro de contención.</p> <p>Mantener monitoreado el área.</p>
115. Margen derecha del río Chili (Cayma)	<p>Área susceptible a derrumbes y caída de rocas.</p> <p>Causas: substrato de mala calidad compuesto por depósitos de flujos, derrames lávicos, con pendiente abrupta, ausencia de vegetación. Por corte de talud se ha desestabilizado.</p> <p>En el sismo del 2001, se presentaron derrumbes y caídas de rocas que afectaron a la carretera de acceso a la central hidroeléctrica.</p>	<p>Afectó la carretera de acceso a la central hidroeléctrica de Charcani en una extensión de 3 km, por sectores. Puede afectar torres de alta tensión y terrenos de cultivo.</p>	<p>Forestar.</p> <p>Construir muros de contención.</p> <p>Desatar bloques sueltos</p>
116. Margen derecha del río Chili (Cayma)	<p>Área sujeta a caída rocas y derrumbes.</p> <p>Causas: ausencia de vegetación, pendiente del terreno (cañón), dinámica fluvial y substrato fracturado compuesto por derrames lávicos. Los factores detonantes son sismos y precipitaciones pluviales. El área involucrada tiene una longitud de 1200 m y presentan alturas no mayores de 30 m.</p>	<p>El fenómeno afectaría torres de alta tensión y podría represar el cauce del río Chili.</p>	<p>Forestar la zona.</p> <p>Desatar los bloques sueltos, colocar muro de contención.</p> <p>Realizar estudios detallados para estabilidad de taludes.</p>

Continuación...

Paraje / sector (distrito)	Peligro geológico / comentario geodinámico	Vulnerabilidad y/o daños ocasionados	Recomendaciones
117. Quebrada El Azufra - Fundo Cabrería (Cerro Colorado)	Área sujeta a flujo de detritos. Se aprecia un flujo antiguo que contiene material grueso mayor al 50 %, los flujos más modernos son de menores dimensiones. Esto se genera en épocas de precipitaciones excepcionales. Actualmente en las márgenes del cauce de la quebrada, se están construyendo viviendas, recientemente urbanizadas (Fundo Cabrería). También se apreció explotación de agregados (canteras), que están dejando material removido en todo el cauce de la quebrada. Se aprecian antiguos depósitos de lahares provenientes del Chachani. (fotografía 6.25)	Afectaría viviendas y carreteras afirmadas.	Forestar. Canalizar la quebrada, desde aguas arriba. Colocar muros de atenuación de flujos en el sector de Cabrería. No continuar la expansión urbana hacia los cauces de la torrentera.
119. Río Chill/Central Hidroeléctrica Charcani (Alto Selva Alegre)	Área sujeta a caída de rocas, derrumbes, flujos de detritos y deslizamientos. Rocas volcánicas (lavas y tobos) fracturadas que muestra inestabilidad. Se identificaron derrumbes y deslizamientos antiguos y modernos. Por corte de talud en muchos sectores se presentaron caídas de rocas y derrumbes (sismo del 2001). Por lluvias de tipo excepcional se generaron flujos o avalanchas de detritos. Se observó que en los frentes de lava se generan caídas de rocas. Al parecer algunos deslizamientos de tipo traslacional se reactivaron con el sismo del 2001. (figura 6.36)	Afectaría instalaciones de las centrales hidroeléctricas, y carretera afirmada que comunica a las centrales hidroeléctricas y torres de alta tensión.	Realizar el desalado de rocas sueltas. Realizar estudios puntuales o locales para estabilizar taludes.



Figura 6.35 a) erosión en cárcavas y derrumbes en ambas márgenes de la quebrada San Lázaro (parte alta), aportan material suelto al cauce de la quebrada; b) presencia de canteras en el cauce de la quebrada San Lázaro, acumulan material suelto; c y d) viviendas ubicadas en el borde del acantilado, formado en la quebrada San Lázaro, algunas ya han colapsado; e) desmonte y basura acumulada en la parte alta de la quebrada San Lázaro; f) plataforma deportiva en terraza baja de la quebrada San Lázaro.



Fotografía 6.21 En la margen derecha de la quebrada San Lázaro, se aprecia una vivienda colapsada debido al incremento del caudal que ocasionan las lluvias excepcionales del 08/02/2013.



Fotografía 6.22 Sector Chilina, sujeta a derrumbes, flujos de detritos y erosión fluvial. Esta quebrada llega a desembocar en la ciudad de Arequipa. (fotografía: Zavala, 2012).



Fotografía 6.23 Flujo de detritos en la quebrada Peral por la presencia de lluvias excepcionales afectaría canal de riego y terrenos de cultivo. (fotografía: Zavala, 2012).



Fotografía 6.24 Río Chili (margen izquierda), se observa caída de rocas puede afectar cultivos y canal de regadío. (fotografía: Zavala, 2012)



Fotografía 6.25 Flujo de detritos en la quebrada Azufral - fundo Cabrería. (fotografía: Zavala, 2012).



Figura 6.36 Laderas y taludes propensos a caída de rocas y derrumbes en el cañón del río Chili (ambas márgenes) que obstaculizarían el tránsito y afectan las centrales hidroeléctricas en Charcani. (fotografía: Zavala, 2012).

6.12 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y PELIGROSIDAD

En este acápite se presenta el análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa y a los procesos de erosión e inundación fluvial, y el modelamiento numérico por flujos de detritos en la quebrada San Lázaro y el río Chili por la importancia y la recurrencia de este evento, con implicancias para la seguridad de la población arequipeña.

6.12.1 Susceptibilidad a movimientos en masa

El análisis de susceptibilidad a los movimientos en masa requiere de la combinación de diferentes factores que condicionan la ocurrencia de peligros de movimientos en masa (intrínsecos). La metodología utilizada es el modelo heurístico multivariado (Carrara *et al.*, 1995) que consiste en la combinación de factores o sobreposición de mapas temáticos con ayuda de un sistema de información geográfico (SIG), donde se asignan valores a cada parámetro condicionante; se hace un análisis cruzado de mapas y geoprocesamiento. El análisis SIG se realizó por medio del software ArcGis de ESRI, en su versión 10.4.1

6.12.1.1 Variables empleadas

Según el alcance y la escala de trabajo de este estudio, las variables empleadas fueron:

- 1) Características geológico-estructurales, a escala 1:25 000 del Ingemmet, al cual se delimitaron los límites de depósitos cuaternarios
- 2) Características geomorfológicas recopiladas en campo, a escala 1:10 000
- 3) Características hidrogeológicas basado en las litopermeabilidades de las unidades geológicas, escala 1:10 000
- 4) Pendiente de los terrenos obtenida a partir de un modelo de elevación digital (DEM), a escala 1:10 000
- 5) Cobertura vegetal y uso de suelo, elaborado a partir de los datos del Ministerio del Ambiente (2015), cuya escala original fue de 1: 2 000 000, con apoyo de imágenes satelitales WorldView, Geoeye y de la plataforma Google Earth.

Cada uno de los mapas temáticos o variables fue evaluado y ponderado por un grupo de expertos en el tema, considerando el grado de influencia que puedan tener cada una de estos en la generación de movimientos en masa (cuadro 6.3); asimismo,

se asignó diferentes pesos para las unidades diferenciadas en cada uno de los mapas temáticos en forma independiente (cuadro 6.4).

Cuadro 6.3
Ponderación de variables temáticas

Variable	Descripción	Peso
Geomorfología (GM)	Unidades geomorfológicas de acuerdo con su amplitud de relieve, altura relativa, pendiente y asociación morfogenética.	0.28
Litología (L)	Se estima la inestabilidad de los terrenos en función a las características litológicas de las unidades diferenciadas (substrato rocoso y depósitos inconsolidados).	0.27
Pendiente (P)	Seis rangos de pendiente de los terrenos, expresado en grados (0° a 90°).	0.2
Unidades hidrogeológicas (HG)	Diferenciación de unidades hidrogeológicas en función de su permeabilidad (acuíferos porosos no consolidados, acuíferos fisurados, acuitardos y acuícludos).	0.15
Cobertura vegetal y uso de suelo (CV)	Diferentes tipos de vegetación natural y cultivos. Se estima en forma cualitativa de acuerdo con la presencia o ausencia de cobertura vegetal. Se incluyen las áreas urbanas, lagunas y embalses.	0.1

El grado de susceptibilidad se obtuvo a partir de las interacciones entre los cinco mapas de factores temáticos (pendientes, litología, geomorfología, cobertura vegetal y uso de suelo e hidrogeología), con ayuda del SIG (ARCGIS 10.4.1, y sus herramientas Spatial Análisis y 3D Análisis), empleando la siguiente ecuación:

$$SMM = \frac{SG (0.28) + SL (0.27) + SP (0.20) + SH (0.15) + SCV}{(0.10)}$$

En donde:

SMM: Susceptibilidad a los movimientos en masa

SL: Susceptibilidad del parámetro litología

SP: Susceptibilidad del parámetro pendiente

SG: Susceptibilidad del parámetro geomorfología

SH: Susceptibilidad del parámetro hidrogeología

SCV: Susceptibilidad del parámetro cobertura vegetal y uso del suelo

El resultado de la operación matemática de capas se reclasifica en 5 rangos que representan la susceptibilidad a los movimientos en masa del área de estudio. Este modelo se valida con la cartografía de procesos dando como resultado el modelo final (mapa 4).

Cuadro 6.4
Variables consideradas y su susceptibilidad a los movimientos en masa en la ciudad de Arequipa

Susceptibilidad	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Pendiente	< 1°	1° - 5°	5° - 15° y > 45°	15° - 25°	25° - 45°
Geomorfología	<ul style="list-style-type: none"> • Terraza aluvial niveles 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. • Terraza aluvial antropizada. • Cauce seco de quebrada. • Llanura de inundación. • Cauce de río. • Cauce de río y quebrada antropizada. • Cauce seco de quebrada antropizada. • Colinas bajas antropizadas. • Cuenca seca de laguna. • Isla fluvial. • Isla fluvial intrusiva. • Llanura de inundación antropizada. • Planicie aluvial. • Planicie aluvial antropizada. • Planicie sedimentaria. • Reservorio de agua. • Terraza lacustre. • Terraza ignimbritica antropizada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Canal o cauce antrópico. • Cantera urbanizada. • Carcava antropizada. • Cauce de quebrada cubierto. • Colada de lavas. • Colada de lava antropizadas. • Colina intrusiva antropizada. • Colina metamórfica. • Colinas volcánicas lávicas. • Colinas volcánicas lávicas antropizadas. • Colinas y lomadas de avalancha de escombros. • Montaña metamórfica. • Monte isla. • Muros de encauzamiento de concreto. • Piedemonte poligénico antropizado. • Planicie sedimentaria antropizada. • Planicie volcánoclastica. • Planicie volcánoclastica antropizada. • Plataforma antrópica. • Superficie plana ignimbritica. • Superficie plana ignimbritica antropizada. • Superficie plana ignimbritica degradada antropizada. • Terraza proluvio-aluvial. • Terraza proluvio-aluvial antropizada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Botadero de basura. • Botadero de desmonte. • Cantera. • Colina intrusiva. • Colina volcánica ignimbritica antropizada. • Colina y lomada de avalancha de escombros antropizada. • Colinas sedimentarias. • Colinas volcánicas ignimbriticas. • Manto de arena. • Desmonte de cantera de sillar. • Dique transversal de tierra. • Domo y flujo de lava. • Escarpe ignimbritico antropizado. • Montaña intrusiva. • Montículo de áridos. • Muro de tierra. • Piedemonte glacio-fluvial. • Piedemonte poligénico colgado. • Piedemonte proluvio. • Piedemonte proluvio antropizado. • Piedemonte proluvio-aluvial. • Piedemonte proluvio-aluvial antropizado. • Piedemonte proluvio-aluvial disectado. • Piedemonte volcánoclastico disectado antropizado. • Superficie plana ignimbritica degradada. • Terraza antrópica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acantilado aluvial. • Acantilado aluvial antropizado. • Acantilado metamórfico. • Acantilado o frente de colada de lavas. • Acantilado sedimentario antropizado. • Cárcavas. • Cono deluvial • Cono deluvial antropizado. • Cono proluvio • Cono proluvio antropizado. • Borde o escarpa de terraza fluvio-aluvial. • Manto de proclastos. • Piedemonte coluvial antropizado. • Piedemonte coluvio-deluvial. • Piedemonte coluvio-deluvial antropizado. • Piedemonte deluvial. • Piedemonte proluvio-aluvial. • Piedemonte proluvio-aluvial antropizado. • Relleno antrópico. • Talud artificial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acantilado sedimentario. • Escarpe ignimbritico. • Escarpe volcánoclastico. • Escarpe volcánoclastico antropizado. • Piedemonte coluvial. • Zona de arranque de derrumbe. • Zona de arranque de deslizamiento.

Continuación...

Susceptibilidad	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Pendiente	< 1°	1° - 5°	5° - 15° y > 45°	15° - 25°	25° - 45°
Litología	<ul style="list-style-type: none"> • Rocas piroclásticas. • Gneis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos fluviales. • Dioritas, tonalitas, meladioritas, gabrodioritas, gabro. • Rocas piroclásticas (ignimbrita aeropuerto) • Secuencia lávica andesítica-dacítica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósitos aluviales (algo consolidados). • Depósitos proluviales. • Depósitos fluvio-glaciares del volcán Pichupichu. • Depósitos lacustrinos. • Granodioritas (rocas intrusivas - Súper Unidad Tiabaya). • Dioritas, tonalitas, meladioritas, gabrodioritas, gabro, alterados. • Secuencia lávica andesítica-dacítica, alterada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósito volcánico y volcanoclástico. • Depósito coluvial. • Depósitos proluviales. • Depósitos deluviales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósito volcanoclástico resientes, sueltos. • Granodioritas alteradas
Cobertura Vegetal y uso de suelo	<ul style="list-style-type: none"> • Ciudad (centro poblado). 	<ul style="list-style-type: none"> • Agricultura costera y andina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Matorral arbustivo. • Agricultura costera y andina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pajonal altoandino. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desierto costero.
Hidrogeología	<ul style="list-style-type: none"> • Acuífero poroso no consolidado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acuífero poroso volcánico. • Acuífero metamórfico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acuífero fisurado volcánico. • Acuífero volcánico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acuífero intrusivo. • Acuífero volcánico. 	

Fuente: Ingemmet

6.12.1.2 Grados de susceptibilidad

El mapa resultante presenta cinco rangos de susceptibilidad: **muy baja, baja, media, alta y muy alta**, cuya descripción de cada una de ellas es la siguiente:

Susceptibilidad muy baja

Abarca 4.2 % del área de estudio (23.5 km²), corresponde generalmente a terrenos de pendiente muy baja, con escasos o ningún indicio de ocurrencia de eventos antiguos; asociados a rocas de tipo gneis y flujos piroclásticos soldados. Se distinguen algunos sectores a lo largo de los valles de los ríos Chili y Socabaya, principalmente terrenos ubicados dentro de llanuras inundables y terrazas bajas. En el mapa puede ser reconocida por el color verde claro.

Esta zona de muy baja susceptibilidad puede ser alcanzada por las porciones finales o frentes de flujos de detritos o lodo generados en zonas ubicadas a mayor altitud. Los materiales acarreados por estos flujos se depositan en estas zonas planas.

Es imprescindible realizar, en esta zona, una evaluación por procesos geohidrológicos circundantes (inundación y erosión fluvial, a escalas más detalladas, incluyendo el modelamiento para inundaciones) en las áreas de escorrentía, generación de flujos de detritos u otros movimientos en masa en sus zonas marginales.

Susceptibilidad baja

Comprende el 18.19 % de la superficie estudiada (101.68 km²). Los terrenos involucrados son de pendiente baja y los procesos reconocidos son excepcionales, como los flujos de detritos antiguos que forman abanicos y piedemontes aluviales y aluvio-torrenciales depositados por el río Chili y sus tributarios. Se observan terrenos con esta categoría en la ciudad de Arequipa. Se muestra en mapa con color verde oscuro.

Al igual que las zonas de muy baja susceptibilidad, pueden ser afectadas por los depósitos acarreados por flujos de detritos, que se acumulan en estas zonas de baja pendiente o pueden suscitarse problemas por inundación y erosión fluvial, así como inundación pluvial.

Susceptibilidad media

Abarca el 37.83 % del área de estudio (211.53). La susceptibilidad está relacionada a zonas con pendientes medias (5° -15°) y muy escarpada (> 45°), a la presencia de depósitos aluviales con algo de consolidación, proluviales, coluviales y fluvioglaciares; y rocas fracturadas; con pocos indicios de actividad en el pasado y algunas zonas con reactivación por la actividad antrópica (corte del talud para construir viviendas, carreteras, postes, etc.). Se distribuyen por toda el área de estudio. La estabilidad de estas áreas puede mantenerse relativamente si no se modifica

su topografía. Colinda en algunos casos con zonas de alta a muy alta susceptibilidad, pudiendo verse afectadas, si estas se reactivan. Se muestra en mapa con color amarillo.

Susceptibilidad Alta

Representa el 25.29 % del área de estudio (141.43 km²). Compromete laderas con pendientes fuertes (15° - 25°); depósitos coluviales y volcanoclásticos, poco a medianamente consolidados. Las geoformas comprometidas corresponden a cárcavas, conos de origen proluvial-deluvial, acantilados, bordes de terrazas aluviales, piedemontes, taludes artificiales, colinas y rellenos antrópicos. En la zona se encuentran indicios de inestabilidad y presencia de procesos activos y antiguos de caída y desprendimientos de rocas. Destacan los terrenos del extremo norte de la zona estudio (flancos suroeste de los volcanes Chachani y Misti) y la zona sur-sureste a la margen izquierda de los ríos Chili y Socabaya, donde se tiene la presencia colinas intrusivas. Se muestra en mapa con color anaranjado.

Susceptibilidad muy alta

Corresponde al 14.47 % del área de estudio (80.95 km²). Por sus características ingeniero-geológicas, concentra un número importante de ocurrencias de movimientos en masa activos, con indicios de reactivación. Corresponde a un substrato constituido por granodioritas fracturadas y alteradas, en algunos casos con una extensa cobertura de depósitos superficiales areno-limosos y en otras formando bolos de gran tamaño acumulados en las faldas y laderas de colinas; también se tienen depósitos volcanoclásticos recientes sin compactación. Las pendientes son muy fuertes (25° - 45°). Principalmente está localizada en los extremos nor-noreste y sur-suroeste, colinda con zonas de alta susceptibilidad. Se muestra en mapa con color rojo.

6.12.2 Susceptibilidad a las inundaciones y erosión fluvial

Otro tipo de peligro que afecta la ciudad de Arequipa son las inundaciones, asociadas a procesos de erosión fluvial; estas se producen por desbordes de ríos de orden mayor (Chili, Andamayo, Socabaya, Yarabamba) y sus quebradas afluentes principales (quebradas Azufral, Pastoraiz, Peral, San Lázaro, Venezuela, Los Incas, entre otras).

Uno de los aspectos fundamentales en el análisis de la susceptibilidad a las inundaciones es la geomorfología; esta controla, teóricamente, el flujo de agua y además existe el hecho de que la actual configuración de las formas del terreno y la distribución actual de los sedimentos fluviales han sido originadas por los mismos ríos que provocarán inundaciones en el futuro. Este análisis geomorfológico de formas del terreno y sistema fluvial debe ser reforzado con información sobre registros históricos de antiguas inundaciones e información topográfica.

El término susceptibilidad aplicado a la inundación fluvial se entiende como el grado de propensión que tiene un terreno o espacio a sufrir procesos de encharcamiento o inundación producto del desborde de ríos y el encharcamiento por lluvias locales. Las inundaciones de origen fluvial afectan de forma diferencial la llanura de inundación de los ríos, siendo las zonas más bajas y mal drenadas las más propensas a sufrir los procesos de inundación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2001).

6.12.2.1 Variable empleadas

La susceptibilidad a las inundaciones analiza y representa un análisis, cuyo enfoque está basado en un análisis heurístico-cualitativo (Mapa 5), donde prima el conocimiento experto e histórico del lugar que se evalúa basado en una visión retrospectiva de los eventos acontecidos en la zona estudiada.

El análisis de la susceptibilidad a las inundaciones se basa principalmente en la caracterización geomorfológica, apoyada en la interpretación de imágenes satelitales y trabajo de campo en general, en la utilización de mapas geomorfológicos y de pendientes de los terrenos. En forma simultánea ocurren procesos de erosión fluvial como eventos asociados a las inundaciones, generalmente circunscritos al cauce principal del río o quebrada, limitado por terrazas bajas o altas, donde su fuerza erosiva o socavamiento fluvial es originado muchas veces por la carga de sedimentos (flujos de lodo o detritos).

Las variables usadas, la forma de obtención de cada mapa, así como los pesos ponderados asignados a cada factor se presentan en el cuadro 6.5. Los pesos y grados de susceptibilidad asignados a los rangos de pendientes y a las unidades geomorfológicas, en relación con las inundaciones se presentan en el cuadro 6.6.

Cuadro 6.5

Ponderación de variables temáticas

Variable	Descripción	Obtención	Peso
Pendiente	Seis rangos de pendiente de los terrenos, expresado en grados (0° a 90°).	Mapa topográfico y Modelo de Elevación Digital (DEM), obtenido por medio de la restitución fotogramétrica de imágenes satelitales estéreo del satélite WorldView y GeoEye, a escala 1:10 000, con espaciamiento de curvas de nivel cada 5 m, las cuales fueron procesadas en el software ArcGis.	0.4
Geomorfología	Unidades geomorfológicas de acuerdo con su amplitud de relieve, altura relativa, pendiente y asociación morfogénica.	Interpretación de imágenes satelitales, cartas topográficas y comprobación de campo a escala 1:10 000.	0.6

Cuadro 6.6
Variables consideradas y su susceptibilidad a las inundaciones fluviales en la ciudad de Arequipa

Susceptibilidad	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Pendiente	<ul style="list-style-type: none"> • 15° a 25° • 25° a 45° • > 45° 	<ul style="list-style-type: none"> • 5° - 15° 	<ul style="list-style-type: none"> • 1° - 5° • 5° - 15° 	<ul style="list-style-type: none"> • 1° - 5° 	<ul style="list-style-type: none"> • 0° a 1°
Geomorfología	<ul style="list-style-type: none"> • Acantilado aluvial. • Acantilado aluvial antropizado. • Acantilado metamórfico. • Acantilado o frente de coladas de lava. • Acantilado sedimentario. • Acantilado sedimentario antropizado. • Botadero de basura. • Colada de lavas. • Colina intrusiva. • Colina metamórfica. • Colinas volcánicas ignimbriticas antropizadas. • Colinas y lomas de avalancha de escombros. • Colinas sedimentarias. • Colinas volcánicas ignimbriticas. • Colinas volcánicas lávicas. • Desmonte de cantera de sillar. • Dique transversal de tierra. • Domo y flujos de lavas. • Escarpe ignimbritico. • Escarpe intrusivo. • Escarpe o borde de terraza fluvio-aluvial. • Escarpe volcanoclastico. • Manto de arena. • Montaña intrusiva. • Montaña metamórfica. • Monte isla. • Montículo de áridos. • Muro de tierra. • Piedemonte coluvial. • Piedemonte coluvio-deluvial • Piedemonte poligénico. • Relleno antrópico. • Talud artificial. • Zona de arranque derrumbes. • Zona de arranque de deslizamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cárcavas. • Cono deluvial antropizado. • Cono proluvial • Piedemonte coluvial. • Piedemonte coluvio-deluvial. • Piedemonte deluvial. • Piedemonte proluvial. • Piedemonte proluvial antropizado. • Piedemonte volcanoclastico disectado. • Piedemonte volcanoclastico disectado antropizado. • Superficie plana ignimbritica degradada. • Terraza aluvial 1 (alta) • Terraza ignimbritica antropizad 	<ul style="list-style-type: none"> • Cárcava antropizada. • Colinas bajas antropizadas. • Cono deluvial. • Cono proluvial. • Isla fluvial intrusiva. • Manto de piroclastos. • Piedemonte glacio-fluvial. • Piedemonte poligénico antropizado. • Piedemonte proluvio-aluvial. • Piedemonte proluvio-aluvial antropizado. • Planicie aluvial. • Planicie aluvial antropizada. • Planicie sedimentaria. • Planicie sedimentaria antropizada. • Planicie volcanoclastica. • Plataforma antropica. • Superficie plana ignimbritica. • Superficie plana ignimbritica degradada antropizada. • Terraza aluvial 2, 3. • Terraza antrópica. • Terraza proluvio-aluvial. • Terraza proluvio-aluvial antropizada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Canteras. • Canteras urbanizadas. • Isla fluvial. • Terraza aluvial 4. • Terraza ignimbritica antropizada 2, 3 y 4. 	<ul style="list-style-type: none"> • Canal o curso antrópico. • Cauce de quebrada cubierto. • Cauce de río. • Cauce de río y quebrada antropizada. • Cauce seco de quebrada antropizada. • Cuenca seca de laguna. • Llanura de inundación. • Llanura de inundación antropizada. • Reservorio de agua. • Terraza fluvial 5, 6 y 7. • Terraza aluvial antropizada.

Los rangos o grados de susceptibilidad se calcularon estadísticamente de la misma forma en que fue utilizada para el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa, con ayuda del SIG (ARCGIS 10.4.1, y sus herramientas Spatial Analysis y 3D Analysis), en donde se empleó la siguiente fórmula:

$$SI = \frac{SGMI (0.60) + SPI (0.40)}{2}$$

En donde:

SI: Susceptibilidad a las inundaciones

SGMI: Susceptibilidad del parámetro geomorfología a las inundaciones

SPI: Susceptibilidad del parámetro pendiente a las inundaciones

Las áreas sujetas a inundaciones y erosión fluvial con mayor intensidad en la ciudad de Arequipa están localizadas en los valles principales que cruzan la ciudad, por donde discurren grandes caudales, relacionados a lluvias estacionales extraordinarias; así, se inundan terrenos bajos (llanuras inundables y terrazas bajas a medias) y se erosionan terrazas aluviales; también, se producen desbordes a lo largo de cursos de quebradas que forman grandes abanicos aluviales y proluviales como, por ejemplo, los abanicos ubicados depositados por las quebradas San Lázaro, Huarangal, etc.

Asimismo, también se pueden producir inundaciones en zonas urbanas ubicadas en terrenos planos, cuando las precipitaciones pluviales son extremadamente intensas y se forman anegamientos o encharcamientos por acumulación de agua que el terreno o substrato no puede infiltrar, o porque no se cuenta con adecuados sistemas de drenaje.

A continuación, se presenta la caracterización de los diferentes rangos de susceptibilidad a las inundaciones (Mapa 5) y su distribución en la zona de estudio:

Susceptibilidad nula

Esta zona corresponde principalmente a las vertientes de pendientes de inclinación fuerte a muy escarpadas, acantilados, laderas convexas de montañas, colinas, coladas de lavas; también en zonas de montaña, montes isla, montículos de áridos, piedemontes, rellenos antrópicos, taludes de corte artificial y zonas de arranque de movimientos en masa.

Abarca la mayor superficie de la zona de estudio, representado el 54.18 % del área total (302.93 km²).

Susceptibilidad baja

Esta zona corresponde a terrenos con pendientes moderadas; con morfología de conos aluviales y proluviales, piedemontes, superficie plana ignimbrítica degradada y terrazas antiguas elevadas con ondulamientos locales que configura concavidades donde se puede acumular agua. Son terrenos levemente inclinados, mal drenados que son inundados en periodos de lluvia extraordinaria.

Se encuentran dentro de esta zona parte de los territorios de los distritos de Cerro Colorado, Alto Selva Alegre, Hunter, Characato, Mollevaya y Chiguata. Abarca la mayor superficie de la zona de estudio, representado el 22.52 % del área total (125.89 km²). Se representa en el mapa con color verde.

Susceptibilidad media

Inundaciones con precipitaciones pluviales ocasionales y extraordinarias a lo largo de terrenos bajos adyacentes a la llanura de inundación, conformado por terrazas fluviales y proluviales medias, abanicos aluviales y proluviales de baja pendiente, planicies, plataformas antrópicas, superficie plana ignimbrítica; son zonas mal drenadas o con poca capacidad de infiltración. También se pueden producir inundaciones en terrenos con morfología plana ondulada, conformados por piedemontes de baja pendiente y colinas.

Se encuentran en parte de la zona urbana de Arequipa; así también abarca parte de los territorios de los distritos de Sachaca, Tiabaya, Socabaya, J. L. Bustamante y Rivero; Sabandía y Paucarpata; estas zonas muestran cierta pendiente baja, también en las afueras de la ciudad de Arequipa, en el sector de Quequeña. Abarca el 16.88 % del área total (94.38 km²). Se representa en el mapa con color amarillo.

Susceptibilidad alta

Terrenos que corresponden a llanuras de inundación y terrazas bajas, cauces de quebradas, ríos y cauces antrópicos, cuencas de lagunas pequeñas, que se inundan de forma recurrente con lluvias estacionales extraordinarias a excepcionales, que se pueden presentar sin que se haya producido el fenómeno de El Niño. Estas zonas se ubican a lo largo de los valles de los ríos Chili, Andamayo, Socabaya, Mollebaya y Yarabamba; también se presentan de forma recurrente en las quebradas San Lázaro, Venezuela, Los Incas, Huarangal, Peral, Azufral, entre otras, cuyos cursos atraviesan la zona urbana de Arequipa.

Esta zona representa el 6.42 % del área de estudio (35.91 km²) y se representa en el mapa con color rojo.

CAPÍTULO VII

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES

7.1 GENERALIDADES

El comportamiento de un fluido complejo como son los flujos de detritos (huaicos) no puede representarse por medio de los métodos que se aplican a los flujos de agua, debido a la alta concentración de materia sólida en ellos y que los materiales muestran esfuerzos elevados para que se produzca su movimiento (Rickerman, 2005). Por esta razón, en la simulación numérica de flujos en el tramo del cauce del río Chili y de la quebrada San Lázaro se ha empleado el modelo bidimensional FLO-2D, el cual cuenta con relativa experiencia de calibración a nivel nacional (Castillo, L.F, 2005; Fabián & Frank, 2014; Iwanaga, 2015; Lacho & Rodríguez, 2016; Villacorta *et al.*, inédito).

El programa computacional de modelamiento FLO-2D (O'Brien, 2003) simula fluidos no-newtonianos, como los flujos de detritos. Permite simular flujos en topografías complejas tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación. Los requerimientos del software, además de la información topográfica e hidrológica, son los parámetros reológicos como los índices de viscosidad y esfuerzo de cedencia y la concentración volumétrica de sedimentos (O'Brien y Julien, 1988; O'Brien y Julien, 2003).

7.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES EN EL RÍO CHILI - CIUDAD DE AREQUIPA

Por medio de la aplicación del software FLO-2D se realizó un estudio de simulación de eventos geohidrológicos extremos (inundaciones fluviales) en el río Chili, de un tramo aproximado de 21 km, comprendido entre los sectores de Charcani Chico y El Palacio en Sachaca; estos trabajos tienen la finalidad de contribuir en la gestión del riesgo de desastres y la elaboración de planes de ordenamiento territorial de la ciudad de Arequipa.

7.2.1 Objetivo

El objetivo principal es realizar la simulación de eventos de inundaciones fluviales para el cálculo de las zonas susceptibles a ser inundadas por eventos geohidrológicos extremos.

7.2.2 Antecedentes

Se tiene registros de inundaciones fluviales y reportes técnicos públicos de los últimos eventos geohidrológicos ocurridos en la zona de estudio. Al existir esta problemática en la ciudad de Arequipa, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet) adquirió imágenes satelitales (ortofotos) de la ciudad, para realizar un trabajo de restitución fotogramétrica con el que se obtuvo un Modelo Digital del Terreno [MDT] con una resolución de 2.5 metros en un área total de 526 km².

La información necesaria para realizar la simulación fueron obtenidos de los datos de lluvia grillada de la cuenca del río Chili, con una resolución espacial de 184 metros aproximadamente del producto PISCOp v2 (SENAMHI, 2017); además, se recopiló información bibliográfica referente a estudios de evaluación de inundaciones, hidrología e hidráulica de la zona de estudio.

7.2.3 Metodología

La simulación de flujos se desarrolló en las siguientes etapas:

Preproceso

Consistió en la revisión, análisis e interpretación de la información topográfica, hidrológica, meteorológica y geodinámica de la zona de estudio.

Proceso

En esta etapa se procesó, sintetizó y se realizó el tratamiento de los datos para ser ingresados al programa FLO-2D, el cual fue el programa utilizado para la simulación de los eventos. Se utilizó el Modelo Digital del Terreno [MDT] como base topográfica del modelo; se ingresó los hidrogramas del estudio hidrológico para ser simulados y se ingresó las propiedades de rugosidad del terreno (figura 7.1).

Postproceso

En esta parte, se obtuvo los resultados de las simulaciones de los escenarios de inundación fluvial y se realizó el análisis respectivo.

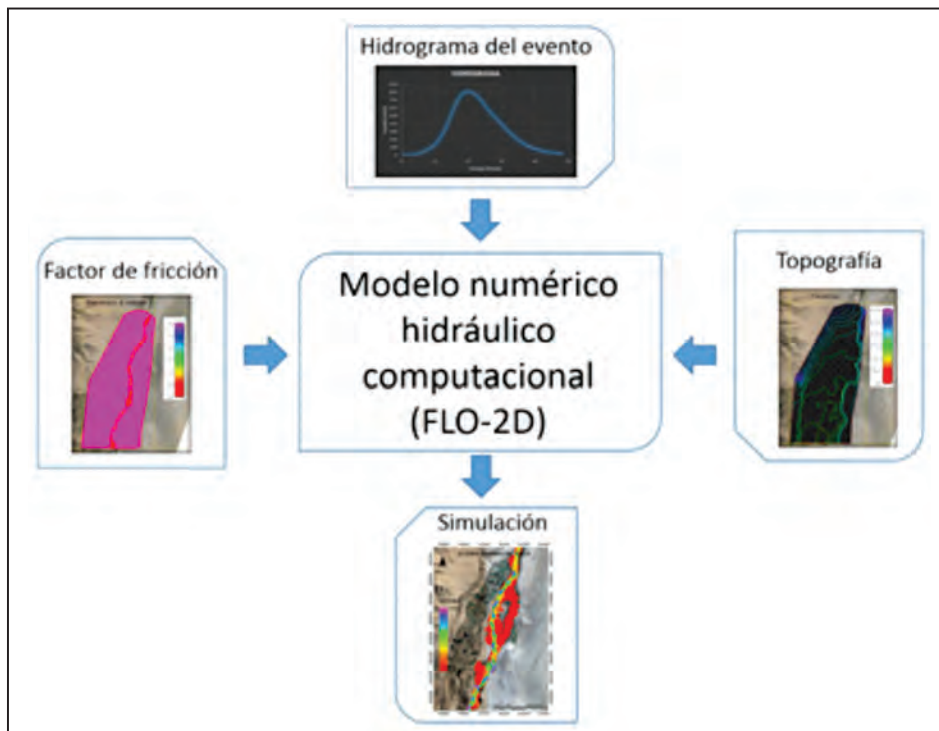


Figura 7.1 Diagrama de ingreso y salida de datos con el programa FLO-2D. (adaptado de Chahua, J., 2016).

7.2.4 Área de estudio

Ubicación

La zona de estudio se ubica en la provincia y región de Arequipa, abarca un tramo de aproximado de 21 km del río Chili (figura

7.2). En el margen izquierdo de este, se ubican los distritos de Alto Selva Alegre, Arequipa y Jacobo Hunter, mientras en la margen derecha se encuentran los distritos de Cayma, Yanahuara y Sachaca.

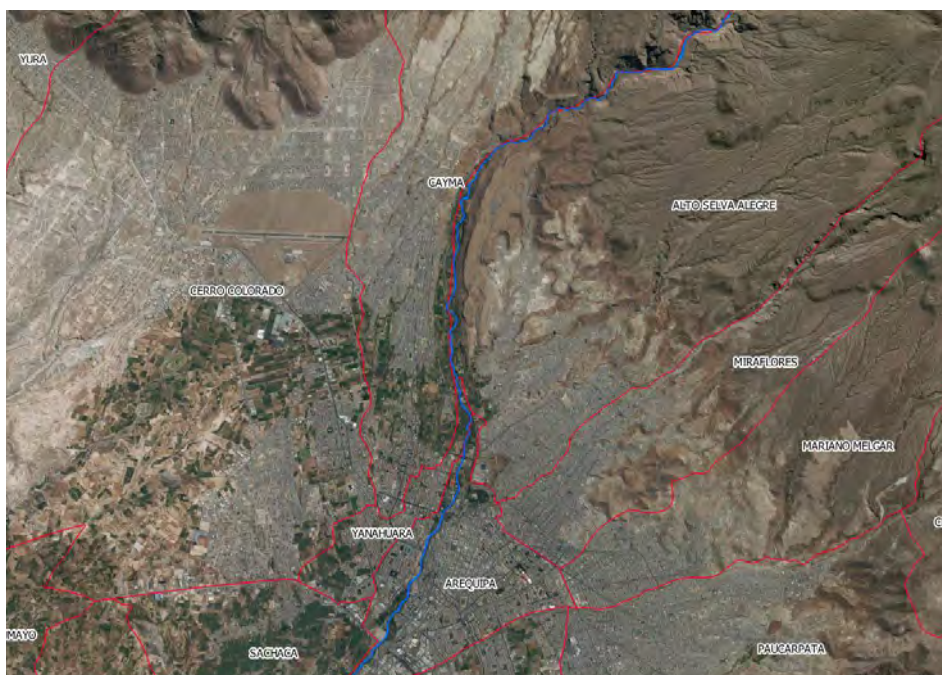


Figura 7.2 Imagen donde se puede observar el tramo cauce del río Chili, donde se aplicará la simulación.

Topografía

Se obtuvo la topografía de la zona de estudio a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 2.5 metros de resolución,

por medio de la restitución fotogramétrica de imágenes satelitales estéreo del satélite WorldView y GeoEye, a escala 1:5 000, con espaciamiento de curvas de nivel cada 5 m, las cuales fueron procesadas en el software ArcGis (figura 7.3).

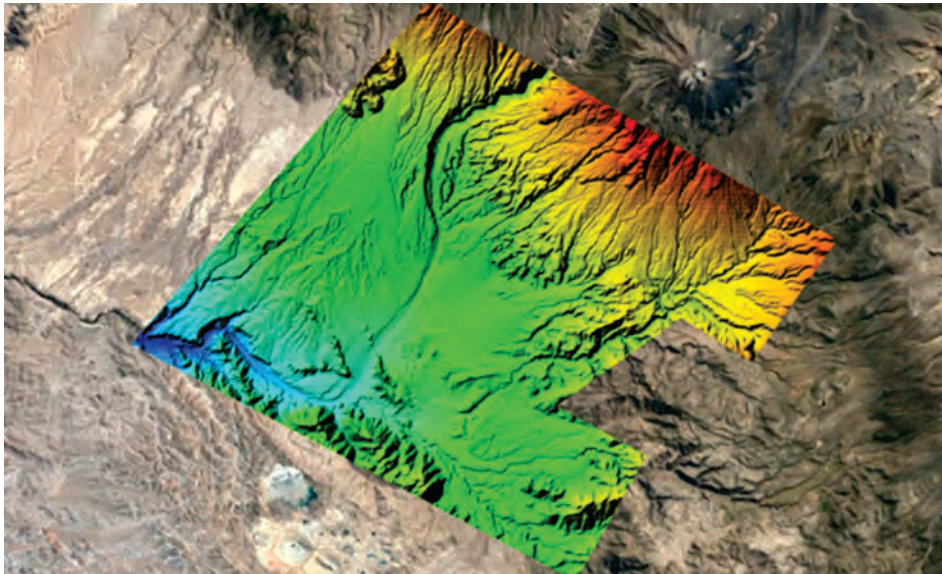


Figura 7.3 Modelo digital del terreno generado con imágenes satelitales de la ciudad de Arequipa.

Hidrometeorología

Se delimitó la cuenca del río Chili con el punto de desembocadura en las coordenadas UTM WGS84 234423.291 E y 8195858.365 S - zona 19 sur, así como también las subcuencas presentes

dentro esta (figura 7.4); el punto de desembocadura es el inicio de la simulación de la zona de trabajo. Se calcularon los parámetros morfométricos de la cuenca y de las subcuencas (cuadro 7.1); para esto se asignó un número para cada subcuenca.

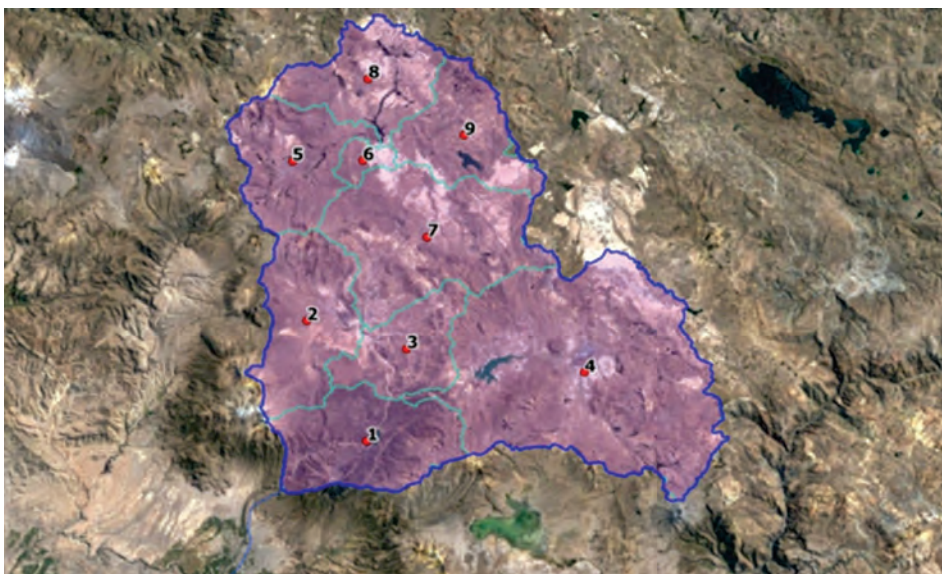


Figura 7.4 Cuencas y subcuencas del río Chili. (Fuente: elaboración propia).

Se utilizó los datos de precipitación del producto PISCOp v.2 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations), que son datos de precipitación grillados para todo el Perú. Estos fueron calculados mediante diversos métodos de interpolación geoestadísticos, utilizando como datos fuentes los registros de precipitación de todas las estaciones pluviométricas del Perú y utilizando los datos de precipitación obtenida por satélite (SENAMHI, 2017).

La resolución espacial de PISCO es de 184 m aproximadamente, por lo cual estos datos de precipitación fueron tratados como puntos de estaciones pluviométricas; es decir, cada punto (píxel de PISCO) representa el registro de precipitación de dicha área. Para esto se utilizaron los datos de precipitación de los centroides de cada subcuenca delimitada.

Cuadro 7.1

Propiedades morfométricas de cada subcuenca del río Chili

Descripción	UND	Valor (General)	EST1	EST2	EST3	EST4	EST5	EST6	EST7	EST8	EST9
Superficie											
Área	Km ²	3610	380.66	356.03	230.72	1165.52	312.52	43.97	567.74	299.26	279.02
Cotas											
Cota máxima	m s. n. m.	5822	5808	5822	4773	5245	5374	4507	5242	5237	4934
Cota mínima	m s. n. m.	2682	2699	3893	3761	4286	4286	4284	3893	4286	4284
Red hídrica											
Longitud del curso principal	Metros	122013	42183.78	34587.69	29610.21	77384.22	3525.78	16550.17	67482.29	31881.35	37732.49
Parámetros generados											
Tiempo de concentración (tc)	Minutos	658.44	1923.83	185.2	198.41	614.37	236.05	181.41	459.93	221.32	311.29
Tiempo de retrado (t lag)	Minutos	395.06	116.3	111.12	119.04	368.62	141.63	108.84	275.96	132.79	186.78

Los datos de precipitaciones obtenidos para cada subcuenca comprenden un periodo de 36 años a nivel diario; para esto se extrajo los datos de precipitación máximas en 24 horas multianuales; a estos datos se les realizó un análisis de frecuencia y una prueba de ajuste de bondad. Este proceso permite conocer la precipitación máxima en 24 horas para distintos periodos de retorno (probabilidad de ocurrencia), será aplicado para las nueve subcuencas delimitadas.

Posteriormente, se transformó la precipitación máxima en 24 horas para cierto periodo de retorno en un hietograma de tormenta, utilizando el método de tormentas del Servicio de Conservación de Suelos (USDA-SCS, 1986). Luego de este

procedimiento se calculó la lluvia neta; es decir, se restó la precipitación que es infiltrada para obtener la precipitación que escurrirá en cada subcuenca utilizando el método de número de curva (SCS, 1972). Luego de este procedimiento se transformó la lluvia neta a un hidrograma utilizando el método del hidrograma unitario (SCS, 1972). Este procedimiento se realizó para cada subcuenca (figura 7.5).

Como resultado es este procedimiento se obtuvo hidrogramas de máximas avenidas para los periodos de retorno de 500, 100, 50 y 10 años (figura 7.6). Los caudales máximos obtenidos para cada periodo son 585.6, 506.9, 473.6 y 388.3 m³/s.

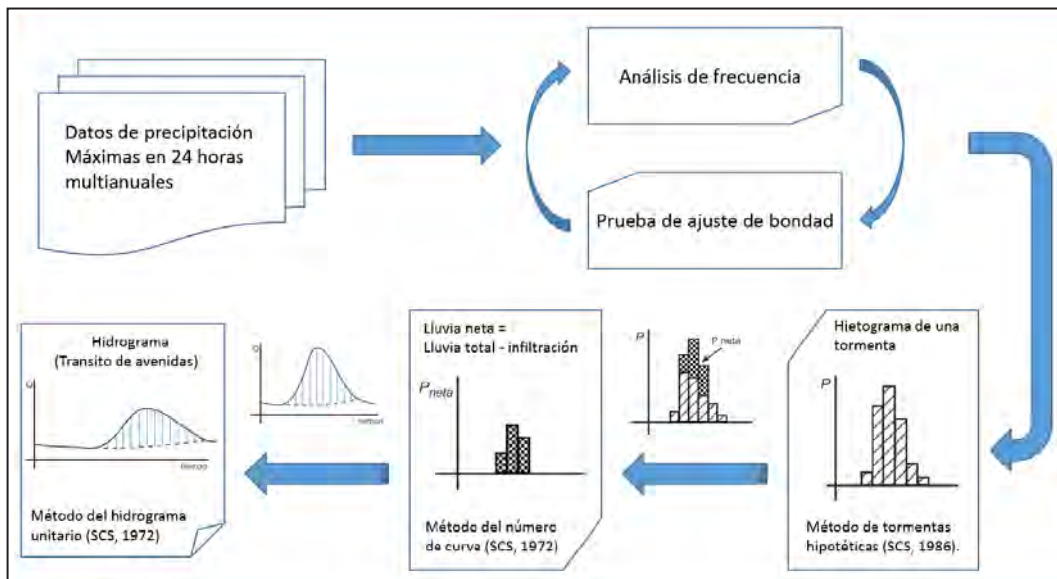


Figura 7.5 Metodología para el cálculo del hidrograma. (adaptado de Chahua, J., 2016).

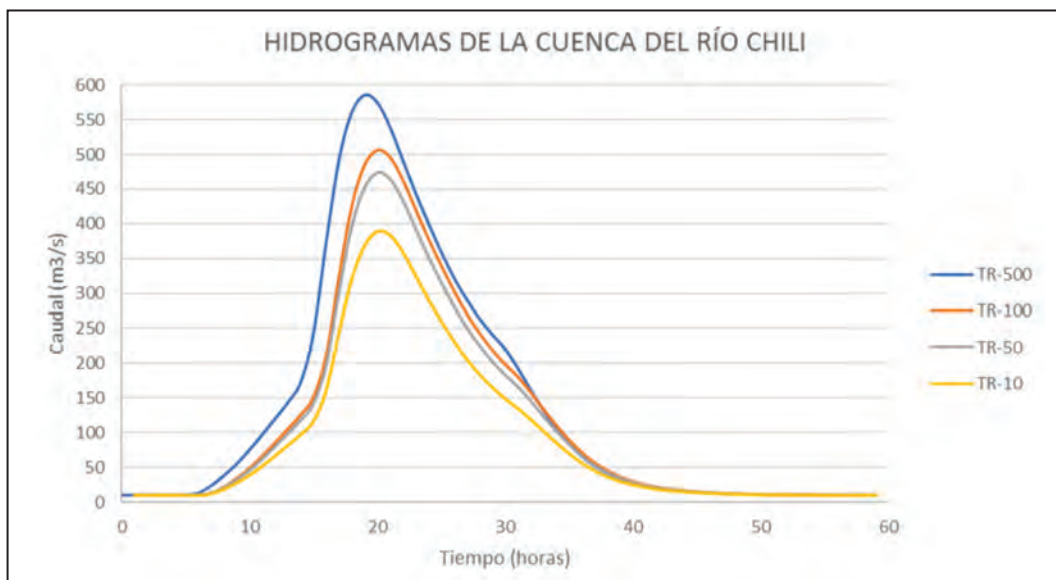


Figura 7.6 Hidrogramas de máximas avenidas para distintos periodos de retorno.

El cálculo de estos hidrogramas se realizó sin considerar las estructuras hidráulicas presentes en la cuenca u otra obra o actividad que varíe el régimen natural de los caudales.

Se estimó la rugosidad del terreno aplicando el método del valor del número de Manning para los distintos usos de suelo y textura del terreno, cuyos valores son propuestos en el manual del programa FLO-2D (2017). Para el río Chili se consideró un valor de 0.038 de acuerdo con las características que presenta, mientras a las zonas de cultivo y la zona urbana se consideró 0.15 y 0.03, respectivamente.

7.2.5 Simulación de escenarios de inundación

En esta etapa mediante el uso del software FLO2D se realizó la simulación de los escenarios de inundación de acuerdo con los hidrogramas generados.

El programa FLO2D permite la simulación de tránsito de avenidas en dos dimensiones; simula flujo en canales (abiertos y cerrados), superficies no confinadas, flujo en calles; y las características físicas del flujo pueden ser modificadas, tales como la reología (viscosidad, esfuerzo cortante), concentración

de sedimentos, composición de sedimentos finos (granulometría del sedimento), etc. Este modelo está validado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); El Cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), distrito de Sacramento; El Distrito de Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix Arizona; y entre otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres (FLO-2D, 2011).

7.2.5.1 Datos de entrada

Para generar y simular los escenarios de inundaciones fluviales con el programa FLO-2D se ingresó el MDT. Esto fue necesario para conocer las elevaciones del terreno a lo largo de los 21 km de tramo de río simulado; posteriormente, se ingresó las características hidráulicas del terreno (coeficiente de rugosidad) con los valores asumidos para cada tipo de uso de suelo; finalmente, se ingresó los hidrogramas para los diversos

periodos de retorno de acuerdo con los datos generados y se procedió con la simulación de los escenarios.

Modelo digital del terreno

Se seleccionó el sector del tramo del río Chili en el MDT, el cual abarca al río y las áreas susceptibles a inundaciones. Esto fue necesario para el procesamiento de la simulación sea más eficiente y rápido, tomando en cuenta que el flujo que desborda no llegara a los límites del modelo (figura 7.7). Se realizó el mallado del MDT con una resolución de 2.5 m, es decir, existe un dato de elevación por cada 6.25 m².

Factor de fricción

Los valores del número de Manning se distribuyeron de la siguiente manera: 0.038, en la ribera del río Chili; 0.15, en las áreas de cultivo y vegetación; y 0.03 en las zonas de calles (figura 7.8).

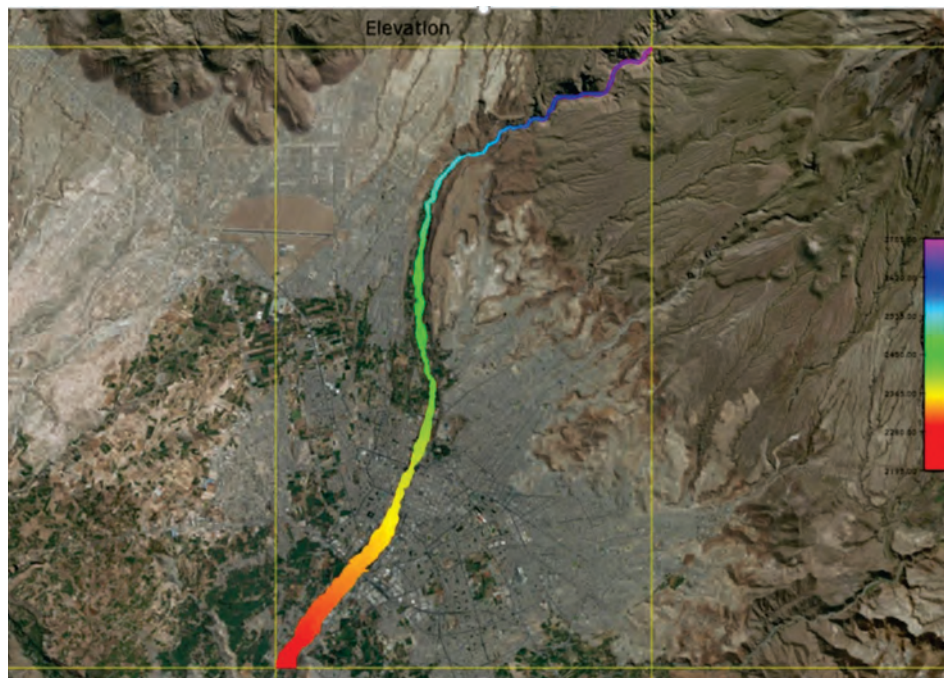


Figura 7.7 Dominio del modelo en el programa FLO2D.

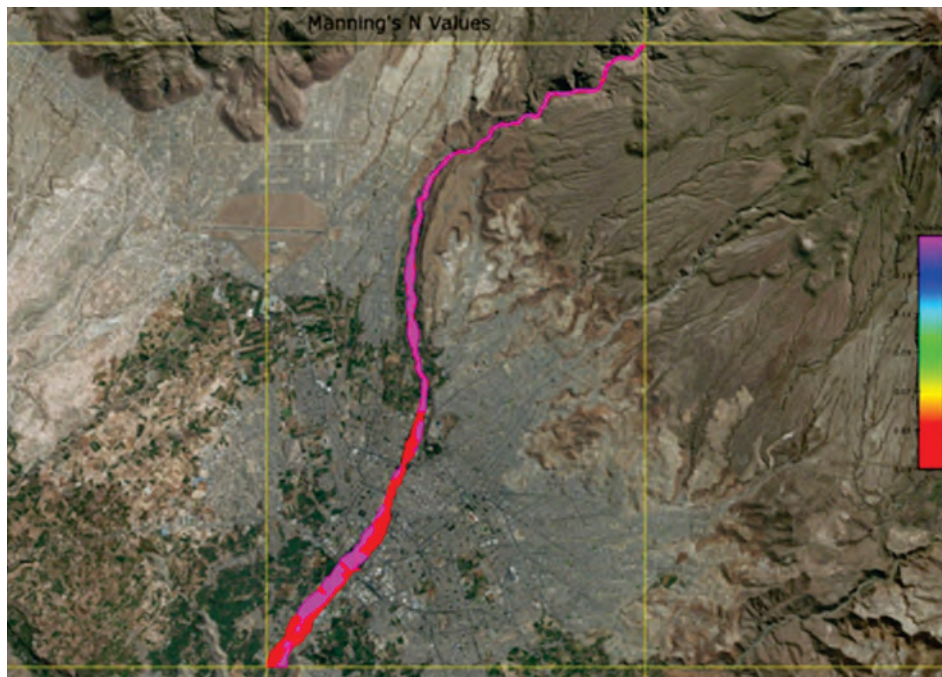


Figura 7.8 Valores del número de Manning en el programa FLO2D.

Hidrograma

Los hidrogramas generados con el análisis hidrológico en la cuenca del río Chili, utilizando los datos de precipitación del producto PISCOp v.2, fueron calculados sin considerar estructuras hidráulicas y/u otros elementos que alteran el régimen del río Chili (caudales naturalizados). Estos hidrogramas

presentan una duración de 58 horas; el caudal máximo se presenta entre las horas 18 a 20. También fue añadido el caudal base, el cual presenta un valor estimado de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, tomando como dato el mínimo registrado en la estación hidrológica Charchani. Los caudales máximos se resumen en el cuadro 7.2. Estos caudales fueron clasificados por escenarios de acuerdo con el periodo de retorno utilizado para su cálculo.

Cuadro 7.2

Caudales máximos del hidrograma clasificados en periodos de retorno

Nº escenario	Periodo de retorno (años)	Caudal (m^3/s)
I	500	585.6
II	100	506.9
III	50	473.6
IV	10	388.3

Nota: Estos caudales fueron calculados con el producto PISCOp v.2 sin considerar estructuras o agentes externos que modifican el régimen natural del río Chili.

7.2.5.2 Resultados

Los resultados obtenidos del proceso de simulación son presentados para diferentes escenarios de inundación (periodos de retorno).

Escenario I: TR 500: Este escenario se simuló con un caudal máximo de $585.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (periodo de retorno de 500 años), con una duración de 58 horas y una longitud de 21 km del río Chili (figura 7.9).

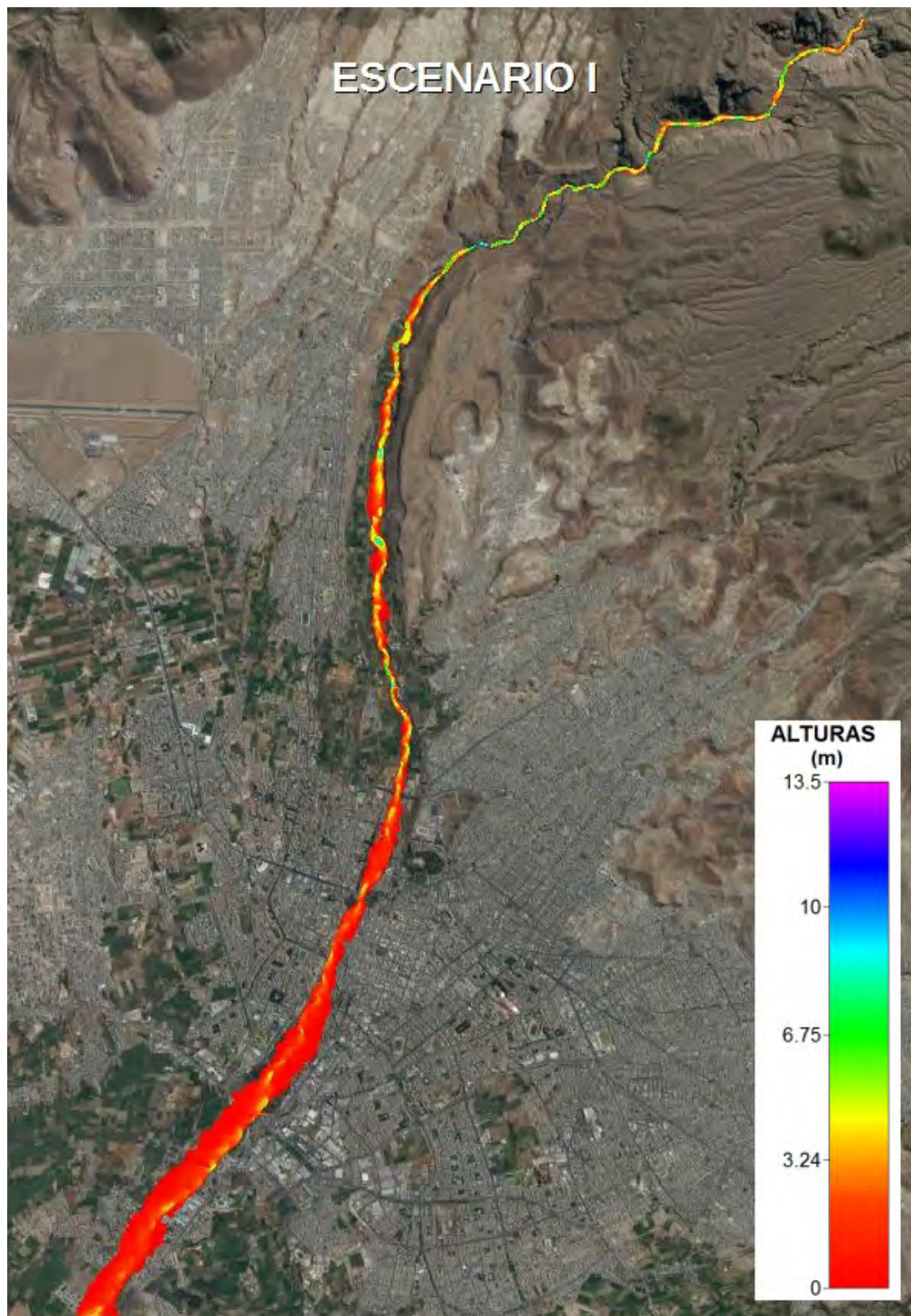


Figura 7.9 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 500 años.

Escenario II: TR 100: Este escenario fue simulado con caudal máximo de 506.9 m³/s (periodo de retorno de 100 años). Con una duración de 58 horas y una longitud de 21 km del río Chili (figura 7.10).

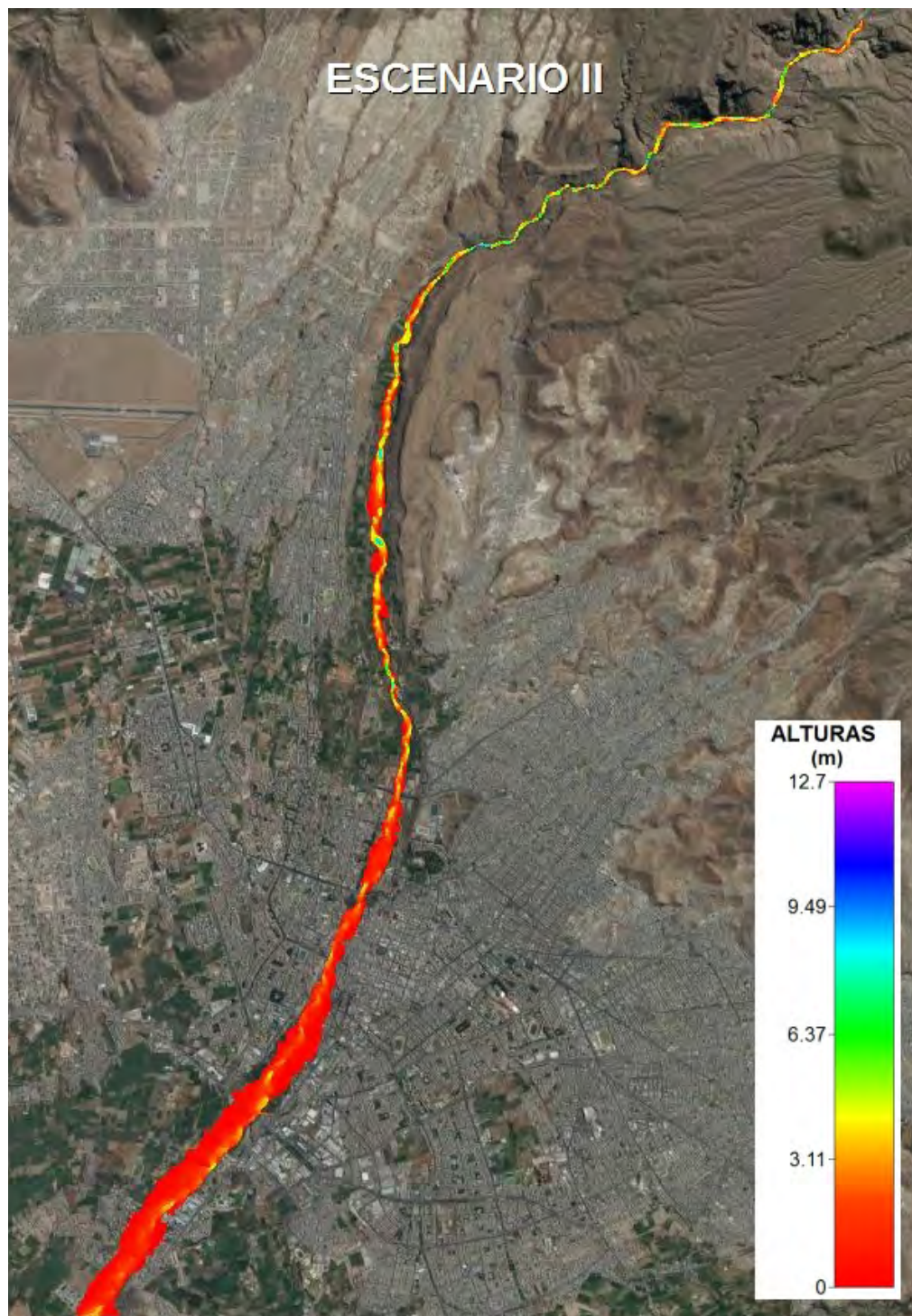


Figura 7.10 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 100 años.

Escenario III: TR 50: Este escenario fue simulado con caudal máximo de 473.6 m³/s (periodo de retorno de 50 años). Con una duración de 58 horas y una longitud de 21 km del río Chili (figura 7.11).

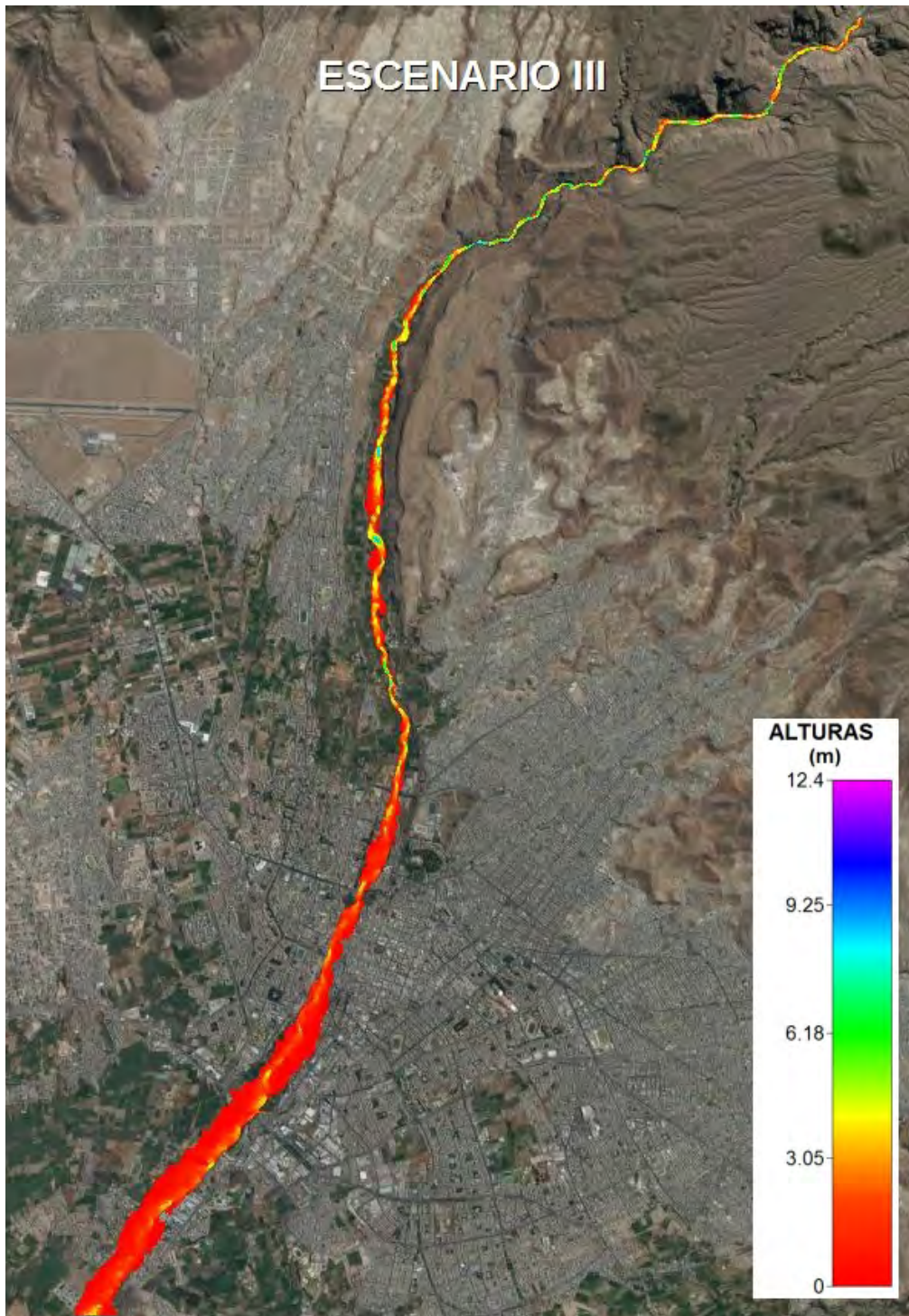


Figura 7.11 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 50 años.

Escenario IV: TR 10: Este escenario fue simulado con caudal máximo de 388.3 m³/s (periodo de retorno de 10 años). Con una duración de 58 horas y una longitud de 21 km del río Chili (figura 7.12).

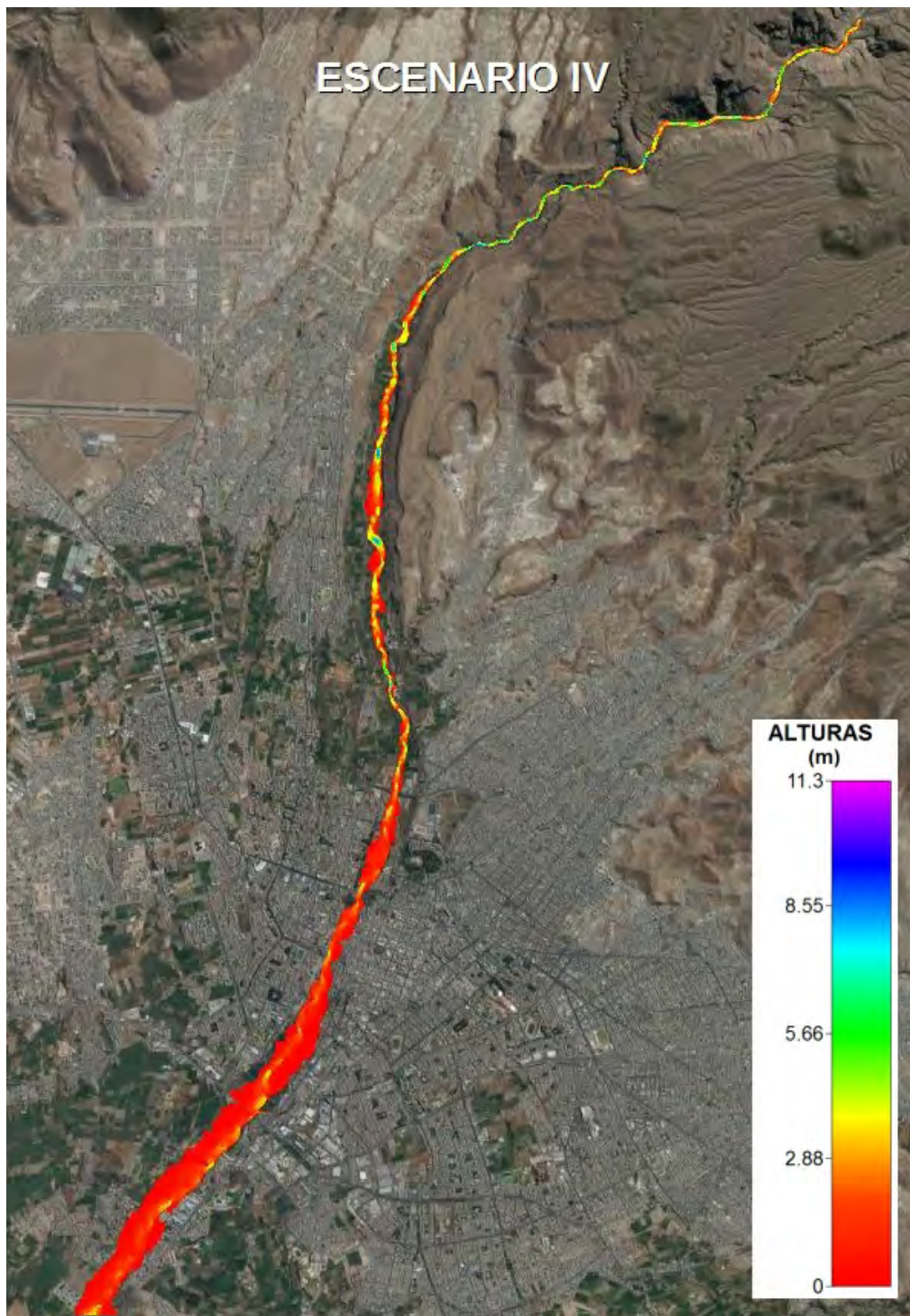


Figura 7.12 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 10 años.

7.2.5.3 Discusión

Los resultados de la simulación de las inundaciones fluviales por máximas avenidas fueron realizados en base a la información obtenida y disponibles; para este caso, se utilizó un modelo digital del terreno con resolución de 2.5 m, generado con curvas

de nivel espaciadas a cada 5 m, las cuales fueron obtenidas con técnicas de restitución aerofotogramétricas; debido a este método utilizado, el MDT generado no contiene información sobre las estructuras presentes en el tramo de estudio tales como puentes, canales, muros de contención, etc. (figura 7.13).

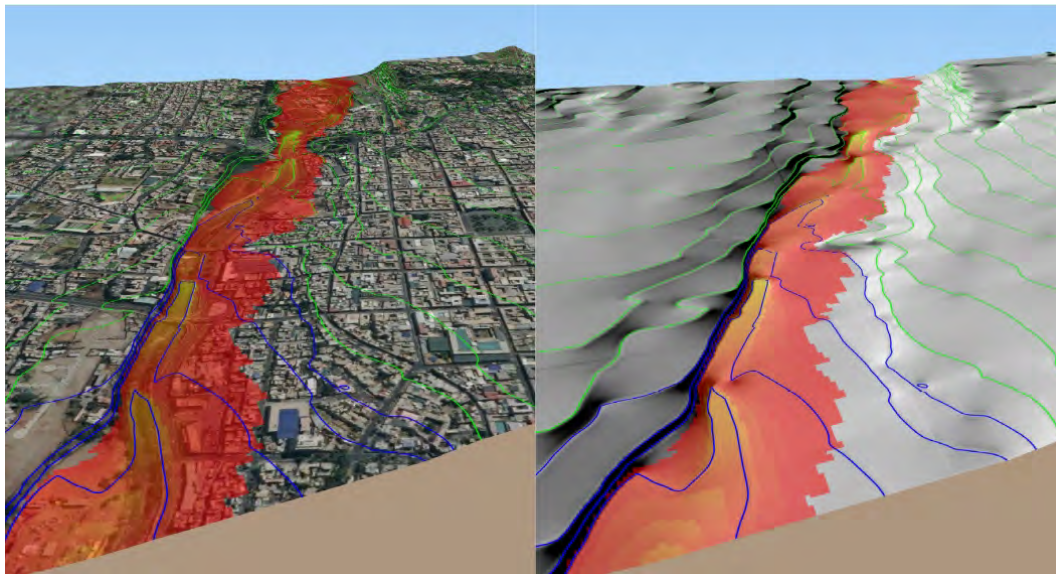


Figura 7.13 Vista ampliada del MDT utilizado en la simulación de las inundaciones de inundaciones en el río Chili.

Para el cálculo de los hidrogramas de los eventos hidrometeorológicos, estos se realizaron usando los datos del producto PISCOp v2.0.; los resultados fueron caudales naturalizados, es decir que fueron calculados sin considerar los efectos de las estructuras hidráulicas presentes en toda la cuenca o efectos que varían el caudal natural de la cuenca.

En base a estas consideraciones se observa que alturas máximas del flujo se presentan aguas arriba del tramo estudiado (figura 7.14), en los distritos de Cayma y Alto Selva Alegre, debido a que en dicho sector el cauce del río Chili es más angosto y profundo que aguas abajo. En este sector del río se observa que principalmente están expuestas las zonas de cultivo cercanas al río Chili y algunas viviendas se consideran susceptibles a las inundaciones también.

En el sector aguas abajo, el tramo del río Chili cruza por los distritos de Arequipa, Yanahuara, Sachaca y Jacobo Hunter (figura 7.15). En este sector los principales elementos expuestos a estos eventos son las viviendas aledañas al río Chili.

Se observa también que las alturas del flujo se incrementan en las zonas donde existen puentes. En estas zonas, el ancho del cauce del río es menor y cuando el flujo llega a estas zonas con un determinado caudal, el flujo aumenta su altura para mantener dicho caudal.

Los cuatro escenarios de inundación simulados presentan características similares con respecto a los puntos de desborde, con la diferencia de que las alturas máximas se van incrementando gradualmente y de igual manera las áreas de inundación.

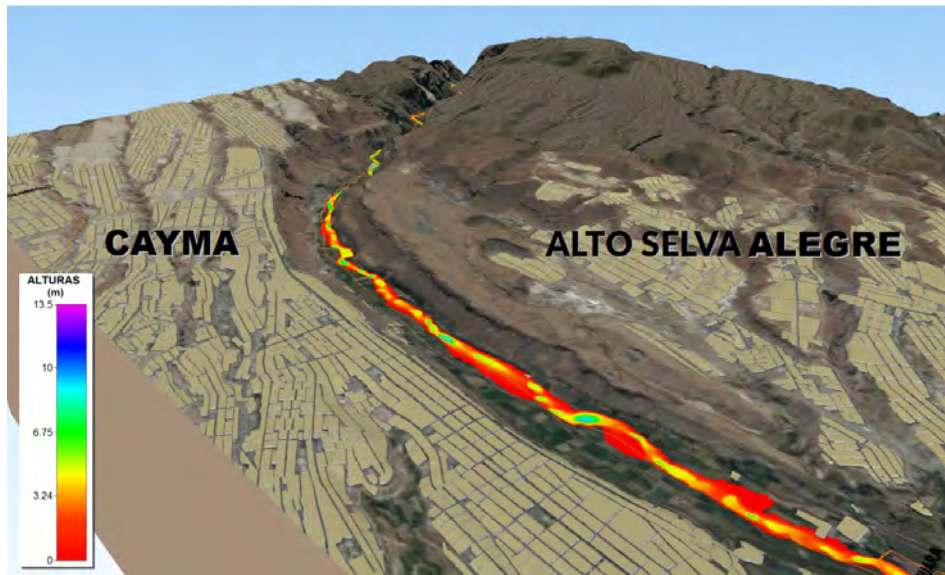


Figura 7.13 Vista ampliada del MDT utilizado en la simulación de las inundaciones de inundaciones en el río Chili.

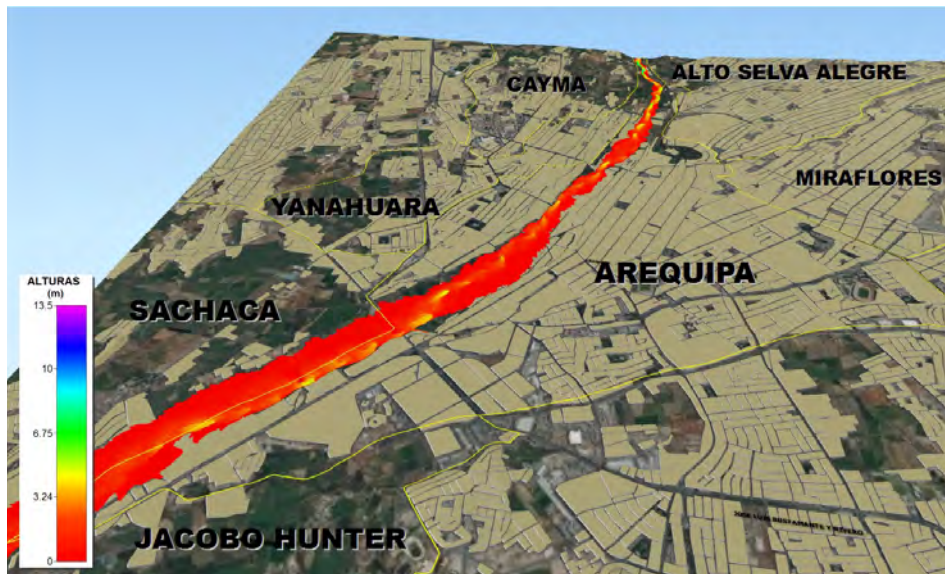


Figura 7.15 Tramo del río Chili en las que se ubican los distritos de Arequipa, Yanahuara, Sachaca y Jacobo Hunter.

7.3 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS E INUNDACIONES EN LA QUEBRADA SAN LÁZARO - CIUDAD DE AREQUIPA

La simulación de eventos geohidrológicos extremos (flujo de detritos y lodo) se realizó aplicando el software FLO-2D en la quebrada San Lázaro, para un tramo de 8.5 km, el cual atraviesa los distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores y Arequipa.

7.3.1 Objetivo

El objetivo principal es realizar la simulación de eventos de flujos de lodo y detritos para el cálculo de las zonas susceptibles a ser afectadas por eventos geohidrológicos extremos.

7.3.2 Antecedentes

Se tiene registros de inundaciones fluviales y reportes técnicos públicos de los últimos eventos geohidrológicos ocurridos en la zona de estudio. Al existir esta problemática en la ciudad de Arequipa, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet) adquirió imágenes satelitales (ortofotos) de la ciudad para realizar un trabajo de restitución fotogramétrica con el que se obtuvo un Modelo Digital del Terreno [MDT] con una resolución de 2.5 m en un área total de 526 km².

Se obtuvo datos de precipitación grillada para la cuenca de la quebrada San Lázaro con una resolución espacial de 184 m aproximadamente del producto PISCOp v2 (SENAMHI, 2017); además, se recopiló información bibliográfica referente a estudios de evaluación de flujos aluvionales, hidrología e hidráulica de la zona de estudio.

7.3.3 Metodología

La simulación de flujos se desarrolló en las siguientes etapas:

Preproceso

Consistió en la revisión, análisis e interpretación de la información topográfica, hidrológica, meteorológica y geodinámica de la zona de estudio.

Proceso

En esta etapa se procesó, sintetizó y se realizó el tratamiento de los datos para ingresarse al programa FLO-2D, el cual fue el programa utilizado para la simulación de los eventos. Se utilizó el Modelo Digital del Terreno [MDT] como base topográfica del modelo. Se ingresaron los hidrogramas y solidogramas del estudio hidrológico e hidráulico para simularse, y se ingresaron las propiedades de rugosidad del terreno y parámetros reológicos del fluido.

Postproceso

En esta parte, se obtuvo los resultados de las simulaciones de los escenarios de flujos de detritos y lodo, y se realizó el análisis de resultados obtenidos.

7.3.4 Área de estudio

Ubicación

La zona de estudio se ubica en la provincia y región de Arequipa, abarca un tramo de aproximado de 8.5 km de la quebrada San Lázaro (figura 7.16). En el margen izquierdo de este se ubica el distrito de Miraflores, mientras que en el margen derecho se encuentra el distrito de Alto Selva Alegre; en la desembocadura se ubica el distrito de Arequipa.

Topografía

Se obtuvo la topografía de la zona de estudio a partir de un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 2.5 m de resolución, por medio de la restitución fotogramétrica de imágenes satelitales estéreo del satélite WorldView y Geoeye, a escala 1:5000, con espaciamiento de curvas de nivel cada 5 m, las cuales fueron procesadas en el software ArcGis.

Hidrometeorología

Se delimitó la cuenca de la quebrada San Lázaro con el punto de desembocadura en las coordenadas UTM WGS84 234864.234 E, 8189866.646 S, zona 19 sur (figura 7.17); este punto de desembocadura es el inicio de la simulación de la zona de trabajo y se calcularon los parámetros morfométricos de la cuenca (cuadro 7.3).



Figura 7.16 Tramo de estudio de la quebrada San Lázaro, longitud aproximada de 8.5.



Figura 7.17 Delimitación de la cuenca de la quebrada San Lázaro en Arequipa.

Cuadro 7.3

Propiedades morfométricas de la cuenca de la quebrada San Lázaro

Descripción	Und.	Valor
Superficie		
Área	Km ²	15.7
Cotas		
Cota máxima	M s. N. M	5731
Cota mínima	M s. N. M	2790
Red hídrica		
Longitud del curso principal	Metros	11 040.10
Parámetros generados		
Tiempo de concentración (tc)	Minutos	42.1
Tiempo de retardo (T lag)	Minutos	25.26

Nota: Se muestra las propiedades morfométricas de la cuenca de la quebrada San Lázaro de acuerdo con la delimitación de la figura 7.17. (Fuente: elaboración propia).

Se utilizó los datos de precipitación del producto PISCOp v.2 (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), que son datos de precipitación grillados para todo el Perú, los cuales fueron calculados mediante diversos métodos de interpolación geoestadísticos, utilizando como datos fuentes los registros de precipitación de todas las estaciones pluviométricas del Perú y utilizando los datos de precipitación obtenida por satélite (SENAMHI, 2017).

La resolución espacial de PISCO es de 184 m aproximadamente por lo cual estos datos de precipitación se trataron como puntos de estaciones pluviométricas; es decir, cada punto (píxel de PISCO) representa el registro de precipitación de dicha área. Para esto se utilizó el centroide de la cuenca de la quebrada San Lázaro.

Los datos de precipitaciones obtenidos para esta cuenca comprenden un periodo de 36 años a nivel diario. Para esto se extrajo los datos de precipitación máximas en 24 horas multianuales; a estos datos se les realizó un análisis de frecuencia y una prueba de ajuste de bondad. Este proceso permite conocer la precipitación máxima en 24 horas para distintos periodos de retorno (probabilidad de ocurrencia).

Posteriormente, se transformó la precipitación máxima en 24 horas para cierto periodo de retorno en un hietograma de tormenta, utilizando el método de tormentas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1986). Luego de este procedimiento se calculó la lluvia neta; es decir, se restó la precipitación que es infiltrada para obtener la precipitación que escurrirá en cada subcuenca. Para ello se utilizó el método de número de curva (SCS, 1972). Luego de este procedimiento se

transformó la lluvia neta a un hidrograma, utilizando el método del hidrograma unitario (SCS, 1972).

El periodo de retorno fue elegido de acuerdo con el método propuesto por Jim O'Brien (2018), en el cual recomienda utilizar periodos de retorno menores a 25 años para cuencas con áreas menores a 13 km², debido a que en periodos de retornos altos el volumen de agua sería demasiado para que formen flujos aluvionales. La cuenca de la quebrada San Lázaro presenta un área de 15.7 km²; este valor es cercano al área mencionada en la metodología, por lo cual se trabajó con un periodo de retorno de 25 años. Como resultado de este procedimiento, se obtuvo un hidrograma para un periodo de retorno de 25 años (figura 7.18), el cual presenta un caudal máximo de 24.8 m³/s.

Hidráulica

El hidrograma obtenido (acápite de hidrometeorología) representa la parte líquida del flujo aluvional; la parte sólida de este (cantidad de material sólido que transporta el flujo aluvional) es representado como una relación entre el volumen de sólidos y el volumen total (volumen de agua y volumen de sólidos). Para conocer esta parte sólida del flujo aluvional, se debe extraer muestras de flujos durante la ocurrencia de estos eventos para determinar las concentraciones volumétricas. Esta actividad es compleja y peligrosa; debido a ello han surgido diferentes metodologías para la estimación de estas concentraciones. La metodología implementada para la simulación de los flujos aluvionales en este estudio es la propuesta por el manual de referencia de FLO-2D (2017). Esta metodología se basa en estimar la concentración volumétrica de acuerdo con los esfuerzos predominantes (cuadro 7.4). Estas características del flujo se pueden observar mediante la representación gráfica.



Figura 7.18 Hidrogramas de máximas avenidas en la cuenca de la quebrada San Lázaro para un TR de 25 años.

Cuadro 7.4

Esfuerzos dominantes para los diferentes tipos de flujos

Dominant Stresses in Hyperconcentrated Sediment Flow		
	Concentration by Volumen	Dominant Stres
Landslide	0.55 – 0.80	Cohesive stress, Mohr Coulomb stress; granular flow dispersive stress
Mudflow	0.45 – 0.55	Viscous stress, tubulence stress
Mud Flood	0.20 – 0.45	Tubulence some viscous stress, minor dispersive stress
Water Flood	<0.20	Turbelence Stress

Nota: Se clasifica cada tipo de flujo de acuerdo con la concentración volumétrica y a los esfuerzos dominantes. (Adaptado de O'Brien Jim, 2018).

En la fotografía 7.1, se puede observar el desarrollo de un flujo aluvional en la quebrada San Lázaro. Para este caso, las características de los flujos aluvionales ocurridos en esta quebrada generalmente presentan turbulencia en su superficie y debido a la baja concentración de sedimento fino, por lo cual presenta un bajo esfuerzo dispersivo. De acuerdo con el análisis del flujo aluvional en San Lázaro y a la metodología empleada,

se estima que la concentración máxima del flujo es de 0.35 y la mínima de 0.20; entonces, para generar el solidograma del evento aluvional se empieza con la concentración mínima, y se va elevando este valor progresivamente hasta llegar al máximo valor y luego se reduce. Esto con la intención de representar el desarrollo de un flujo aluvional, tal como se observa en los eventos ocurridos en dicha quebrada.



Fotografía 7.1 Material proluvial en la quebrada San Lázaro en el año 2015.

Se estimó la rugosidad del terreno aplicando el método del valor del número de Manning para los distintos usos de suelo y textura del terreno, cuyos valores son propuestos en el manual del programa FLO-2D (2017). Para la quebrada San Lázaro se consideró un valor de 0.15, de acuerdo con las características que presenta, mientras que en las zonas urbanas se consideró un valor de 0.04.

Geodinámica

En esta sección se centró específicamente en el cálculo de volúmenes que aportarían en la generación de un flujo aluvional. De acuerdo con el cartografiado utilizando imágenes satelitales pancromáticas del área de estudio, se estimó que existen principalmente tres zonas en el que el material es susceptible de generar un flujo aluvional (figura 7.19). El volumen total estimado es de 413 084.595 m³.



Figura 7.19 Delimitación de las áreas de materiales disponibles a la formación de flujos aluvionales.

Este volumen estimado es el máximo valor que un evento de flujo aluvional puede acarrear; por lo tanto, el volumen final generado en la simulación tendrá que ser menor a este valor.

Geotecnia

Se extrajeron nueve muestras de flujos aluvionales sedimentados en las distintas quebradas de la ciudad de Arequipa. Estas muestras fueron trabajadas en un laboratorio de mecánica de suelos, obteniéndose las curvas granulométricas, densidad, peso unitario y contenido de humedad. Todas las muestras presentan en promedio un 3 % de material fino.

Reología del estudio

Para conocer el comportamiento del fluido en los eventos de aluviones es necesario hallar la relación entre el esfuerzo de cedencia y la velocidad de deformación del fluido. Para estos cálculos nos basamos en la metodología propuesta en los manuales del programa FLO2D en base a estudios de estos fluidos.

Autores como O'Brien y Julien (1988), Major y Pierson (1990), Julien y Lan (1991) investigaron flujos de lodo con altas concentraciones de sedimento fino en la matriz fluida. Estos estudios mostraron que los flujos de lodo se comportan como los fluidos Bingham con bajas tasas de esfuerzo. En matrices fluidas con bajas concentraciones de sedimento, los esfuerzos turbulentos dominan el flujo. Altas concentraciones de partículas gruesas combinadas con bajas concentraciones de partículas finas son requeridas para generar esfuerzos dispersivos. El modelo cuadrático de esfuerzo al corte propuesto por O'Brien y Julien (1985) describe el régimen continuo del flujo viscoso a flujo turbulento/dispersivo (adaptado de Chahua, J., 2016).

Entonces, para determinar el comportamiento de estos fluidos se utilizó los resultados de los índices plásticos, límites elásticos estimados y concentración de finos de los resultados del estudio de mecánica de suelos. A partir de estos parámetros se obtuvo el modelo reológico, que relaciona la concentración volumétrica del flujo con la viscosidad dinámica y el esfuerzo de cedencia para las muestras de los flujos depositados en la quebrada San Lázaro. Estas fueron comparadas con las muestras clasificadas de los estudios de O'Brien y Julien (1985).

De acuerdo con los resultados de las muestras extraídas en la quebrada San Lázaro de los flujos depositados, se observa que todas las muestras presentan un porcentaje promedio del 3 % de material fino, el cual se asemeja a los resultados de la muestra de Glenwood sample 2 estudiadas por O'Brien y Julien (1985) cuyos parámetros son los que siguen:

$$\begin{aligned}\tau_y &= 0.0765 e^{16.9 c_v} \\ \eta &= 0.0648 e^{6.2 c_v}\end{aligned}$$

Donde: τ_y es el esfuerzo de cedencia
 η es la viscosidad dinámica

7.3.5 Simulación de escenarios de flujos aluvionales

Se procesó la información generada y se ingresaron los datos al programa FLO-2D para la simulación del escenario de flujos aluvionales de acuerdo con los datos obtenidos y generados del área de estudio.

El programa FLO-2D permite la simulación de tránsito de avenidas en 2 dimensiones: simula flujo en canales (abiertos y cerrados), superficies no confinadas, flujo en calles; y las características físicas del flujo pueden ser modificadas, tales como la reología (viscosidad, esfuerzo cortante), concentración de sedimentos, composición de sedimentos finos (granulometría del sedimento), etc. Además, este modelo está validado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencia de los Estados Unidos (FEMA); El Cuerpo de Ingenieros del Ejército (Corps), distrito de Sacramento; el Distrito de Control de Inundaciones del Condado de Maricopa (FCDMC), Phoenix Arizona; y entre otras entidades internacionales involucradas en el tema de gestión de riesgo de desastres (FLO-2D, 2011).

7.3.5.1 Datos de entrada

Para generar el escenario de flujos aluvionales en la quebrada San Lázaro con el programa FLO-2D, se preparó el modelo con los resultados de los análisis de las muestras de suelo de los flujos depositados, hidrología, hidráulica, geodinámica y topografía. Para ello, se siguió el siguiente procedimiento: se utilizó el modelo digital del terreno [MDT], el cual fue ingresado al programa y se procedió a realizar el mallado en el que se determinó la resolución de trabajo (2.5 m); posteriormente, se ingresó las características hidráulicas del terreno (coeficiente de rugosidad), el cual fue realizado con los valores del número de Manning; se ingresó el hidrograma y solidograma del evento de flujo aluvional de acuerdo con los datos obtenidos por los estudios de mecánica de suelos, hidrología e hidráulica; y se ingresó las propiedades reológicas del fluido de acuerdo con las muestras de flujos depositados y a las tablas de propiedades reológicas propuestas por O'Brien y Julien (1988).

Modelo digital del terreno

Se seleccionó el sector del tramo de la quebrada San Lázaro en el MDT, el cual abarca la quebrada y las áreas susceptibles a ser afectadas. Esto fue necesario para que el procesamiento de la simulación sea más eficiente y rápido, tomando en cuenta que el flujo que desborda no llegara a los límites del modelo (figura

7.20). Se realizó el mallado del MDT con una resolución de 2.5 m, es decir que existe un dato de elevación por cada 6.25 m².

Factor de fricción

Los valores del número de Manning se distribuyeron de la siguiente manera: 0.15, en la quebrada San Lázaro; y 0.04, en las áreas urbanas (figura 7.21).

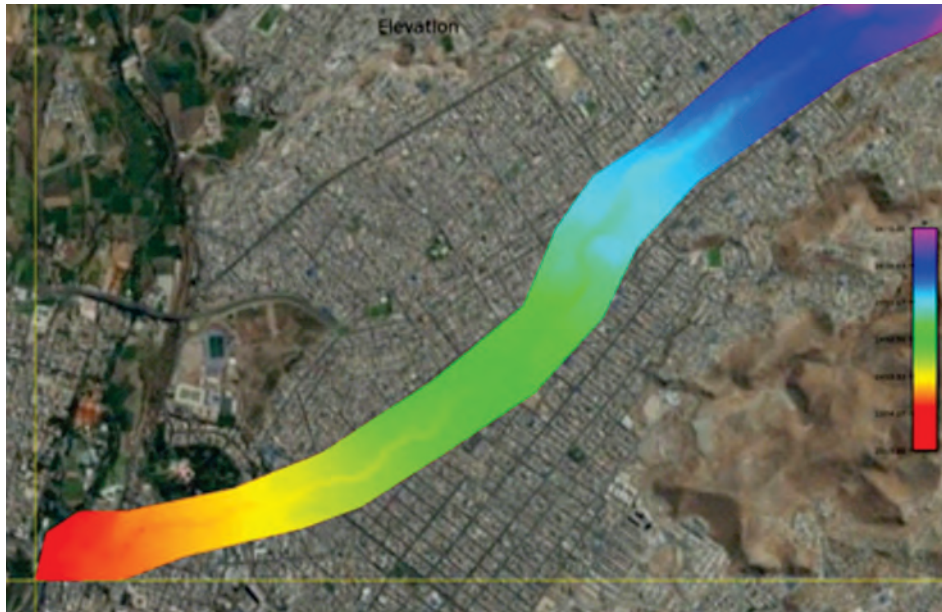


Figura 7.20 Dominio del modelo de la quebrada San Lázaro en el programa FLO2D.



Figura 7.21 Valores del número de Manning en el programa FLO2D.

Hidrograma y solidograma

El hidrograma generado con el análisis hidrológico en la cuenca de la quebrada San Lázaro fue realizado utilizando los datos de precipitación del producto PISCOp v.2. Este hidrograma

presenta una duración de 24 horas, en el cual el caudal máximo se presenta entre las horas 9 a 11, con un máximo de 24.8 m³/s; además, a este hidrograma se añadió el solidograma del evento, el cual presenta una concentración volumétrica [Cv] máxima del 35 % (figura 7.22).

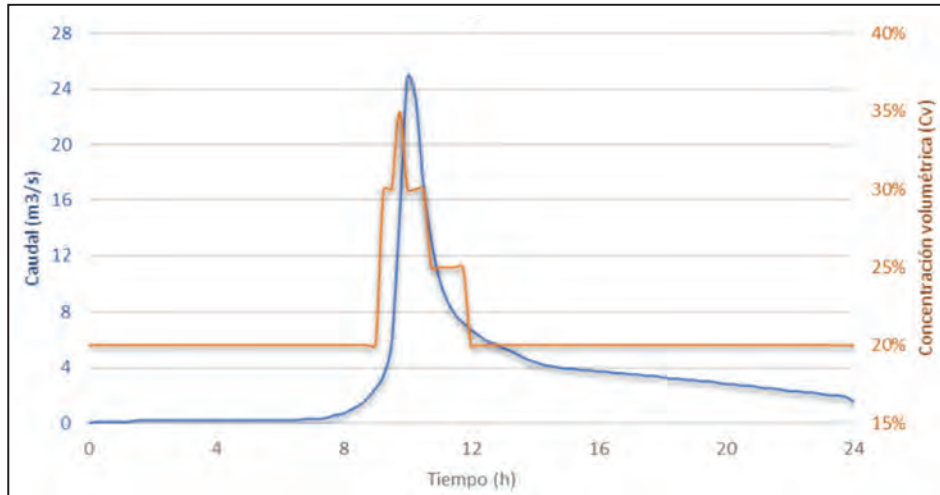


Figura 7.22 Hidrograma y solidograma del evento de flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.

Propiedades reológicas

Se ingresaron los parámetros reológicos al programa FLO2D de acuerdo con los valores asignados en la sección reología del fluido. El programa FLO2D asume el comportamiento de flujo aluvional (mezcla entre el agua y sólido) como un solo fluido, el cual es gobernado con las propiedades reológicas de este.

7.3.5.2 Resultados

En la figura 7.23 se presenta el resultado obtenido de la simulación del escenario de flujo aluvional en la quebrada San Lázaro. Este fue modelado en una longitud de 8.5 km con un evento de duración de 24 horas, con un caudal máximo de 24.8 m³/s y una concentración volumétrica máxima del 35 %.

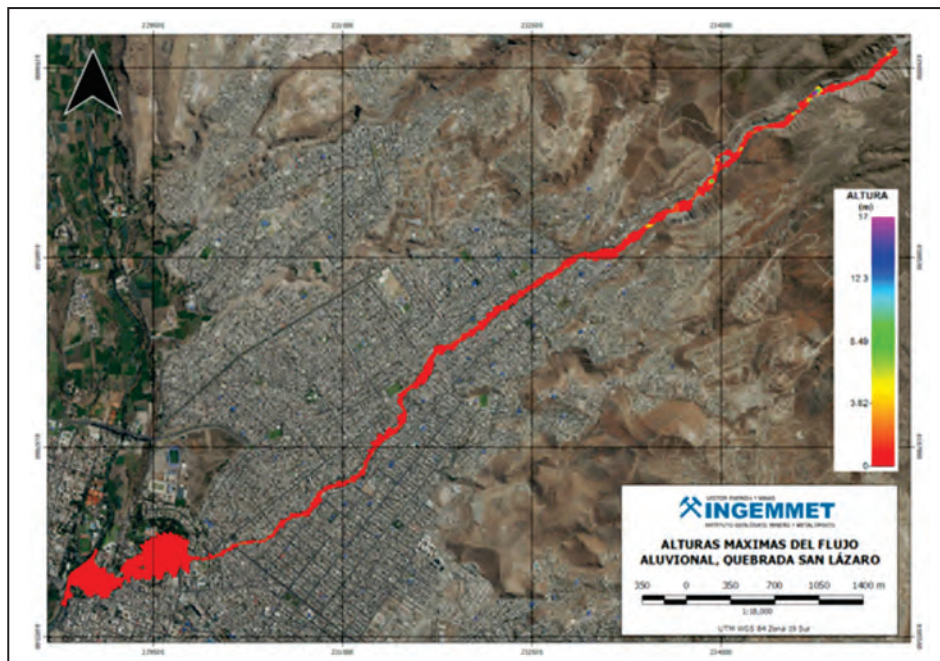


Figura 7.23 Alturas máximas del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro para un periodo de retorno de 25 años.

7.3.5.3 Discusión

Los resultados de la simulación de flujos aluvionales fueron realizados en base a la información obtenida y disponibles por Ingemmet; para este caso se utilizó un modelo digital del terreno con resolución de 2.5 metros, generado con curvas de

nivel espaciadas a cada 5 metros, las cuales fueron obtenidas con técnicas de restitución aero fotogramétricas; debido a este método utilizado, el MDT generado no contiene información sobre las estructuras presentes en el tramo de estudio tales como puentes, canales, muros de contención, etc. (figura 7.24).

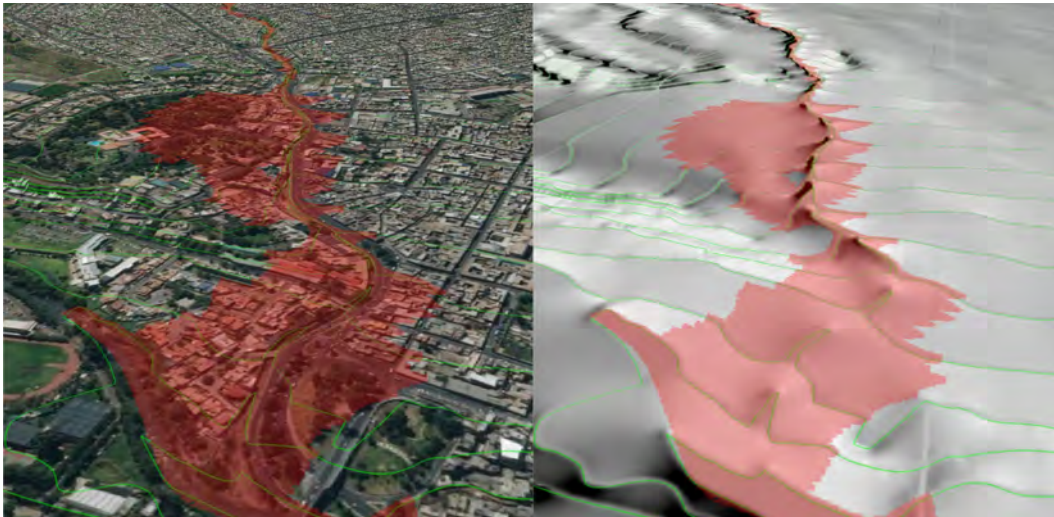


Figura 7.24 Vista ampliada del MDT utilizado en la simulación del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.

El ancho de la quebrada San Lázaro es variable, presentándose en algunos tramos estructuras de canalización, las cuales no pudieron ser representadas en el modelo debido a que la resolución del MDT fue generada con curvas de nivel de 5 m y en algunos casos el ancho de la quebrada llega a ser menor que la resolución del modelo.

En base a estas consideraciones se observa que alturas máximas del flujo se presentan aguas arriba del tramo estudiado

(figura 7.25), entre los distritos de Alto Selva Alegre y Miraflores, debido a que en dicho sector la quebrada San Lázaro presenta zonas de depresión.

En el sector aguas abajo del tramo de la quebrada San Lázaro, entre la unión con el río Chili, se observa el principal desborde del flujo en la zona urbana (figura 7.26). En este sector los principales elementos expuestos son las viviendas aledañas a esta quebrada.

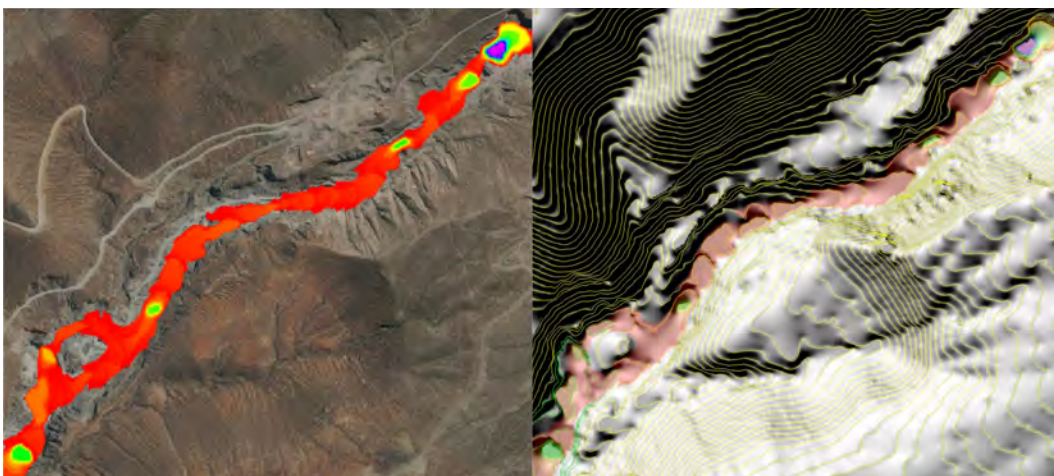


Figura 7.25 Tramo de la quebrada San Lázaro en donde se presentan las alturas máximas del flujo.

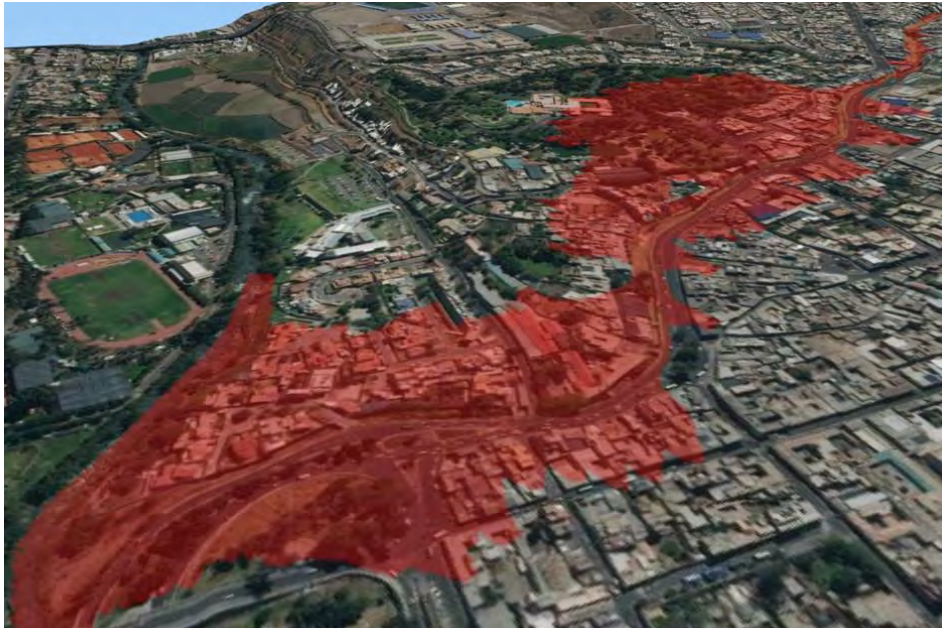


Figura 7.26 Alturas máximas del flujo cerca a la desembocadura de la quebrada San Lázaro en el río Chili.

En el escenario de flujo aluvional en la quebrada San Lázaro, se observa que la altura máxima que alcanza el flujo es de 17 metros, el cual se da aguas arriba del tramo de estudio debido a las depresiones existentes en la quebrada; conforme el flujo

va escurriendo aguas abajo, la quebrada es más angosta por lo cual provoca los desbordes de este afectando las zonas urbanas (figura 27).

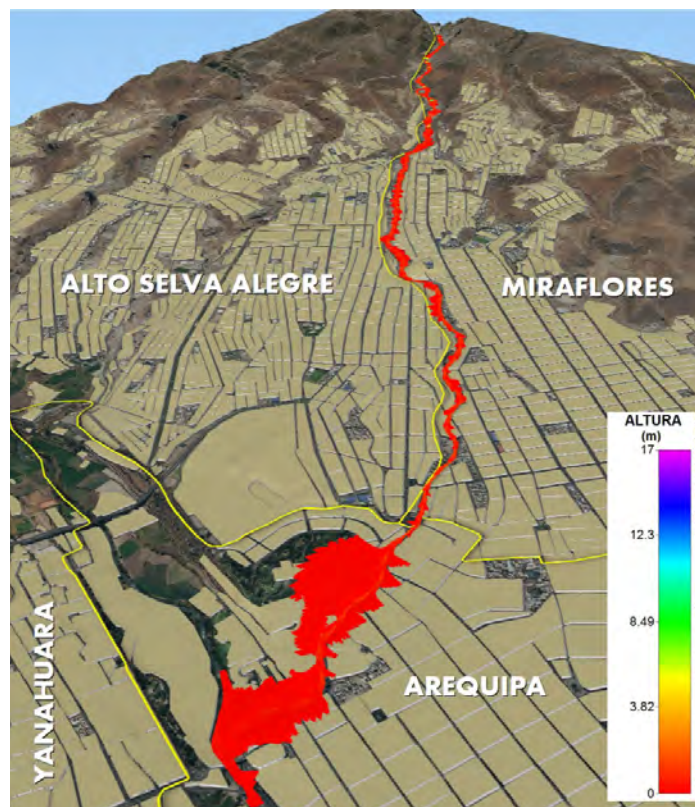


Figura 7.27 Vista general de las alturas máximas del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.

CAPÍTULO VIII

ALTERNATIVAS PARA EL MANEJO DE PROBLEMAS POR PELIGROS GEOLÓGICOS Y GEOHIDROLÓGICOS

8.1 GENERALIDADES

Realizado el análisis de peligros por movimientos en masa y peligros geohidrológicos se puede manifestar que la problemática presente en la ciudad de Arequipa se deriva de la ocupación de zonas afectadas en el pasado por estos procesos. Parte de la ciudad se encuentra asentada al pie del flanco suroeste del cono del volcán Misti y otra en el flanco sur del volcán Chachani, desde donde descienden un gran número de quebradas que confluyen al río Chili y que en su recorrido atraviesan la ciudad. El crecimiento de la población se realizó acercándose hacia los cauces del río, quebradas principales y sus tributarios que han sufrido en el pasado reciente, episodios de flujos de detritos e inundaciones. Todo esto es el reflejo de la ausencia de una conciencia preventiva del riesgo de desastres, quizás por desconocimiento de la población sobre la problemática a la cual están expuestos y de los cuales se hace referencia en este documento.

Es por estas razones que se plantean algunas medidas, que se pueden tomar a consideración en la mitigación del riesgo, asociado a peligros geohidrológicos y movimientos en masa.

Las medidas de mitigación deben ser proyectadas en zonas donde se haya identificado un peligro activo o latente, que comprometa la seguridad física de poblaciones, infraestructura y cultivos; las medidas son de índole estructural y no estructural.

8.2 MEDIDAS ESTRUCTURALES

Cualquier construcción física para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas, o la aplicación de técnicas de ingeniería para lograr la resistencia y la resiliencia de las estructuras o de los sistemas frente a las amenazas (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009).

8.2.1 Medidas preventivas y/o correctivas para movimientos en masa

Esta sección se basa principalmente en la información obtenida del Manual de ingeniería de taludes (Ayala, & Andreu, 2006) y

del *Estudio de riesgos Geológicos del Perú, Franja n° 1* (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

En este acápite se dan algunas propuestas generales de solución frente a los problemas generados por movimientos en masa que se encuentran en la ciudad con la finalidad de reducir los daños que puedan ocasionar, o mejor aún para reducir la ocurrencia de nuevos eventos.

Se hace énfasis en las medidas estructurales de estabilización por procesos constructivos, los cuales se recomienda que sean empleados en terrenos potencialmente inestables o con movimientos de laderas activos, siempre y cuando la velocidad de este lo permita. De forma general, la selección de un método constructivo de estabilización para cada caso dependerá de las características del suelo y su movimiento, incluyendo para este último el tipo, tamaño, volumen, velocidad, profundidad de la superficie de falla, geometría de la ladera, disponibilidad de materiales y accesibilidad al sitio.

8.2.1.1 Medidas para deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas

Las medidas correctivas se pueden realizar en: 1) taludes en construcción; 2) laderas que tienen pendientes fuertes y es necesaria su estabilización; 3) para estabilizar fenómenos de rotura, sobre todo aquellos que pueden trabajarse a nivel de construcción. Para definir la solución ideal es necesario valorar diferentes parámetros, sean de tipo constructivo o económico.

a) **Corrección por modificación de la geometría del talud**

Cuando un talud es inestable o su estabilidad es precaria se puede modificar su geometría, con la finalidad de obtener una nueva disposición que resulte estable. Esta modificación busca lograr al menos uno de los dos efectos siguientes:

- Disminuir las fuerzas que tienden al movimiento de la masa.
- Aumentar la resistencia al corte del terreno mediante el incremento de las tensiones normales en zonas convenientes de la superficie de rotura.

Lo primero se consigue reduciendo el volumen de la parte superior del deslizamiento y lo segundo incrementando el volumen en el pie de este.

Las acciones que pueden realizarse sobre la geometría de un talud para mejorar su estabilidad son las siguientes:

Eliminar la masa inestable o potencialmente inestable. Esta es una solución drástica que se aplica en casos extremos, comprobando que la nueva configuración no es inestable.

Eliminar el material de la parte superior (descabezamiento) de la masa potencialmente deslizante. En esta área, el peso del material contribuye más al deslizamiento y presenta una menor resistencia, dado que la parte superior de la superficie de deslizamiento presenta una máxima inclinación. Por ello, la eliminación de escasas cantidades de material produce aumentos importantes del factor de seguridad.

Construcción de escolleras en el pie del talud. Puede efectuarse en combinación con el descabezamiento del talud o como una medida independiente (figuras 8.1 y 8.2).

El peso de la escollera en el pie del talud se traduce en un aumento de las tensiones normales en la parte baja de la

superficie del deslizamiento, lo que aumenta su resistencia. Este aumento depende del ángulo de rozamiento interno en la parte inferior de la superficie del deslizamiento. Si es elevado, el deslizamiento puede producirse por el pie y es más ventajoso construir la escollera encima del pie del talud, pudiéndose estabilizar grandes masas deslizantes mediante pesos relativamente pequeños de escollera. Si el ángulo de rozamiento interno es bajo, el deslizamiento suele ocurrir por la base y es también posible colocar el relleno frente al pie del talud. En cualquier caso, el peso propio de la escollera supone un aumento del momento estabilizador frente a la rotura. Por último, cuando la línea de rotura se ve forzada a atravesar la propia escollera, esta se comporta además como un elemento resistente propiamente dicho.

Algo que debe tomarse en cuenta constantemente es que la base del relleno debe ser siempre drenante, pues en caso contrario su efecto estabilizador puede verse disminuido, especialmente si el relleno se apoya sobre material arcilloso. Puede ser necesario colocar un material con funciones de filtro entre el relleno drenante y el material del talud; para ello puede recurrirse al empleo de membranas geotextiles.

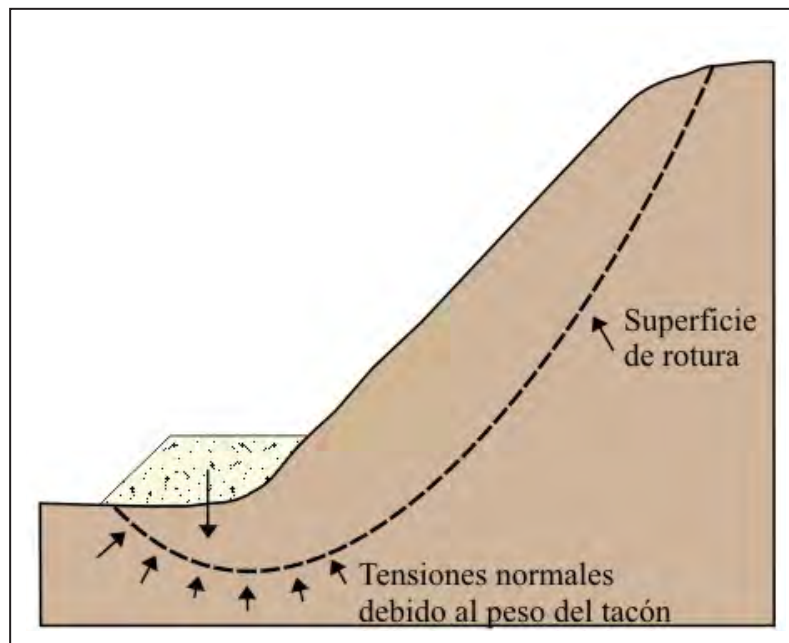


Figura 8.1 Efecto de una escollera sobre la resistencia del terreno (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

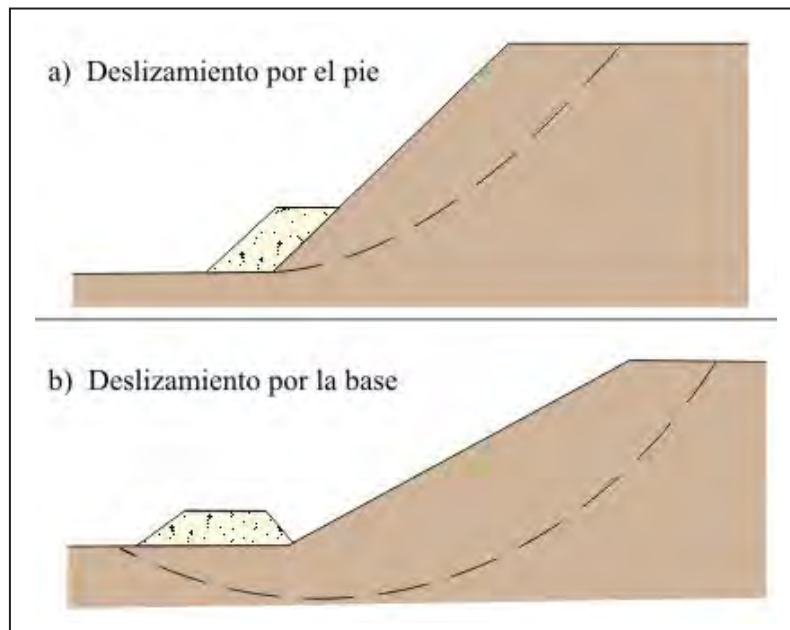


Figura 8.2 Colocación de escollera (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

Tratamiento de taludes con escalonamiento. Es una medida que puede emplearse tanto cuando un talud está comprometido por un deslizamiento o antes de que este se produzca. Su uso es aconsejable, porque facilita el proceso constructivo y las operaciones del talud, retiene las caídas de fragmentos de roca, indeseables en todos los casos, y (si se dispone en ellos) zanjas de drenaje que evacuarán las aguas de escorrentía,

disminuyendo su efecto erosivo y el aumento de las presiones intersticiales (figura 8.3).

Este escalonamiento se suele disponer en taludes en roca, sobre todo cuando se encuentra meteorizada y fracturada, y cuando es importante evitar las caídas de fragmentos de roca, como con los taludes ubicados junto a vías de transporte.



Figura 8.3 Esquema de un talud con bermas intermedias (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

b) Corrección por drenaje

Este tipo de corrección se efectúa con el objeto de reducir las presiones intersticiales que actúan sobre la superficie de deslizamiento (potencial o existente), lo que aumenta su resistencia y disminuye el peso total, y por tanto las fuerzas desestabilizadoras.

Las medidas de drenaje pueden ser de dos tipos:

Drenaje superficial. Su fin es recoger las aguas superficiales o aquellas recogidas por los drenajes profundos y evacuarlas lejos del talud para así evitar su infiltración (figura 8.4).

Las aguas de escorrentía se evacúan por medio de zanjas de drenaje (cunetas de coronación), impermeabilizadas o no, y aproximadamente paralelas al talud. Estas deben situarse a poca distancia de la cresta del talud y detrás de la misma, de manera que eviten la llegada del agua a las grietas de tensión que podrían existir o no. El cálculo de la sección debe hacerse con los métodos hidrológicos.

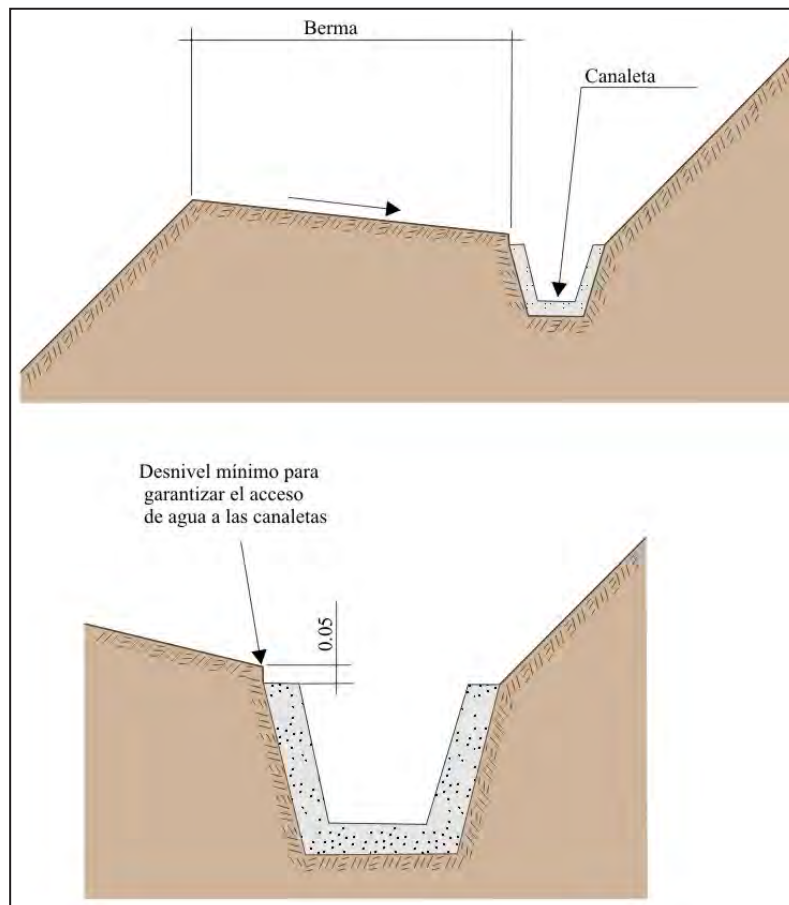


Figura 8.4 Detalle de una canaleta de drenaje superficial (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

Drenaje profundo. La finalidad es deprimir el nivel freático con las consiguientes disminuciones de las presiones intersticiales. Para su uso es necesario conocer previamente las características hidrogeológicas del terreno (figura 8.5).

Se clasifican en los siguientes grupos:

b.1) Drenes horizontales. Se encuentran perforados desde la superficie del talud y son llamados también drenes californianos. Consisten en taladros de pequeño diámetro, aproximadamente

horizontales, entre 5 y 10°, que parten de la superficie del talud y que están generalmente contenidos en una sección transversal del mismo (figuras 8.5 y 8.6).

Sus ventajas son estas:

- Su instalación es rápida y sencilla.
- El drenaje se realiza por gravedad.
- Requieren poco mantenimiento.
- Es un sistema flexible que puede readaptarse a la geología del área.

Sus desventajas son estas:

- Su área de influencia es limitada y menor que en el caso de otros métodos de drenaje profundo.
- La seguridad del talud hasta su instalación puede ser precaria.

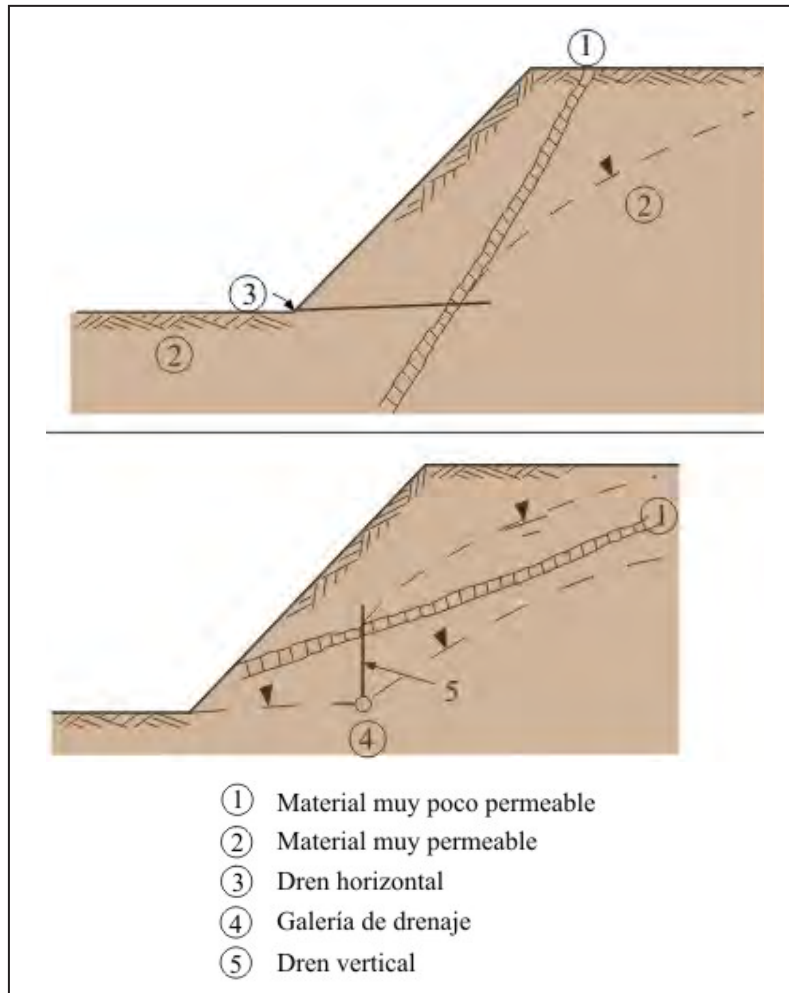


Figura 8.5 Disposición de sistema de drenaje en taludes no homogéneos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

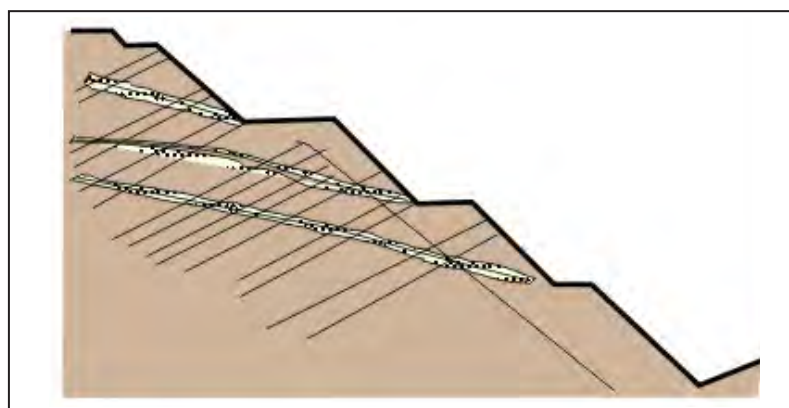


Figura 8.6 Esquema de drenaje de un talud por medio de drenes californianos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

b.2) **Galerías de drenaje.** Se ubican generalmente paralelas al talud y a bastante profundidad.

Son galerías excavadas en el terreno a una distancia considerable de la superficie. Constituyen un sistema bastante efectivo, pero muy caro por lo que su uso solo es recomendable en situaciones críticas y en taludes de gran altura. Para aumentar su radio de acción es necesario instalar drenes perforados desde la galería, aumentando de esta manera su radio de acción y la efectividad del sistema de drenaje (figuras 8.7 y 8.8).

Dentro de sus ventajas se cuentan las siguientes:

- Tienen mayor capacidad drenante, debido a su gran sección transversal.
- Son apropiadas para operaciones a largo plazo, dado que el drenaje se realiza por gravedad.
- Sirven para determinar la calidad del terreno.
- No afectan a la superficie del terreno.
- Son apropiadas para zonas de climas fríos debido a que se ubican a gran profundidad.

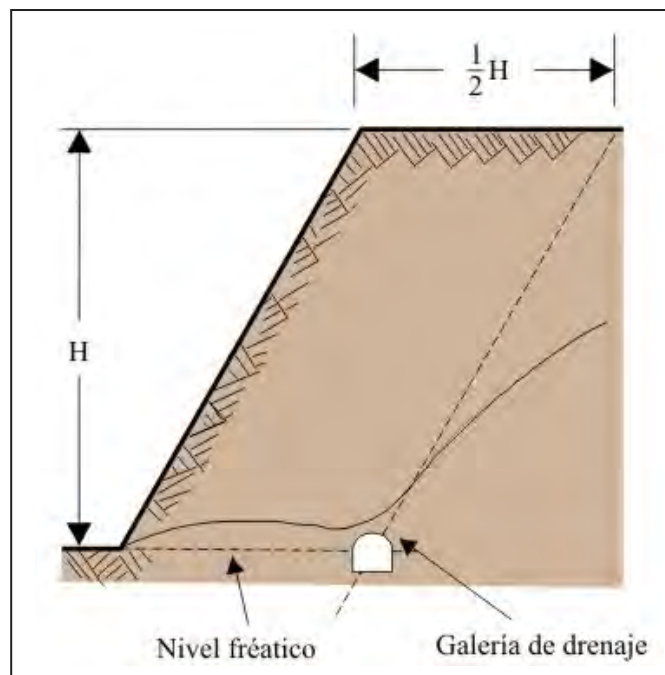


Figura 8.7 Posición óptima de una galería de drenaje (Hoek & Bray, 1997).

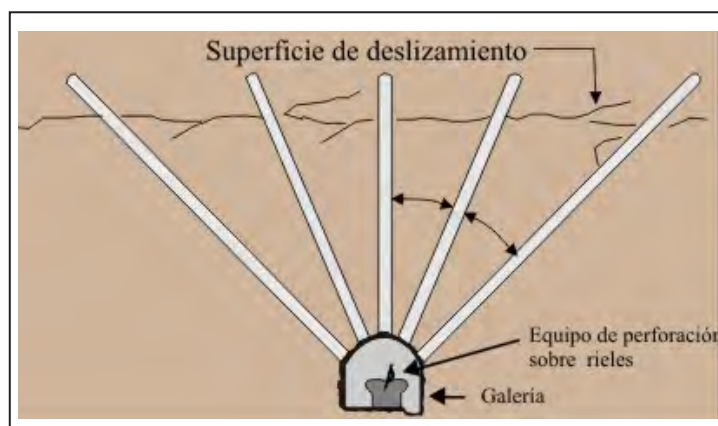


Figura 8.8 Drenaje de superficie de deslizamiento desde una galería de drenaje.

b.3) Zanjas con relleno drenante. Están dispuestas en la superficie del talud o al pie de este. Consisten en zanjas rellenas de material drenante, excavadas en el talud o más allá del pie de este y cuya acción drenante se limita a profundidades pequeñas (figura 8.9).

Pueden ser de dos tipos:

Zanjas de talud. Son las que siguen la línea de máxima pendiente del talud y se aplican cuando los deslizamientos están situados a poca profundidad (figura 8.10).

Zanjas horizontales. Son paralelas al talud y se sitúan al pie de este.

Son útiles los drenes en forma de “espina de pescado” (figura 8.11), que combinan una zanja drenante según la línea de máxima pendiente con zanjas secundarias (espinas) ligeramente inclinadas que convergen en la espina central. Su construcción y mantenimiento en zonas críticas debe tener buena vigilancia.

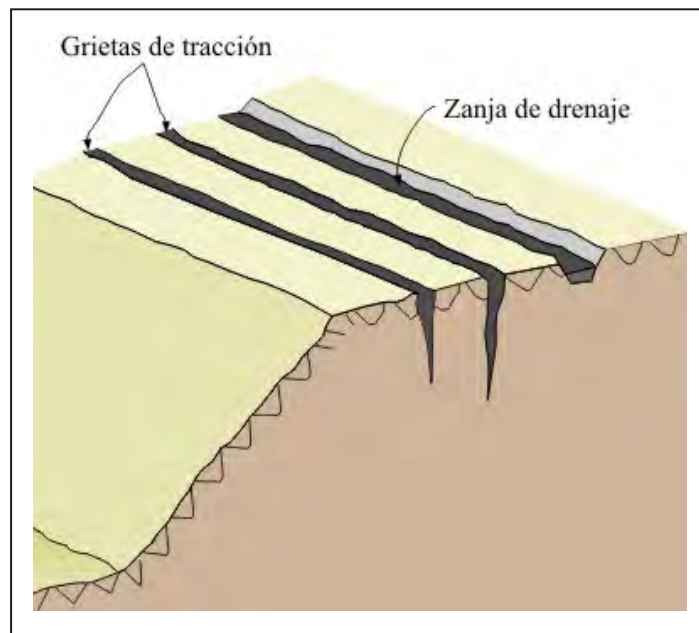


Figura 8.9 Posición óptima de una galería de drenaje (Hoek & Bray, 1997).

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

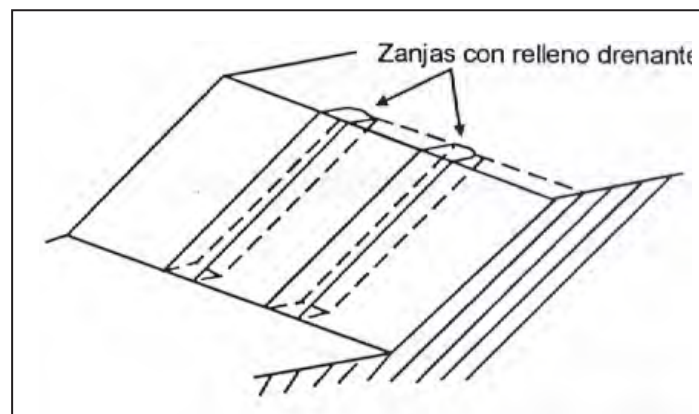


Figura 8.10 Zanjas de talud

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

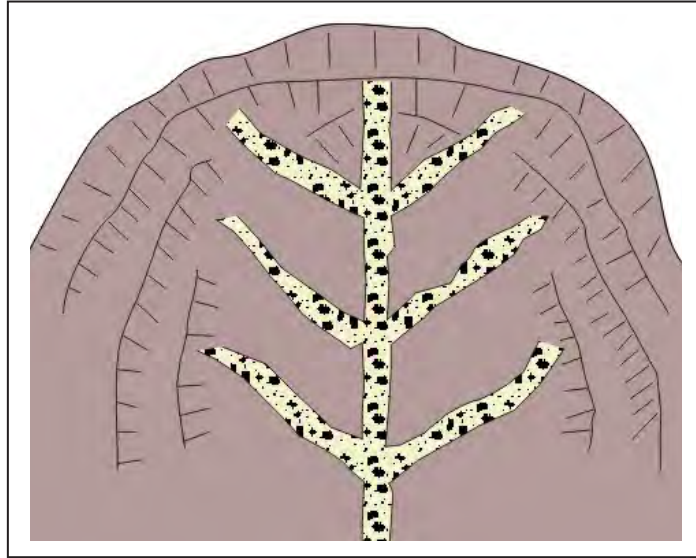


Figura 8.11 Drenaje tipo espina de pescado.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

C) Corrección por elementos resistentes

C.1) Anclajes. Los anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados desde el talud y cementadas (figura 8.12), que se emplean como medida estabilizadora de taludes tanto en roca como en terreno suelto. La longitud de los anclajes varía entre 10 y 100 m, y el diámetro de la perforación entre 75 y 125 mm.

Son elementos que trabajan a tracción y favorecen la estabilidad del talud de dos formas.

- Proporcionan una fuerza contraria al movimiento de la masa deslizante.
- Producen un incremento de las tensiones normales en la superficie de rotura existente o potencial, lo que provoca un aumento de la resistencia al deslizamiento en dicha superficie.

En un anclaje se distinguen tres partes fundamentales:

- **Zona de anclaje.** Es la parte solidaria al terreno, encargada de transferir los esfuerzos al mismo.

- **Zona libre.** Es la parte en que la armadura se encuentra independizada del terreno que la rodea, de forma que puede deformarse con total libertad al ponerse en tensión.
- **Cabeza.** Es la zona de unión de la armadura con la placa de apoyo.

Cuando se proyecta instalar anclajes en un talud es necesario poseer información detallada sobre las características geológicas y resistentes del terreno.

La elección del tipo de anclaje (activo, pasivo o mixto; bulones o cables) debe regirse según criterios técnicos.

Es importante tener en cuenta la situación de la zona de anclaje que debe estar incluida en terreno estable o, lo que es lo mismo, toda su longitud debe quedar detrás de la posible superficie de rotura.

Además, se recomienda entre anclajes una separación por razones constructivas de 2 y 5 m. La orientación de los anclajes en planta y alzado debe establecerse buscando la mayor eficacia y economía; por razones constructivas es recomendable que descendan a partir de la cabeza con una inclinación del orden de 10 a 15°. La dirección más económica depende de diversos factores; entre ellos, se encuentra la posición de la roca que se desea estabilizar.

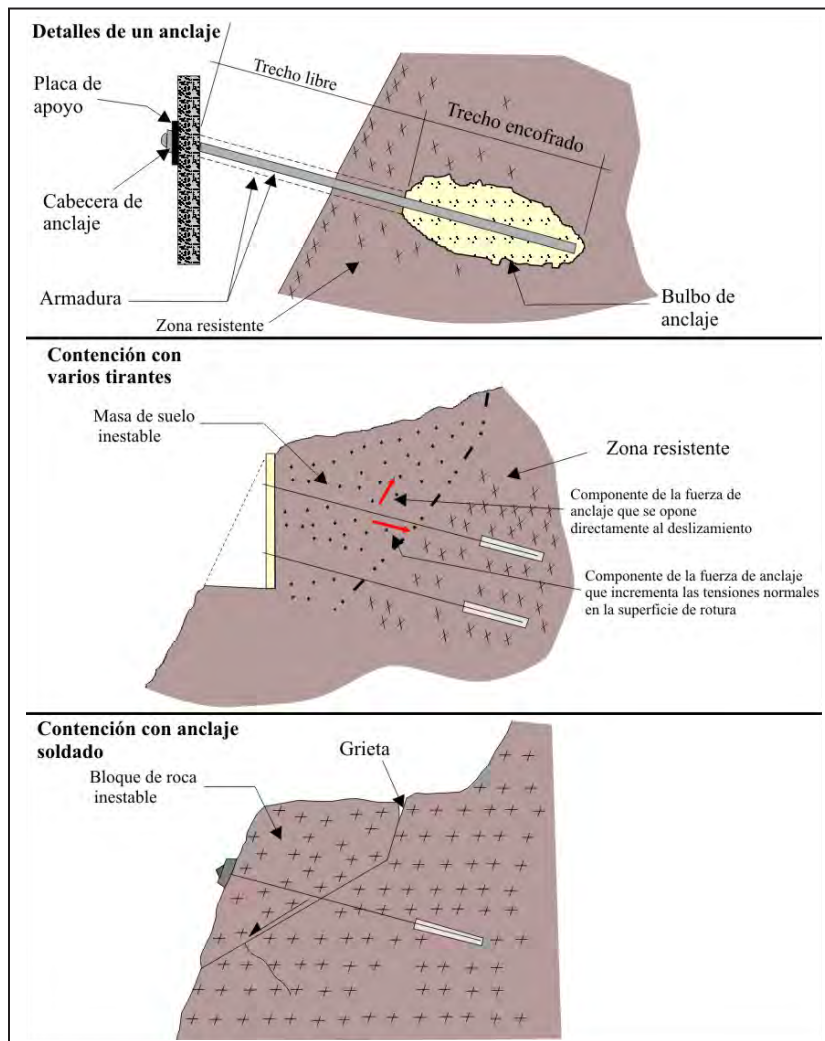


Figura 8.12 Detalles de un anclaje y ejemplos de aplicación.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

C.2) Muros. Se emplean frecuentemente como elementos resistentes en taludes (figura 8.13).

En ocasiones se emplean para estabilizar deslizamientos existentes o potenciales al introducir un elemento de contención al pie (figura 8.14). Esta forma de actuar puede tener varios inconvenientes. En primer lugar, la construcción del muro exige cierta excavación en el pie del talud, lo cual favorece la inestabilidad hasta que el muro esté completamente instalado. En segundo lugar, el muro no puede ser capaz de evitar posibles deslizamientos por encima o por debajo de este.

Una contención solo puede sostener una longitud determinada de deslizamiento, ya que en caso contrario el deslizamiento sobrepasa al muro. Cuando quieran sujetarse deslizamientos

más largos, debe recurrirse a un sistema de muros o a otros de los procedimientos expuestos.

Por todo ello, en taludes con signos evidentes de inestabilidad puede ser más apropiado realizar el muro con el fin de retener un relleno estabilizador.

En desmontes y terraplenes en los que la falta de espacio impone taludes casi verticales, el empleo de muros resulta casi obligatorio. Este es un caso frecuente en la construcción de vías de transporte; en ocasiones, como en el caso de un desmonte en una ladera, puede resultar más económica la construcción de un muro frente al costo de una sobreexcavación requerida si aquel no se realiza. La construcción de un muro es generalmente una operación costosa. A pesar de ello, los muros se emplean con frecuencia, pues en muchos casos son la única solución viable.

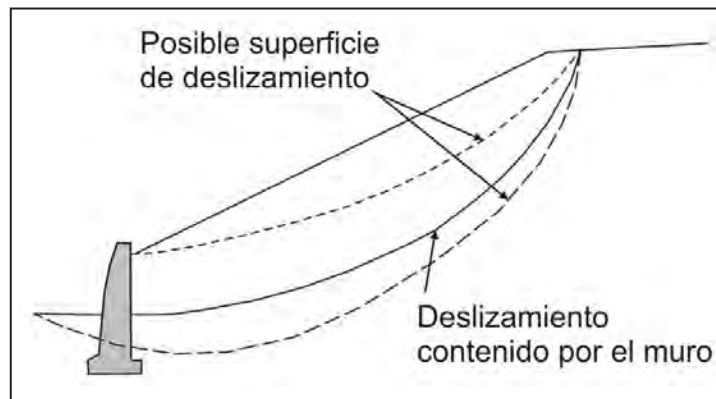


Figura 8.13 Contención de un deslizamiento mediante un muro.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

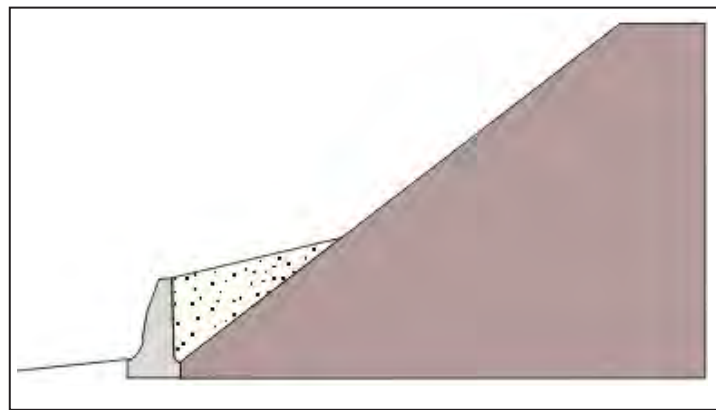


Figura 8.14 Relleno estabilizador sostenido por el muro.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

Los muros se pueden clasificar en tres grupos (figura 8.15):

- **Muros de sostenimiento.** Se construyen separados del terreno natural y se rellenan posteriormente.
- **Muros de contención.** Generalmente van excavados y se construyen para contener un terreno que sería probablemente inestable sin la acción del muro.
- **Muros de revestimiento.** Su misión consiste esencialmente en proteger el terreno de la erosión y meteorización además de proporcionar un peso estabilizador.

Cuando se proyecta un muro se debe determinar las cargas a las que va a estar sometido y su distribución, lo que permitirá planificar una estructura capaz de resistirlas.

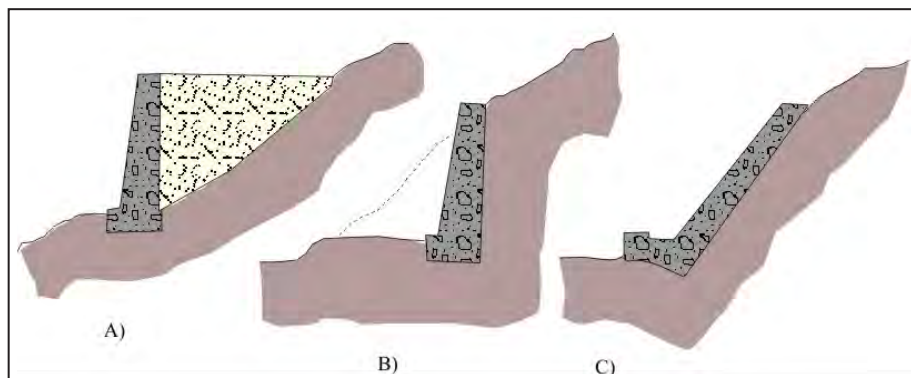


Figura 8.15 a) muro de sostenimiento; b) muro de contención; c) muro de revestimiento.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

Las comprobaciones que deben efectuarse en un caso típico son las siguientes:

- Estabilidad general del sistema muro-terreno al deslizamiento; la estabilidad general del muro incluye la estabilidad al vuelco y al deslizamiento.
- Resistencia del terreno del cimientó.
- Ausencia de tracciones en la base del muro.
- Resistencia estructural, que consiste en comprobar que las tensiones máximas en el muro no sobrepasen los valores admisibles.

Tipos de muros

Muros de gravedad. Son los muros más antiguos, conforman elementos pasivos en los que el peso propio es la acción estabilizadora fundamental (figuras 8.16 a y b, 8.17 y 8.18).

Se construyen de hormigón en masa, pero también existen de ladrillo o mampostería, y se emplean para prevenir o detener deslizamientos de pequeño tamaño. Sus grandes ventajas son su facilidad constructiva y bajo costo.

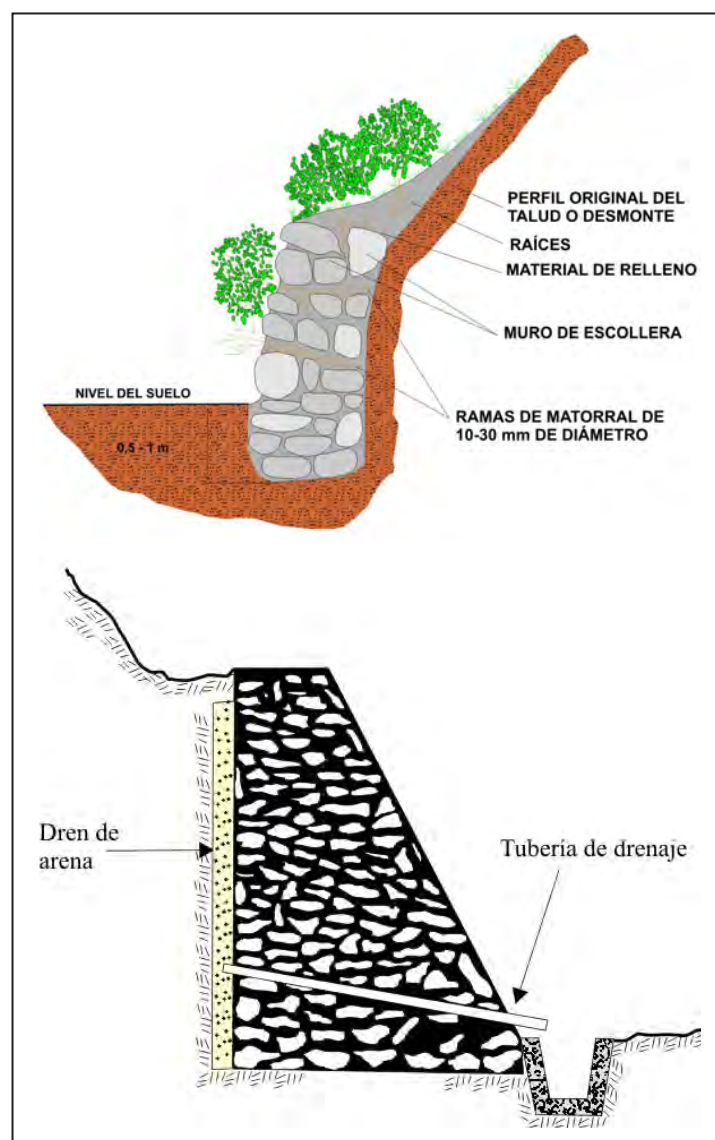


Figura 8.16 a) muros de gravedad de piedra seca. b) muros de gravedad de piedra argamasada.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

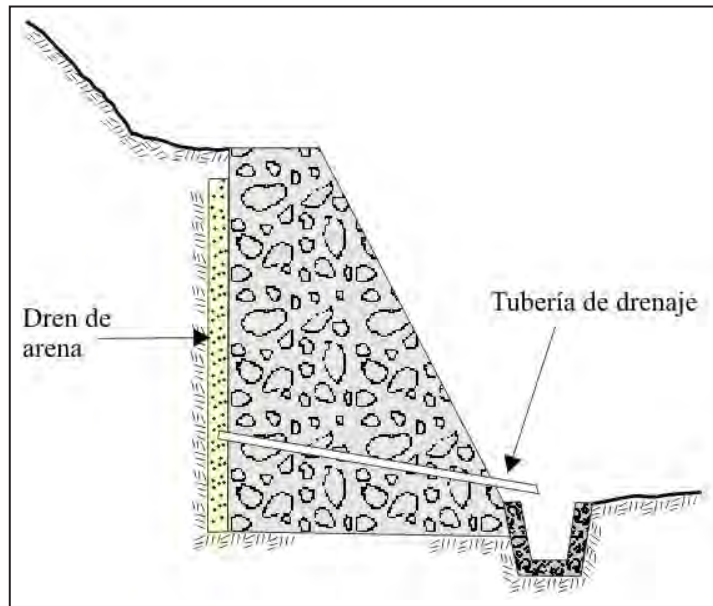


Figura 8.17 Muros de gravedad de concreto ciclópeo.
Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

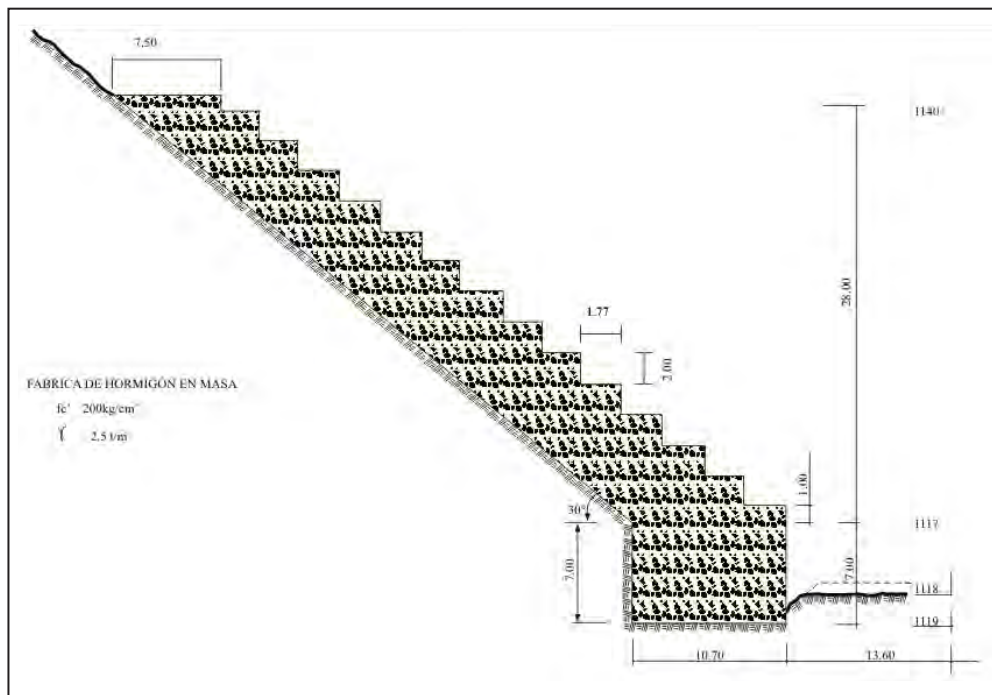


Figura 8.18 Muros de espesor máximo.
Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

Muros aligerados. Son muros de hormigón armado y existen dos tipos fundamentales.

a) **Muros en L.** Son aquellos en los que la pantalla vertical actúa como viga en voladizo y contrarrestan el momento volcador del empuje del terreno principalmente con el momento estabilizador de las tierras situadas sobre el talón (figuras 8.19 y 8.20).

La relación H/B está comprendida generalmente entre 1.5 y 2 y la longitud de zarpa B' suele ser un tercio de B . La presión sobre el cimiento es menor que en los muros de gravedad, por lo que son adecuados para cimentaciones malas. Los esfuerzos sobre cada una de las partes del muro (pantalla vertical, talón y zarpa) se calculan suponiendo que se comportan como vigas en voladizo.

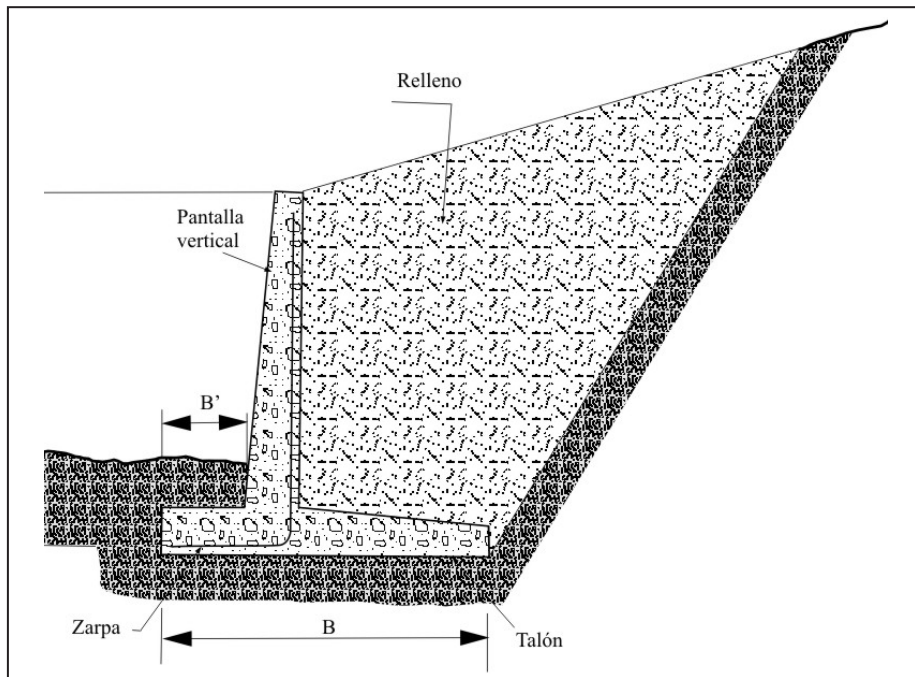


Figura 8.19 Muros en L.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

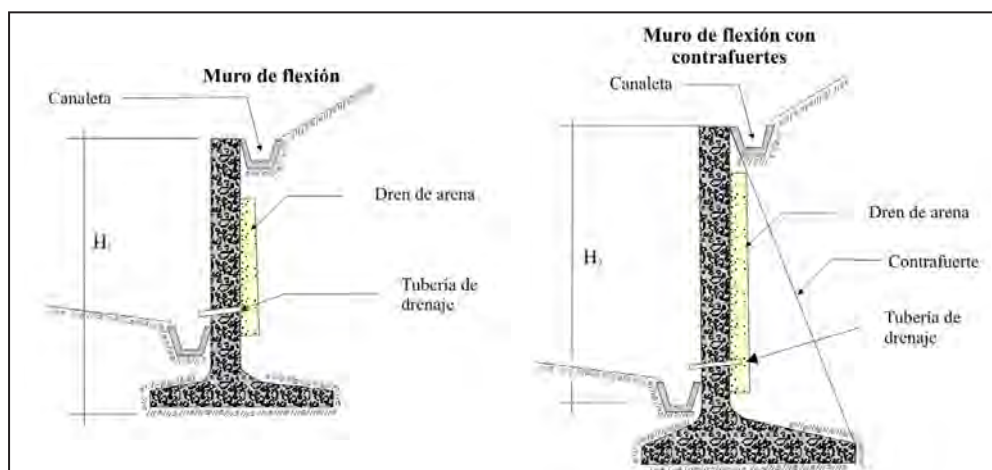


Figura 8.20 Muros de concreto armado tipo flexión.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

b) Muros con contrafuertes. Los contrafuertes pueden disponerse en el intradós y el trasdós. En el primer caso, lo que hace es aligerar un muro de gravedad suprimiendo hormigón en las zonas que, por estar más próximas al pie, colaboran poco al efecto estabilizador. En el segundo caso, se trata realmente de un muro en L reforzado con contrafuertes interiores.

Muros de gaviones. Los gaviones son elementos con forma de prisma rectangular que consisten en un relleno granular constituido por fragmentos de roca no degradable (caliza, andesita, granitos, etc.), retenido por una malla de alambre metálico galvanizado (figura 8.21).

Los muros de gaviones trabajan fundamentalmente por gravedad. Generalmente, se colocan en alturas bajas, aunque

algunas veces se colocan en alturas medianas (hasta 25 m de alto y 10 m de ancho) y funcionan satisfactoriamente. La relación entre la altura del muro y el ancho de la base de este es muy variable, y suele estar comprendida entre 1.7 y 2.4.

Las ventajas que presenta son estas:

- Instalación rápida y sencilla.
- Estructuras flexibles que admiten asentamientos diferenciales del terreno.
- Sin problemas de drenaje, ya que son muy permeables.
- Los empujes sobre el muro, y su estabilidad al vuelco y deslizamiento se calculan de igual forma que en el caso de un muro de gravedad.

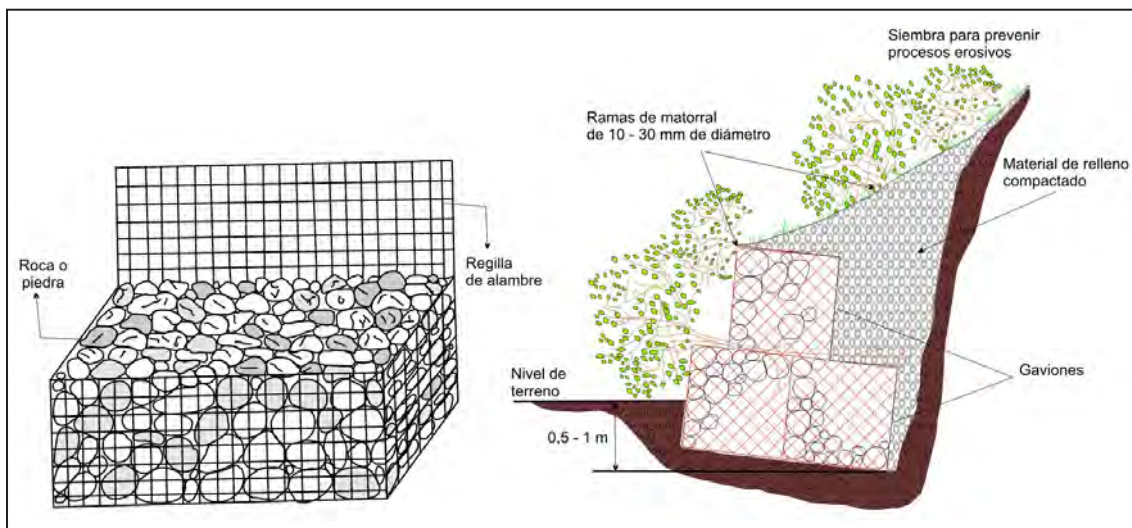


Figura 8.21 Muro de gavión.

C.3) Pilotes

Las pantallas de pilotes (figura 8.22) consisten en alineaciones de estos elementos, siendo el espacio entre dos adyacentes lo suficientemente pequeño como para conseguir un sostenimiento relativamente continuo.

Su empleo en taludes tiene dos aspectos fundamentales:

- Como sostenimiento de taludes excavados tiene la gran ventaja de que pueden instalarse antes de la excavación.
- Como medida estabilizadora de deslizamientos existentes o potenciales, se instalan cerca del pie del talud y presentan la ventaja frente a los muros de contención de requerir muy poca excavación y de no afectar significativamente el talud durante su construcción.

Los pilotes presentan el inconveniente de tener un costo elevado. En la estabilización de taludes se emplean generalmente

pilotes perforados o de extracción. Los pilotes hincados o de desplazamiento se emplean únicamente para estabilizar los deslizamientos superficiales.

Los pilotes se oponen al deslizamiento mediante la transmisión de esfuerzos a las capas inferiores estables. Por lo tanto, las pantallas de pilotes tienen su principal aplicación en aquellos casos en que existe, a una profundidad no excesiva, un estrato de material estable y competente. Los pilotes empleados en taludes suelen ser de hormigón armado. Cuando los esfuerzos a los que van a ser sometidos son de gran magnitud se puede aumentar su capacidad portante mediante el empleo de secciones combinadas: cilindros metálicos rellenos de hormigón y reforzados con perfiles metálicos, o con grupos de cables y barras de alta resistencia e inyectados a presión. En algunas ocasiones se emplean pilotes pretensados. El diámetro de los pilotes que se emplean en taludes varía entre 40 y 120 cm.

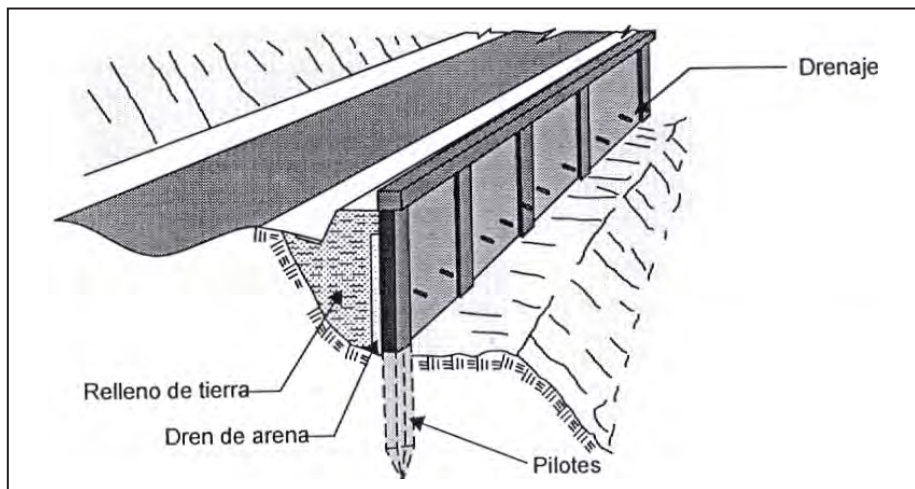


Figura 8.22 Ejemplo de muro con pilotes.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

C.4) Muros pantalla

Son muros enterrados de hormigón armado, hormigonados in situ. Su acción estabilizadora ante los deslizamientos existentes o potenciales es muy similar a la de las pantallas de pilotes (figura 8.23). A diferencia de estas, los muros pantalla constituyen elementos continuos.

Como medida estabilizadora de taludes tiene su máxima aplicación frente a las pantallas de pilotes cuando el material inestable y el sustrato son de fácil excavación.

Para construir un muro pantalla se excava una trinchera sin entibación, cuyas paredes se mantienen estables gracias a

la utilización de lodos bentoníticos con los que se rellenan las zanjas a medida que se extrae el detritus de la excavación. Una vez colocados los tubos junta o tubos de encofrado, cuya misión es conseguir una buena junta de hormigonado, y una vez instalada la armadura, se procede al hormigonado a través de un conducto que llega hasta el fondo de la zanja. El hormigón va relleno la excavación y al mismo tiempo desplaza al lodo.

El tamaño del muro depende de las características de la maquinaria y puede alcanzar una profundidad hasta de 40 m. Existen fundamentalmente dos técnicas para la ejecución de la excavación: la excavación con cuchara bivalva y la perforación con circulación inversa.

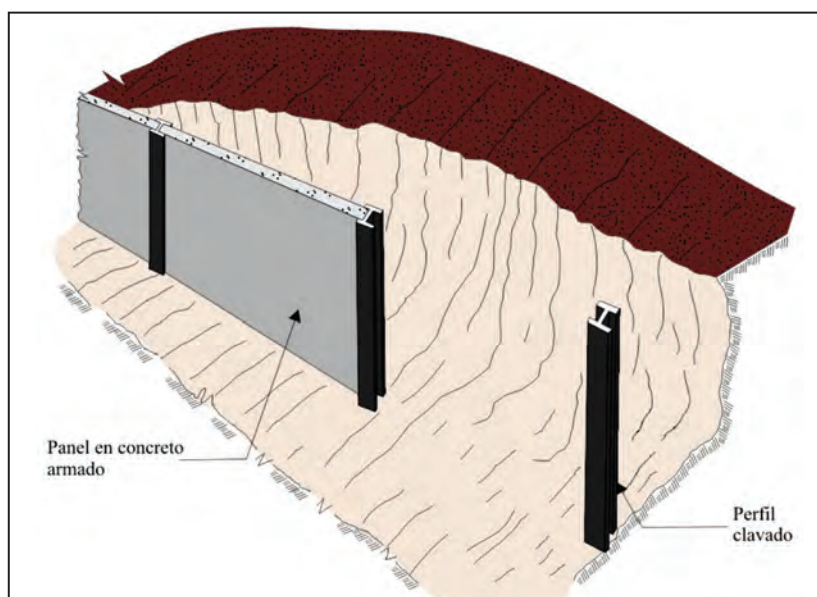


Figura 8.23 Ejemplo de muro de pantalla.

Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000.

D) Correcciones superficiales

Las medidas de corrección superficial se aplican en la superficie de un talud de manera que afectan solo a las capas más superficiales del terreno y tienen fundamentalmente los siguientes fines:

- Evitar o reducir la erosión y meteorización de la superficie del talud.
- Eliminar los problemas derivados de los desprendimientos de rocas en los taludes donde estos predominan.
- Aumentar la seguridad del talud frente a pequeñas roturas superficiales.

Los principales métodos empleados son estos:

d.1) Mallas de alambre metálico

Se cubre con estas la superficie del talud con la finalidad de evitar la caída de fragmentos de roca, lo cual es siempre peligroso, especialmente, en vías de transporte o cuando hay personal trabajando al pie del talud.

Las mallas de fierro galvanizado retienen los fragmentos sueltos de rocas y conducen los trozos desprendidos hacia una zanja en el pie del talud. Son apropiadas cuando el tamaño de roca a caer se encuentra entre 0.60 y 1.00 m.

La malla se puede fijar al talud de varias maneras siempre en la parte superior del talud o en bermas intermedias. Como sistemas de fijación pueden emplearse bulones, postes introducidos en bloques de hormigón que pueden a su vez ir anclados o simplemente ser un peso muerto en la parte superior del talud. Durante la instalación se prepara una longitud de malla suficiente para cubrir el talud, con una longitud adicional que es necesaria para la fijación de la malla.

La malla se transporta en rollos hasta el talud, se fija en su parte superior y se desenrolla dejándola caer, y fijándola en la superficie del talud; en la parte final de la malla se suele dejar un metro por encima de la zanja de acumulación de piedras.

d.2) Sembrado de taludes

Mantener una cobertura vegetal en un talud produce indudables efectos beneficiosos, entre los cuales destacan los siguientes:

- Las plantaciones evitan la erosión superficial tanto hídrica como eólica, que puede ocasionar la ruina del talud en el largo plazo.
- La absorción de agua por las raíces de las plantas produce un drenaje de las capas superficiales del terreno.
- Las raíces de las plantas aumentan la resistencia al esfuerzo cortante en la zona del suelo que ocupan.

Para sembrar en taludes se emplean hierbas, arbustos y árboles, y se privilegian especies capaces de adaptarse a las condiciones a las que van a estar sometidos (climas, tipo de suelo, presencia de agua, etc.); suelen convenir especies de raíces profundas y de alto grado de transpiración, lo que indica un mayor consumo de agua. Generalmente, la colonización vegetal de un talud se hace por etapas, comenzando por la hierba y terminando por los árboles.

Los suelos arenosos y areno-arcillosos son ventajosos para un rápido crecimiento de la hierba. Las arcillas duras son inadecuadas a menos que se añadan aditivos o se are el terreno. Cuando la proporción de limo más arcilla es superior al 20 % se puede esperar un crecimiento satisfactorio, pero si es inferior al 5 % el establecimiento y mantenimiento de la hierba resultarán difíciles.

8.2.1.2 Para zonas de flujos y cárcavas

Las erosiones en cárcavas generan abundantes materiales sueltos que son llevados a los cauces de las quebradas. Muchos de estos cauces tienen suficiente material como para la generación de flujos.

Las zonas donde existen cárcavas de gran longitud y presenten un desarrollo irreversible, donde no se pueden corregir con labores de cultivo, se debe prohibir terminantemente cualquier actividad agrícola. El control físico de zonas con procesos de carcavamiento debe de ir integrado a prácticas de conservación y manejo agrícola de las laderas adyacentes por medio de regeneración de la cobertura vegetal, y el empleo de zanjas de infiltración y desviación entre las principales.

Para el control físico del avance de cárcavas se propone un conjunto de medidas, principalmente de orden artesanal, entre las que destacan las siguientes:

- El desarrollo de programas de control y manejo de cárcavas sobre la base de diques o trinchos transversales construidos con materiales propios de la región como troncos, ramas, etc. (figuras 8.24-8.27).
- Zanjas de infiltración articuladas de acuerdo con las condiciones climáticas de la región.
- Permitir el crecimiento de la cobertura vegetal nativa a lo largo de la cárcava y en las zonas circundantes a esta (figura 8.28), asegura su estabilidad, así como la disipación de la energía de las corrientes concentradas en los lechos de las cárcavas.
- Realizar trabajos de reforestación de laderas con fines de estabilización. En la selección de árboles deben contemplarse las características de las raíces, las

exigencias en tipo de suelos y portes que alcanzarán frente a la pendiente y profundidad de los suelos. También, se recomienda que las plantaciones se ubiquen al lado superior de las zanjas de infiltración con el objetivo de captar el agua y controlar la erosión.

- Debe evitarse el sobrepastoreo, ya que deteriora y destruye la cobertura vegetal. Se debe realizar un manejo de las zonas de pastos mediante el repoblamiento de pastos

nativos, empleando sistemas de pastoreo rotativo y sostenible. También debe evitarse la quema de pajonales.

- Zanjas de infiltración articuladas de acuerdo con las condiciones climáticas de las cuencas.
- Protección del lecho de la quebrada con muros escalonados (andenes), utilizando bloques de roca o concreto armado (figura 8.29).

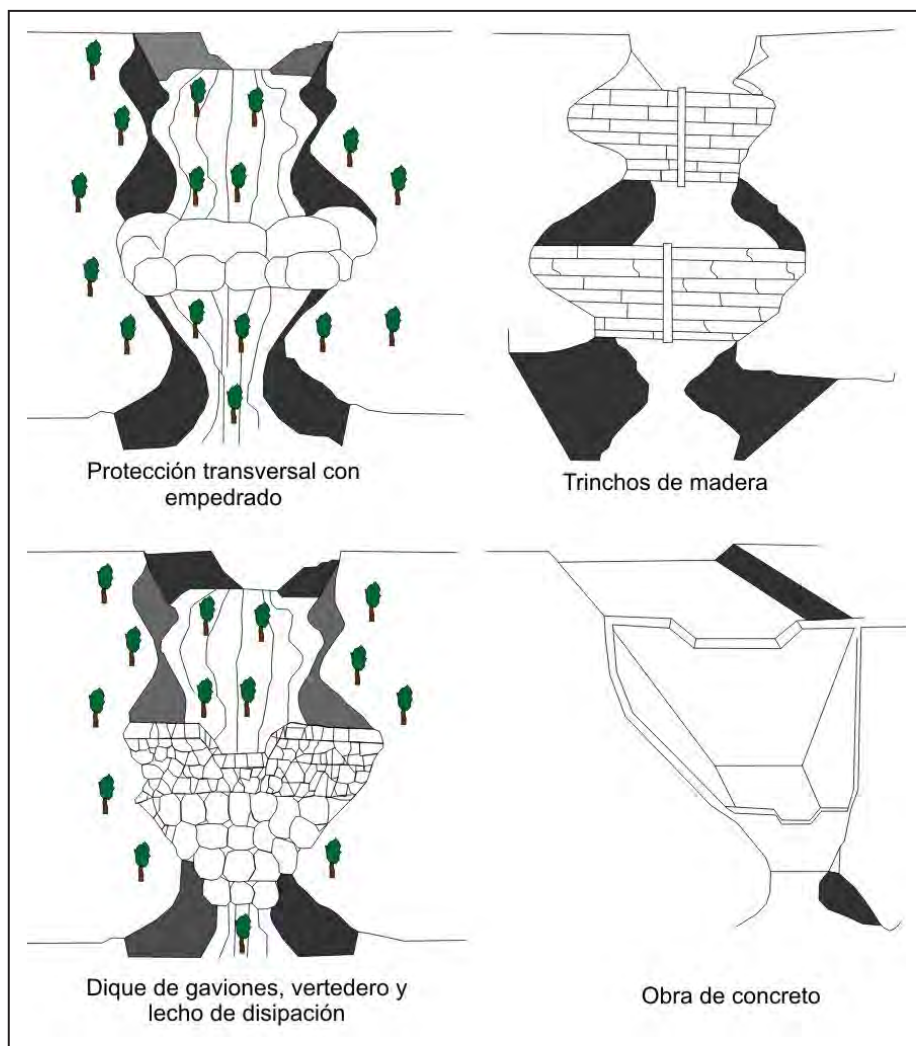


Figura 8.24 Obras hidráulicas transversales para el control de la erosión en cárcavas.

Fuente: Instituto Nacional de Vías-Ministerio de Transporte República de Colombia, 1998.

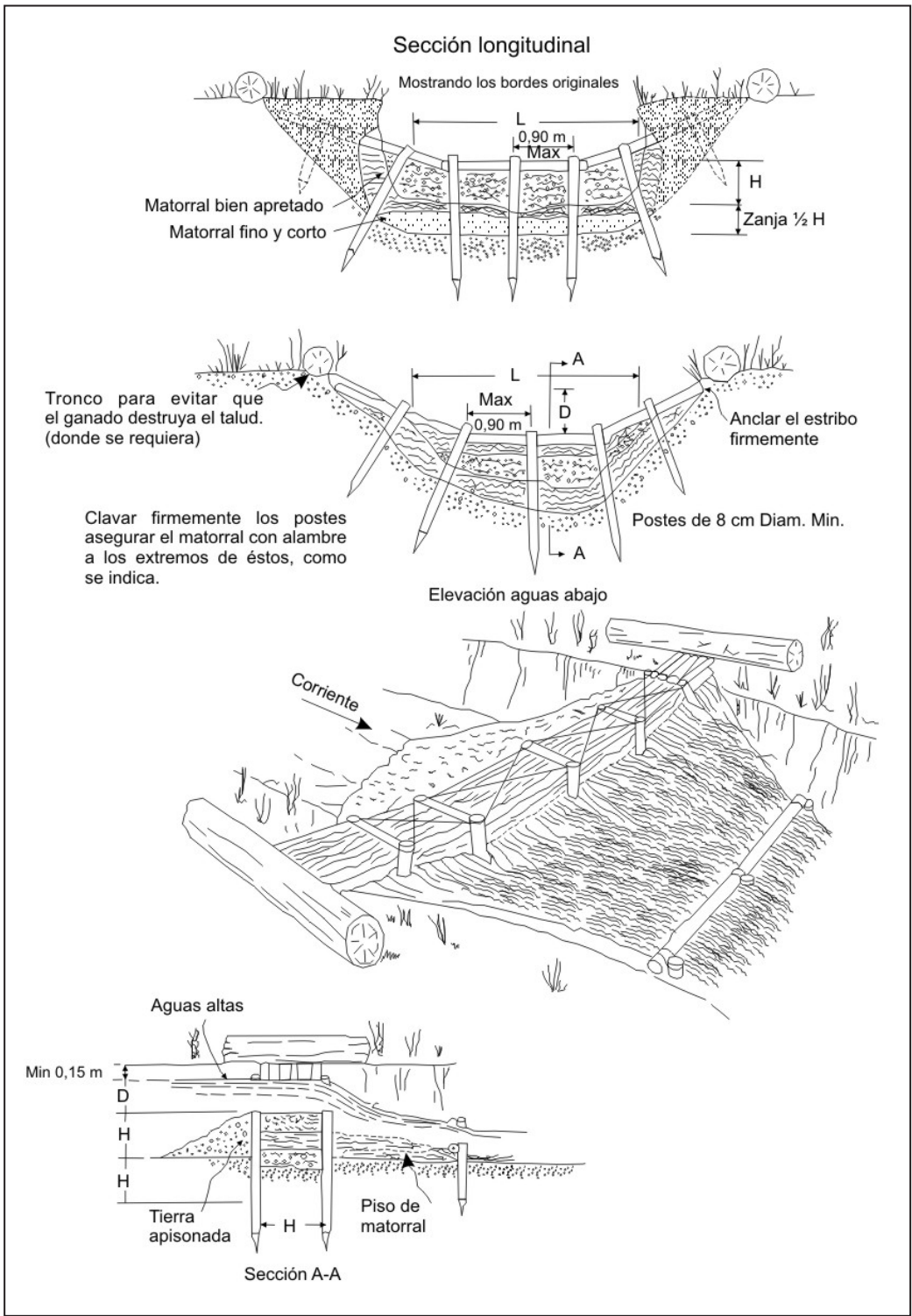


Figura 8.25 Trincho de matorral tipo doble hilera de postes (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964)

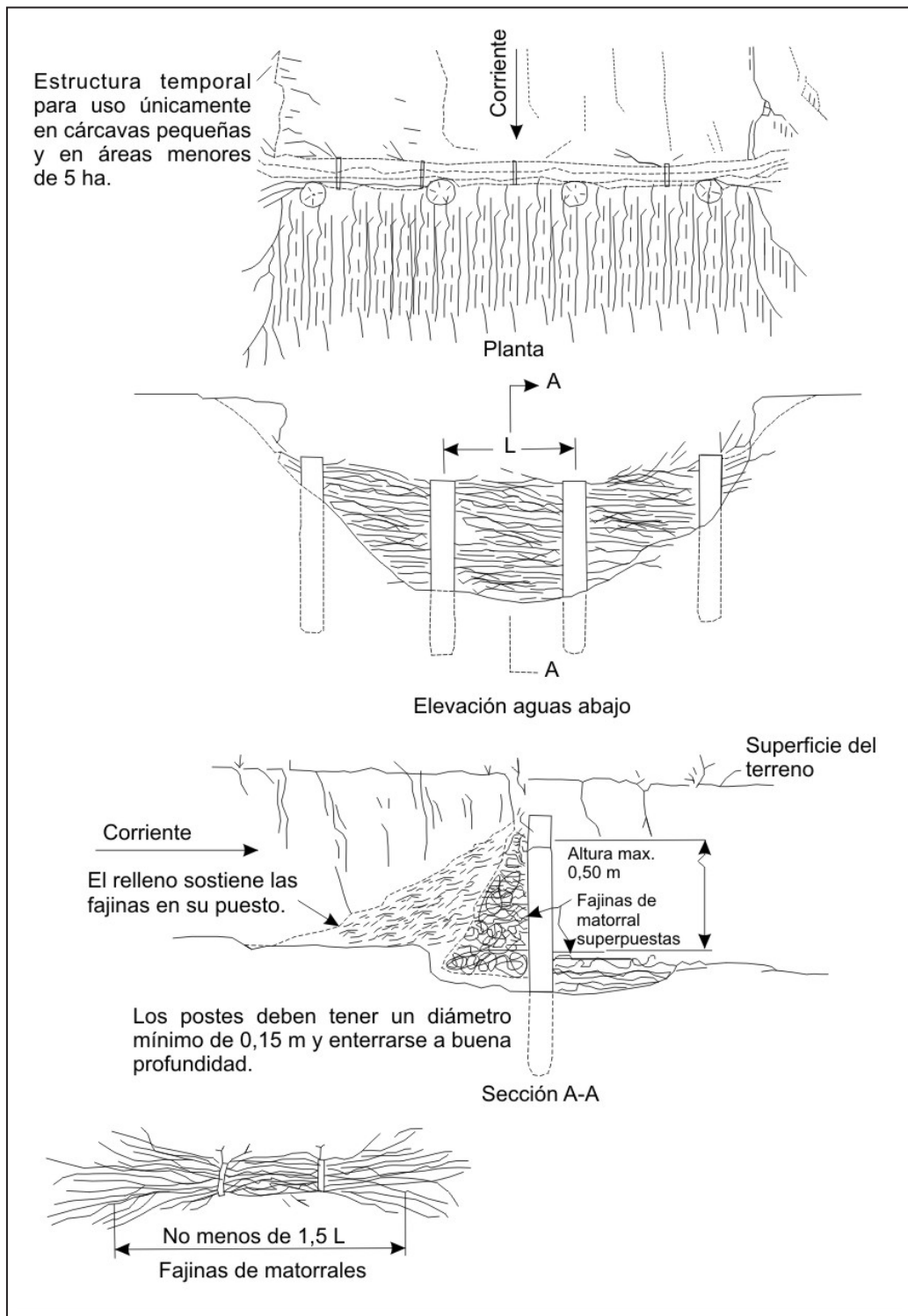


Figura 8.26 Trincho de matorral tipo una hilera de postes (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964).

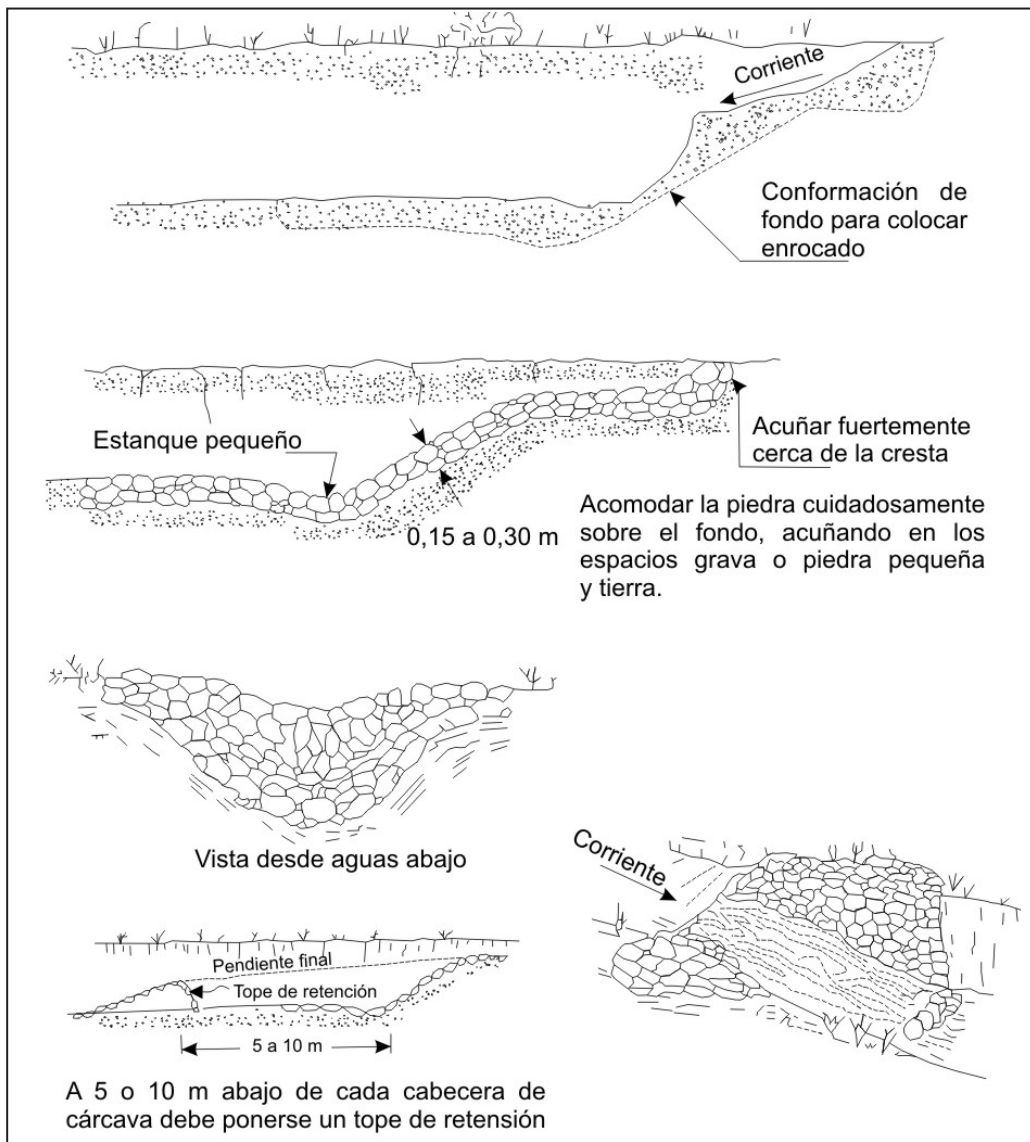


Figura 8.27 Trincho de piedra para cabecera de cárcava en zona de mina (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964)

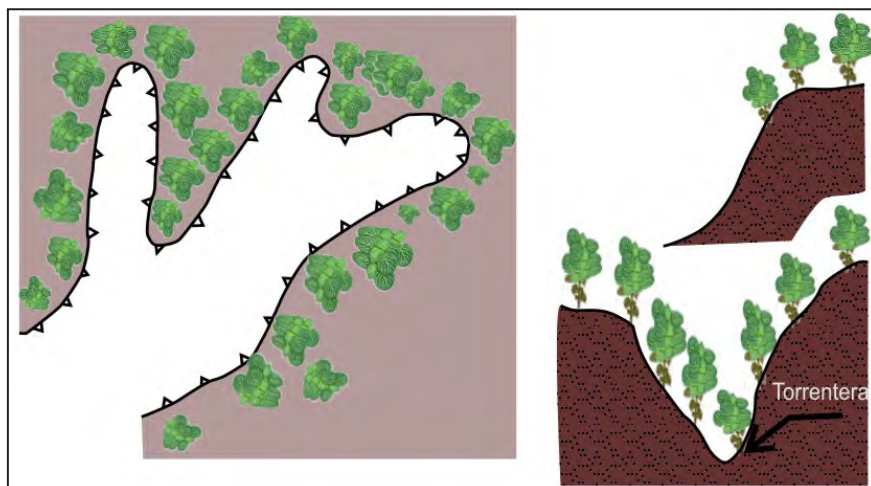


Figura 8.28 Vista en planta y en perfil de los procesos de forestación en cabeceras y márgenes de las áreas inestables.

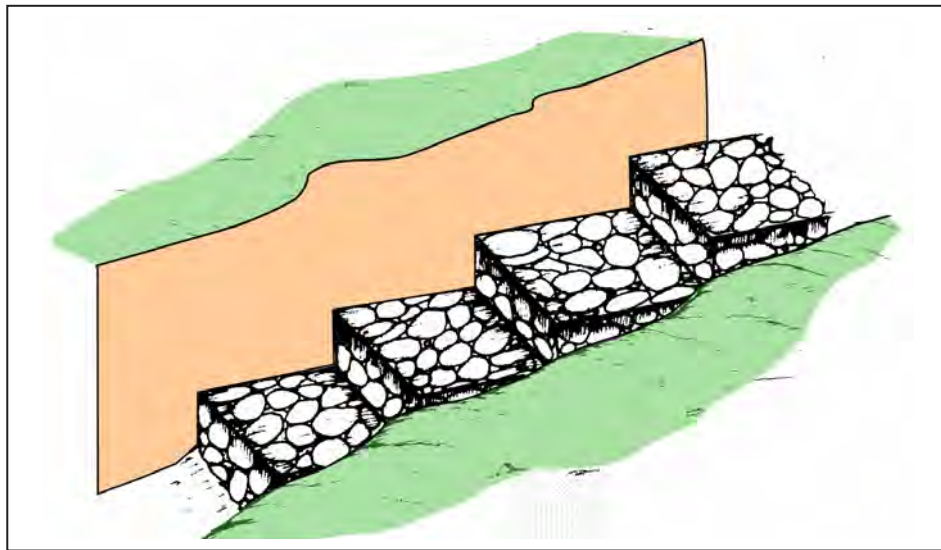


Figura 8.29 Protección del lecho de la cárcava o quebrada.

8.2.2 Otras medidas de prevención para deslizamientos y cárcavas

El proceso de deslizamientos y cárcavas ocurre esencialmente de forma natural, pero también por la actividad antrópica (agrícola, deforestación, etc.) mal desarrollada que acelera el proceso, así mismo por el socavamiento del río al pie de deslizamientos, la utilización de canales sin revestir, etc. Algunas medidas que se proponen para el manejo de estas zonas son las siguientes:

- En cuanto al manejo agrícola, deben evitarse riegos en exceso; estos deben ser cortos y frecuentes, de modo que limiten la infiltración y la retención en la capa superficial del suelo en contacto con los cultivos.
- Los canales deben ser revestidos para minimizar la infiltración, saturación y erosión de los terrenos.
- El sistema de cultivo debe ser por surcos en contorno y conectados al sistema de drenaje para una evacuación rápida del agua.
- No deben construirse reservorios de agua sin revestimiento, ya que esto favorece a la infiltración y saturación del terreno.
- La remoción de la tierra, para realizar el cultivo, debe ser superficial, pues una remoción más profunda realizada con maquinaria puede favorecer la infiltración y saturación del terreno.
- En las cuencas altas se debe favorecer el cultivo de plantas que requieran poca agua y proporcionen una buena cobertura del terreno para evitar el impacto directo de la lluvia sobre el terreno.
- El desarrollo de vegetación natural (pastos, malezas, arbustos, árboles) contribuye a atenuar el proceso de incisión rápida de las masas deslizantes; no obstante, este seguirá produciéndose en forma lenta hasta alcanzar el equilibrio natural entre el suelo y la vegetación nativa.
- Los tramos de carretera que cruzan cauces de quebradas, en donde se producen flujos de detritos (huaico) o de lodo, deben de ser protegidos por medio de gaviones para evitar los efectos de los flujos y el socavamiento producido por avenidas en las quebradas. Los gaviones deben ser contruidos teniendo en cuenta los caudales máximos de las quebradas y deben ser cimentados a una profundidad de 01 m como mínimo.
- Deben realizarse prácticas de conservación y regeneración de la cobertura vegetal natural conformada por pastos, malezas y arbustos.
- Deben realizarse trabajos de reforestación de laderas con fines de estabilización; en la selección de árboles a utilizarse debe contemplarse las características de las raíces, las exigencias en tipo de suelos y portes que alcanzarán frente a la pendiente y profundidad de los suelos. Se recomienda que las plantaciones forestales se ubiquen al lado de las zanjas de infiltración a curvas de nivel con el objeto de captar el agua y controlar la erosión.
- Deben evitarse el sobrepastoreo que produzca deterioro y destrucción de la cobertura vegetal. Debe realizarse un manejo de las zonas de pasturas mediante el repoblamiento de pasturas nativas, empleando sistemas de pastoreo rotativo y evitando la quema de pajonales.

8.2.3 Medidas para el manejo de subcuencas con lechos fluviales secos

En la ciudad de Arequipa existen lechos fluviales y quebradas secas que corresponden a quebradas de régimen periódico-excepcional, subcuencas con presencia de flujos de detritos y lodo (huaicos) ocasionales a extraordinarios, que pueden alcanzar grandes extensiones, con pendientes bajas a fuertes, los cuales pueden transportar grandes volúmenes de sedimentos gruesos y finos. Con el propósito de propiciar la fijación de los sedimentos en tránsito y de minimizar el transporte fluvial es preciso aplicar, en los casos que sea posible, las medidas que se proponen a continuación:

- Encauzamiento del canal principal de los lechos fluviales secos, con remoción selectiva de los materiales gruesos, que pueden ser utilizados en los enrocados y/o espigones para controlar las corrientes (figura 8.30).
- Propiciar la formación y desarrollo de bosques ribereños con especies nativas para estabilizar los lechos.
- La construcción de obras e infraestructuras que crucen estos cauces secos deben construirse con diseños que tengan en cuenta la máxima crecida registrada, que permitan el libre paso de huaicos, evitándose obstrucciones y represamientos con posteriores desembalses más violentos.
- Realizar la construcción de presas de sedimentación escalonadas para controlar las fuerzas de arrastre de las corrientes de cursos de quebradas, que acarrean grandes cantidades de sedimentos durante periodos de lluvia excepcional, cuya finalidad es reducir el transporte de sedimentos gruesos (figura 8.31).
- Evitar en lo posible la utilización del lecho fluvial como terreno de cultivo de modo que se permita el libre discurrir de los flujos hídricos.
- Encauzamiento y dragado de lechos fluviales secos que se activan durante periodos de lluvia excepcional (fenómeno de El Niño), que permitan el libre discurrir de crecidas violentas provenientes de las cuencas media y alta.

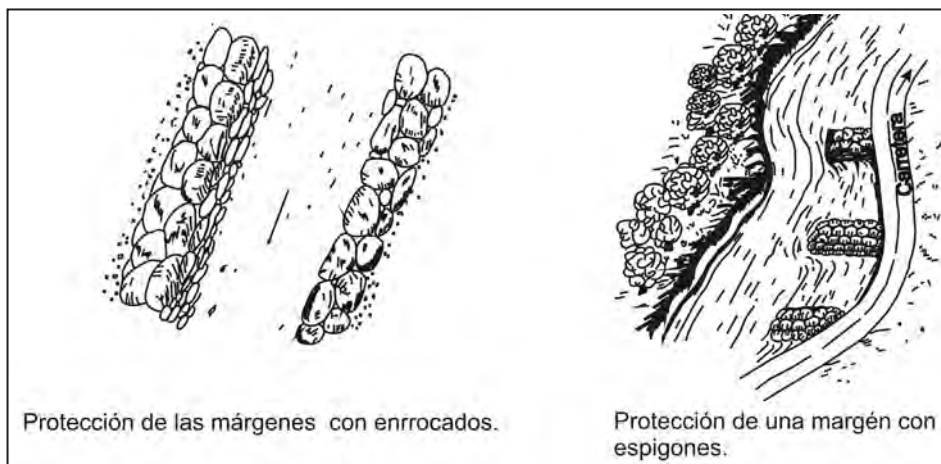


Figura 8.30 Protección de márgenes con enrocados, espigones y siembra de bosques ribereños.

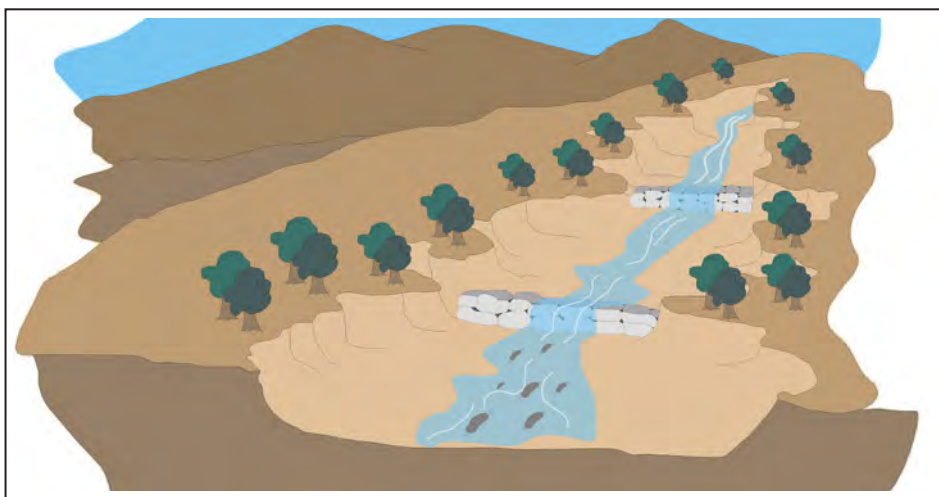


Figura 8.31 Presas transversales a cursos de quebradas.

8.2.4 Medidas preventivas y/o correctivas para inundaciones y flujos rápidos

Las medidas de protección para este tipo de peligros pueden ser de dos tipos:

a) Permanentes

- Tratamiento de la cuenca para disminuir el flujo de aguas; por ejemplo, la construcción de andenes por su forma escalonada impide que el agua corra pendiente debajo de manera violenta y retiene suelos cargados de nutrientes aprovechables para fines agrícolas. Asimismo, debe protegerse la cobertura vegetal, ya que mediante el resembrado de gramíneas y árboles se protege los suelos de la erosión devolviéndoles su capacidad de retención del agua.
- Construcción de obras de ingeniería como presas, reservorios de regulación y construcción de canales que permitan mantener ciertas áreas libres de inundaciones.
- Obras de regulación para asegurar el uso económico de las llanuras anegadizas, estudios sencillos que se realicen en estas áreas permitirán determinar los niveles máximos alcanzados en pasadas inundaciones delimitándose las zonas amenazadas por este fenómeno.
- La construcción de puentes, alcantarillas, tuberías de agua y desagüe, e infraestructura hidráulica (canales y acueductos) que cruzan cursos de agua, deben ser realizados teniendo en cuenta diseños que contemplen los caudales máximos de las quebradas y ríos; estos diseños deben ser resultado de estudios hidrológicos donde se determinen las máximas avenidas de los cursos de agua. De igual forma, la ubicación de estas obras debe ser realizada teniendo en cuenta la geología y geomorfología de la zona. Estas dos recomendaciones buscan reducir los daños causados por inundaciones a consecuencia de desbordes generados por el estrechamiento y obstrucción de cursos de ríos o quebradas por la presencia de obras subdimensionadas (puentes, pontones y alcantarillas), pilares, vigas de la loza del puente, tuberías de desagua, etc. (figuras 8.32 y 8.33).

b) De emergencia

- Construcción de defensas o refugios y mejoramiento de las existentes
- Limpieza de canales y acequias
- Acciones para combatir la inundación o el flujo rápido
- Evacuación de personas y propiedades de las zonas amenazadas
- Reprogramación de actividades para reducir las pérdidas e interrupciones ocasionadas por las inundaciones y flujos rápidos.

c) Sistemas de protección contra inundaciones

Deben consistir en:

- Una línea principal de defensa que proteja toda la zona.
- Líneas locales de defensa que protejan diversas partes de la zona, si queda destruida la línea principal de defensa.

Las estructuras de las líneas de defensa de protección contra las inundaciones deben consistir en lo siguiente:

- Diques de defensa (malecones) o terraplenes, erigidos para proteger el terreno situado detrás. Deberá preverse un margen bastante amplio de altura para el caso de que las condiciones de cimentación sean deficientes con el fin de compensar un exceso de asiento del terraplén.
- Muros de encauzamiento de avenidas, muelles y terraplenes contruidos para proteger los asentamientos humanos.
- Compuertas de seguridad para crecidas y un sistema de canales para que el agua de la inundación se encause hacia los embalses provisionales.
- Un sistema de canales, pozos y alcantarillado, con su equipo correspondiente, que influya en el de la capa acuífera subterránea (napa freática).
- Capacidad de bombeo suficiente para evacuar el agua de drenaje en el interior del sistema de diques de defensa.
- Carreteras y otras vías de comunicación para el acceso al sistema de defensa, que permita el tránsito de personas y equipos durante las operaciones de defensa o para los trabajos de mantenimiento.
- Sistemas de comunicación por internet, teléfono y radio.
- Instalaciones hidrométricas y de otra índole para observar y comunicar la aproximación y desplazamiento de olas de inundaciones y fluctuaciones de la capa acuífera subterránea.

En los periodos en que no surjan situaciones de emergencia deberán mantenerse en buen estado la zona de evacuación de crecidas y el sistema de defensa contra inundaciones. Se concluyen las siguientes medidas:

- Reparación de los terraplenes, el mantenimiento de la capacidad de los cursos de agua mediante el dragado y limpieza, y la conservación de las esclusas compuertas y otros equipos.
- Mantenimiento de las estaciones hidrométricas y la prestación de un servicio diario de información sobre el nivel de las aguas que afecte a la situación hidrológica de la zona protegida.
- Mantenimiento de las instalaciones de almacenamiento de los materiales y equipos a utilizarse en una emergencia.
- Cuidado especial para evitar la abertura de brechas en los sistemas de defensa existentes durante la construcción de nuevas obras de infraestructura o asentamientos poblacionales.



Figura 8.32 Vista de puentes, pontones y alcantarillas de la ciudad de Arequipa, cuyos diseños condicionan desbordes de agua o flujos de lodos/detrítos, ya que estrechan los cauces de ríos y quebradas o porque favorecen la retención de restos de plantas (troncos de árboles), basura y material arrastrado de gran dimensión (bolos, bloques y gravas).



Figura 8.33 Vista donde se puede observar tuberías de desagüe que cruzan las quebradas por debajo de puentes, constituyéndose en retenes de material sólido que provocan desbordes e inundaciones. También se puede observar acueductos que cruzan cuyos pilares reducen la sección de drenaje de las quebradas.

8.3 MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Es cualquier medida que no suponga una construcción física y que utiliza el conocimiento, las prácticas o los acuerdos existentes para reducir el riesgo y sus impactos, especialmente a través de políticas y leyes, una mayor concientización pública, la capacitación y la educación (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009).

Teniendo en cuenta el número de población expuesta y la condición socioeconómica de la ciudad de Arequipa, es imprescindible la implementación de medidas no estructurales, que a largo plazo resultan ser menos costosas y ayudan a sensibilizar a las comunidades locales en temas de peligros geológicos y la gestión del riesgo de desastres; entre las principales medidas no estructurales se tienen:

8.3.1 Reglamentación en el uso de la tierra

Medida no estructural con la cual se busca ordenar el desarrollo urbano por medio de ordenanzas municipales; por ejemplo, que se obligue a respetar las fajas marginales de ríos y quebradas, la no ubicación o construcción en zonas de peligros por movimientos en masa, etc., así como el desalojo de áreas de alto peligro; en otras palabras, la reglamentación del uso de la tierra puede utilizarse para reducir los riesgos, al limitar el tipo y cantidad de desarrollo en áreas de alta susceptibilidad y alto peligro.

8.3.2 Realizar trabajos de comunicación con comunidades

Con esta actividad se busca socializar la información creada con el propósito de involucrar a las autoridades, planificadores y la comunidad en general, porque no siempre es suficiente producir y diseminar mapas y documentos científicos para lograr impactos positivos y tangibles en las comunidades que se busca servir.

Los objetivos que persigue los trabajos de comunicación con comunidades son los siguientes:

- Informar, difundir y vincular los estudios de peligros geológicos generados con la comunidad beneficiaria para que conozcan su desarrollo, participen con sus propuestas y lo internalicen.
- Capacitar a actores locales en conceptos básicos de prevención de desastres y su relación con la geología.

Los objetivos pueden ser logrados con las siguientes actividades:

- Realización de capacitación a nivel de educación primaria y secundaria en temas de peligros geológicos. Ejecución de concursos de dibujos sobre la temática de peligros.
- Organizar talleres para autoridades líderes, miembros de comités de defensa civil y comunidad en los que se trate la temática de peligros geológicos.

- Realizar la difusión de los resultados obtenidos en los estudios de peligros geológicos en los diferentes medios de comunicación.
- Elaboración de materiales de difusión (afiches, banderolas, etc.) de los resultados del estudio de peligros geológicos, donde se representen las zonas de peligro identificadas y las tareas de prevención que se deben de realizar.

8.3.3 Monitoreo y Sistemas de Alerta Temprana

Según "Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres" (2009), un Sistema de Alerta Temprana (SAT) es el conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta, que sea oportuna y significativa, con el fin de permitir que las personas, las comunidades y las organizaciones amenazadas por un peligro se preparen y actúen de forma apropiada y con suficiente tiempo de anticipación para reducir la posibilidad de que se produzcan pérdidas o daños.

Un sistema de alerta temprana comprende cuatro elementos fundamentales: conocimiento del riesgo; seguimiento de cerca (o monitoreo), análisis y pronóstico de las amenazas; comunicación o difusión de las alertas y los avisos; y capacidades locales para responder frente a la alerta recibida.

Para el caso de flujos de detritos (huaicos) e inundaciones, que son muy recurrentes en la ciudad de Arequipa, se podría implementar una estación de monitoreo de flujos, que constaría de varios equipos que permitan alertar a las autoridades y la población con antelación de su ocurrencia (figura 8.34).

8.3.4 Elaboración de planes para la reducción de riesgo de desastres

Es un documento que elabora una autoridad, un sector, una organización o una empresa para establecer metas y objetivos específicos para la reducción del riesgo de desastres, juntamente con las acciones afines para la consecución de los objetivos trazados (Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, 2009).

Estos planes deben contener mapas de identificación de peligros, rutas de evacuación y zonas de refugio temporal para los diferentes peligros identificados.

8.3.5 Realizar simulacros por la ocurrencia de peligros geológicos

Los responsables de defensa civil de los distritos involucrados deben ser facilitadores que brinden información adicional a las personas de la comunidad para llevar a cabo los simulacros que permita evaluar la efectividad del mapa de rutas de evacuación en base a la realidad del terreno.



Figura 8.34 Esquema de los equipos que deben conformar una estación de monitoreo de flujo de detritos y/o lodo.

Fuente: Soil & Water Conservación Bureau, COA. Taipei, Taiwan, 2010.

CONCLUSIONES

1. En la ciudad de Arequipa, con características particulares de geografía, un clima seco y semiárido como consecuencia de su heterogeneidad fisiográfica, complejidad geológico-estructural y características geomorfológicas variadas, se presentan peligros por movimientos en masa y procesos geohidrológicos. La ciudad está marcada por la ocurrencia de flujos de detritos, caída de rocas, derrumbes, flujos de lodo, inundaciones y erosión fluvial. Estos eventos se encuentran relacionados con la ocurrencia de precipitaciones pluviales estacionales de carácter extraordinario, así como a la presencia del fenómeno El Niño.
2. Según la caracterización litológica de la ciudad de Arequipa, se identificaron unidades de depósitos inconsolidados y de substrato. Como subunidades de depósitos inconsolidados se tienen los depósitos fluviales, aluviales, proluviales, coluviales, lacustrinos, glacial, volcánicos y volcanoclásticos; como subunidades de substrato se tienen rocas intrusivas (granitos, dioritas, gabros y tonalitas), volcánicas (flujos de lava y piroclastos) y metamórficas.
3. Según la caracterización hidrogeológica en la ciudad de Arequipa, el 51.5 % del área total corresponde a acuitardos, los cuales se ubican predominantemente en la parte oeste de la zona de estudio. El 48 % de las áreas corresponde a acuíferos (porosos no consolidados, fisurado volcánico y poroso volcánico), ubicados principalmente en la parte este de la zona de estudio (margen izquierda del río Chili), donde además se encuentran distribuidas la mayor cantidad de fuentes de agua subterránea.
4. Para el cálculo de la permeabilidad superficial de los materiales, se realizaron ensayos de infiltración por el método de Lefranc y usando un permeámetro (Tubo de PVC 2") a carga constante. Para este trabajo se ejecutaron 09 ensayos de infiltración en los depósitos volcanoclásticos, adquiriendo valores entre 0.16×10^{-1} m/día y 0.23×10^{-1} m/día, que corresponden a materiales permeables, cuya calificación hidrogeológica es de acuífero pobre.
5. Los manantiales La Bedoya y Yumina tienen flujos intermedios con escasa mezcla de flujos locales y regionales; su predominancia de cloruros, nos permiten interpretar que viene de la precipitación pluvial, ya que durante su percolación y descarga en los manantiales no disipa su predominancia clorurada. Los manantiales Ojo del Milagro 2 y Ojo del Milagro 3 provienen de flujos locales e intermedios, con cierto tiempo de residencia en el subsuelo, donde adquiere su predominancia química de sulfatada. Finalmente, la predominancia química de la fuente termal Agua de Jesús es clorurada sódica (Cl-Na), se encuentra asociada a sistemas profundos, de recorrido regional y de mayor tiempo de residencia en el subsuelo.
6. Se determinaron seis rangos de pendientes cuya clasificación obedeció a su grado de influencia en la ocurrencia de peligros geológicos; los rangos considerados son de terrenos llanos ($< 1^\circ$), terrenos con inclinación suave ($1^\circ-5^\circ$), pendientes moderadas ($5^\circ-15^\circ$), fuerte ($15^\circ-25^\circ$), muy fuerte ($25^\circ-45^\circ$) y escarpada ($> 45^\circ$).
7. En la ciudad de Arequipa, se determinaron dos grandes grupos de unidades geomorfológicas: geofomas de carácter tectónico-degradacional y erosional (se diferenciaron las subunidades de montañas, colinas y lomadas, volcánicas y planicies) y geofomas de carácter depositacional y agradacional (subunidades de origen gravitacional, fluvial, lacustre, eólico, otras formas poligénicas y antropogénicas).
8. Del análisis geológico y geomorfológico, se ha podido notar que en Arequipa es frecuente la ocurrencia de flujos de detritos, de lodo e inundaciones fluviales. Los registros señalan que pueden incluso tener recurrencia anual en este sector, además de ser muy destructivos y capaces de producir innumerables pérdidas humanas y de infraestructura.
9. Se puede notar que históricamente en Arequipa los terrenos inundables fueron ocupados por la expansión urbana, sin un adecuado control de las inundaciones. En caso de la ocurrencia de lluvias intensas o extremas, se pueden generar flujos de lodo, porque el volumen de depósitos sueltos en los flancos del volcán Misti y quebradas que drenan de dicho volcán, son muy voluminosos y dichos materiales podrían bajar preferentemente por las quebradas Polanco, San Lázaro, Miraflores, Mariano Melgar, El Chilcal, Huarangal, Tingo, Paucarpata y Zamácola.

10. El trabajo de inventario de peligros (233 ocurrencias) muestra una mayor ocurrencia de flujos (32.61 %), seguido de caída de rocas (24.46 %), erosión de laderas (11.58 %), derrumbes (11.15 %), erosión fluvial (13.3 %), inundación fluvial (4.72 %), y finalmente se tienen vuelcos, movimientos complejos y avalancha de detritos (1.29 %).
11. Solo para movimientos en masa (164 ocurrencias), los flujos de detritos ocupan el primer lugar (41.46 %), seguido de las caídas de rocas (34.76 %), derrumbes (15.85 %), flujo de lodo (4.88 %), deslizamientos (1.22 %), y finalmente se tienen vuelcos, avalancha de detritos y movimientos complejos (con un 0.61 % cada uno).
12. Para los denominados "otros peligros geológicos" y los "peligros geohidrológicos", se tiene en primer lugar los procesos de erosión fluvial (44.93 %); en segundo lugar, la erosión de laderas (39.13 %); y finalmente se tiene la inundación fluvial (15.94 %).
13. La evaluación de campo de elementos expuestos (infraestructura y centros poblados) determinó por sus características de potencialidad de peligro y vulnerabilidad un total de 23 zonas críticas.
13. En muchos sectores, el diseño del desfogue de los cauces de ríos y quebradas no ha considerado avenidas extremas o han sido subevaluadas, pues no se ha estimado el material que se podría trasladar, desde la parte alta hasta la desembocadura, atravesando en su recorrido por la ciudad de Arequipa.
15. En el mapa de susceptibilidad a los movimientos en masa, la muy alta susceptibilidad está localizada en los extremos nor-noreste y sur-suroeste; corresponde a un sustrato constituido por granodioritas fracturadas y alteradas, en algunos casos con una extensa cobertura de depósitos superficiales areno-limosos y en otras formando bolos de gran tamaño acumulados en las faldas y laderas de colinas; también se tienen depósitos volcanoclásticos recientes sin compactación, las pendientes son muy fuertes (25° - 45°). La alta susceptibilidad compromete a laderas con pendientes fuertes, depósitos coluviales y volcanoclásticos, ubicados en el extremo norte de la zona estudio (flancos suroeste de los volcanes Chachani y Misti) y la zona sur-sureste a la margen izquierda de los ríos Chili y Socabaya.
16. En el mapa de susceptibilidad a inundaciones y erosión fluvial se muestra que la alta susceptibilidad corresponde a llanuras de inundación y terrazas bajas, cauces de quebradas, ríos y cauces antrópicos, cuencas de lagunas pequeñas, que se inundan de forma recurrente con el concurso de precipitaciones pluviales extraordinarias a excepcionales; estas zonas se ubican en los valles de los ríos Chili, Andamayo, Socabaya, Mollevaya y Yarabamba, también en las quebradas San Lázaro, Venezuela, Los Incas, Huarangal, Peral, Azufral, entre otras.
17. El cambio en el uso del suelo ha contribuido a la ocurrencia de inundación y anegamiento en la ciudad de Arequipa a través de su historia.
18. Para los cuatro escenarios de simulación a inundaciones fluviales realizados con el software FLO-2D, en parte del cauce del río Chili (tiempo de retorno de 500, 100, 50 y 10 años), nos muestra que las alturas máximas de flujo son de 13.5, 12.7, 12.4 y 11.3 m, respectivamente. Las zonas inundadas en los distritos de Cayma y Alto Selva Alegre son principalmente zonas de cultivo, excepcionalmente se inundan algunas viviendas. Las áreas susceptibles posibles a inundarse están en los distritos de Yanahuara, Arequipa, Sachaca y Jacobo Hunter, son principalmente zonas urbanas.
19. La simulación de flujos de detritos para la quebrada San Lázaro realizada con el software FLO-2D muestra que la altura máxima de los flujos será de 17 metros y es consecuencia de las depresiones existentes en la quebrada, lo que provoca un represamiento. Las áreas afectadas se localizan principalmente cerca de la desembocadura de la quebrada, que pertenece al distrito de Arequipa; se determinó un total de 20 hectáreas afectadas que incluye zonas urbanas.
20. Los productos obtenidos como el mapa geomorfológico y de procesos activos, los mapas de susceptibilidad a movimientos en masa y susceptibilidad a inundaciones, así como las simulaciones de flujos e inundaciones servirán para realizar trabajos de reordenamiento territorial de la ciudad.

RECOMENDACIONES

1. Implementar un sistema de alerta temprano (SAT) para flujos, integrado y sostenible en el tiempo (ubicación de más estaciones pluviométricas, geófonos, sensores de humedad del suelo, cámara, entre otros).
2. Debido a la expansión urbanística de Arequipa se han reducido las torrenteras, estas deben ampliarse para retomar su cauce natural.
3. Reasentar las viviendas que se encuentran muy cerca al cauce de las torrenteras, como es el caso de quebrada Venezuela; y las diferentes torrenteras que discurren por los distritos de Yanahuara, Cayma, Alto Selva Alegre, Miraflores, Mariano Melgar y Paucarpata.
4. Se debe prohibir la construcción de viviendas en zonas de terreno rellenados (desmonte), expuestas a inundaciones, muy cerca de las márgenes del cauce de las torrenteras; estas áreas no aptas para fines urbanos deberán destinarse para uso agrícola u otros usos que no requieran de altos montos de inversión para su habilitación.
5. Los techos de las edificaciones deben considerar el drenaje de lluvias torrenciales excepcionales (como la del 08/12/13) para lo cual se edificarán techos inclinados o planos (con tuberías de drenaje), que conduzcan sus aguas hacia una vía o canaleta, pero que no caigan de los techos directamente a la vereda.
6. Se deben colocar muros de contención en tramos de quebradas identificados como zonas críticas, así como realizar la limpieza de los cauces de las quebradas y ríos, estableciéndose periodos para la ejecución de este, siendo recomendable efectuarlas en épocas de estiaje.
7. Desarrollar campañas de deforestación (plantas nativas) en las zonas más altas de los alrededores de la ciudad, creando correctores naturales que modifiquen el discurrir de las aguas.
8. Para una adecuada planificación urbana de la ciudad de Arequipa es necesario ultimar las investigaciones geológicas incluyendo modelos probabilísticos, sobre la generación de las inundaciones en los ríos Seco, Chili y Socabaya, con el objetivo de calcular los volúmenes probables de avenidas extraordinarias para diferentes escenarios.
9. Para tener una mayor precisión en los resultados de las simulaciones, el modelo digital del terreno debe tener una resolución mayor al ancho del cauce de ríos o quebradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. (1986) - Influencia del agua en la estabilidad de taludes. Roturas en roca. Casos reales. En: Alonso, E. *Riesgos Naturales en Ingeniería Civil*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, p. 99-136.
- Ángeles, G.; Perevochtchikova, M. & Carrillo, J. (2008) - Posibles controles hidrogeológicos de impacto ambiental por la extracción de agua subterránea en Xochimilco, México. *Journal of Latin American Geography*, 7(1): 39-56. <http://www.jstor.org/stable/25765198>
- Ángeles, S.; Rosales, L. & Ramos, J. (2004) - Características de flujos regionales, y su manifestación, tres casos en México. En: *Memorias del XXXIII-IAH y 6º-ALHSUD Congreso*. Zacatecas: Instituto de Geografía de México.
- Arequipa. Gobierno Regional. Proyecto Especial Majes - Sihuas (2010) - *Reporte: movimiento hídrico sistema Chili 2010, Estación Represa Aguada Blanca* (en línea). Arequipa: Autoridad Autónoma de Majes. (consulta: 16 agosto 2017). <https://autodema.gob.pe/reportesom/frmRepChili.aspx>
- Arequipa. Municipalidad Provincial (2002) - *Plan Director de Arequipa Metropolitana 2002 – 2015*. Arequipa: Municipalidad Provincial de Arequipa, Oficina de Planificación y Gestión Urbano Ambiental; AQPlan 21, 297 p.
- Ayala, F.J. & Andreu, F.J. (2006) - *Manual de ingeniería de taludes*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 456 p. Guías y Manuales, 3.
- Ayala, F.J. & Olcina, J. (2002) - *Riesgos naturales*. Barcelona: Ariel, 1512 p.
- Aybar, C.; Lavado, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe, O. (2017) - *Uso del producto grillado pisco de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 21 p. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017. (consulta 08 julio 2018). Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Banco Mundial (2011) - *Peligros naturales, desastres evitables: La economía de la prevención efectiva*. Madrid: Ediciones Gondo y Banco Mundial, 332 p.
- Benítez, A. (1963) - *Captación de aguas subterráneas, nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales*. Madrid: Dossat, 157 p.
- Cacya, L.; Meza, P.; Carlotta, V. & Mamani, L. (2013) - Aluvión del 8 de febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. En: Foro Internacional Peligros Geológicos, Arequipa, 14-16 octubre 2013, *Libro de resúmenes*. Arequipa: INGEMMET, pp. 195-200.
- Carrara, A.; Cardinali, M.; Guzzetti, F. & Reichenbach, P. (1995) - GIS technology in mapping landslide hazard. En: Carrara, A. & Guzzetti, F., eds. *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 135-175.
- Castillo, L; Fidel, L & Jackson, L. (2006) - Modelado de flujos de lodo usando FLO-2D en la quebrada Paihua: impacto en la ciudad de Matucana, Lima. En: Congreso Peruano de Geología, 13, Lima, 2006, *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 92-95. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/446>
- Cereceda, C. (2007) - *Estratigrafía, sedimentología y peligro por emplazamiento de lahares, sector Chapi Chico-Uchumayo, valle del río Chili-Arequipa*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 130 p.
- Chahua, J. (2016) - *Dinámica de flujos aluvionales en el centro poblado de Quincemil, subcuenca del río Arazá*. Tesis Ingeniero, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 85 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5945>

- Cornejo, J. (1990) - *Probabilidad de ocurrencia y peligrosidad de fuertes precipitaciones en la ciudad de Arequipa*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín, de Arequipa.
- Corominas, J. & García Yagué, A. (1997) – Terminología de los movimientos de laderas. En: Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, 4, Granada, 1997. *Memorias*, vol. 3, p. 1051-1072.
- Cruden, D.M. (1991) – A simple definition of a landslide. *Bulletin International Association for Engineering Geology*, 43: 27-29. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>
- Cruden, D.M. & Varnes, D.J. (1996) - Landslide types and processes. En: Turner, A.K. & Schuster, R.L., eds. *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, p. 36-75.
- Cruz, R. (2007) - *Gestión del riesgo por inundaciones en asentamientos populares, distrito de Mariano Melgar, Arequipa*. Tesis Maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 231 p.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1983) - *Hidrología subterránea*. 2a. ed. correg. Barcelona: Omega, 2 vol.
- Custodio, E. & Llamas, M. (1996) - *Hidrología subterránea*. 2a. ed. Barcelona: Omega, 1157 p., 2 vol.
- Dávila, J. (1999) - *Diccionario geológico*. 3a. ed. Lima: INGEMMET, 1006 p.
- De Freitas, M.H. & Watters, R.J. (1973) - Some field examples of toppling failure. *Geotechnique*, 23(4): 495-514. <https://doi.org/10.1680/geot.1973.23.4.495>
- Delaite, G.; Thouret, J.-C.; Sheridan, M.F.; Labazuy, P.; Stinton, A., et al. (2005) - Assessment of volcanic hazard of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars. *Zeitschrift für Geomorphology N.F., supplement*, 140: 209-231.
- Duque, G. & Escobar, C. (2016) – Propiedades hidráulicas de los suelos (en línea). En: Duque, G. & Escobar, C. *Geomecánica*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, p. 111-134.
- Ettinger, S.; Manrique, N. & Thouret, J.C. (2014) - Using field data and HSR imagery to downscale vulnerability assessment of buildings and local infrastructure facing hazards from floods and hyperconcentrated flows. En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 16, p. 13978. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-13978.pdf>
- Evans, S.G. & Hungr, O. (1993) – The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4): 620-636. <https://doi.org/10.1139/t93-054>
- Ferrer, M. (1987) - Deslizamientos, desprendimientos, flujos y avalanchas. En: Instituto Geológico y Minero de España. *Riesgos geológicos*. Madrid: IGME, p. 175-192.
- Fidel, L.; Zavala, B; Núñez, S. & Valenzuela, G. (2006) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 4. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 29, 383 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/263>
- FLO-2D Software (2011) - *FLO-2D Model validation: for Version 2009 and Up*. Nutrioso, Arizona: FLO-2D Software, 97 p.
- FLO-2D Software (2017) - *FLO-2D Reference manual*. Nutrioso, Arizona: FLO-2D Software, 100 p. Build, 16.
- Flores, P. (2001) - *Radiación Solar en Arequipa*. En: IX Simposio Peruano de Energía Solar. Asociación Peruana de Energía Solar y del Ambiente, p. 212- 215.
- Fuse, J. & Benites, A. (2001) - *Inundaciones en la localidad de Arequipa ocasionadas por el ingreso de las torrenceras*. Lima: Instituto nacional de Defensa Civil 53 p. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_Arequipa/arequipa/arequipa_1ltorrenceras.pdf
- Gamió, J. (2014) - *Modelo de flujo de escombros y lodo aplicando FLO-2D, caso sub cuenca del río Shullcas*. Tesis Ingeniero Civil, Universidad Nacional Centro del Perú, Huancayo, 176 p. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/435>
- García, W. (1968) - Geología de los cuadrángulos de Mollendo y La Joya (Hojas 34-r, 34-s). *Servicio de Geología y Minería, Boletín* 19, 104 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/137>
- García, W. (1978) - Geología de los cuadrángulos de Puquina, Omate, Huaitiri, Mazo Cruz y Pizacoma. Hojas: 34-t, 34-u, 34-v, 34-x, 34-y. *Instituto de Geología y Minería, Boletín*, 29, 64 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/148>
- Guevara, C. (1969) - Geología del cuadrángulo de Characato (hoja 33-t). *Servicio de Geología y Minería, Boletín*, 23, 53 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/141>
- Hoek, E. & Bray, J. (1981) - *Rocks slope engineering*. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 358 p.

- Hoek, E. & Bray, J. (1997) - *Principios mecánicos de los fallamientos de taludes en macizos rocosos*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 18 p.
- Hungr, O. (2005) – Classification and terminology. En: Jakob, M. & Hungr, O., eds. *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin: Springer-Praxis, p. 9-23.
- Hungr, O.; Evans, S.G.; Bovis, M.J. & Hutchinson, J.N. (2001) - A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7(3): 221-238. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.7.3.221>
- Hutchinson, J.N. (1988) – General report: Morphological and geotechnical parameters of landslide in relation to geology and hydrogeology. En: Bonnard, C., ed. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, 10-15 July 1988. Lausanne, Switzerland*. Rotterdam: Balkema, vol. 1, p. 3-35.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2001) - *Geomorfología y susceptibilidad a la inundación del valle fluvial del Magdalena: Sector Barrancabermeja – Bocas de Ceniza* (en línea). Bogotá: IDEAM, Subdirección de Geomorfología y Suelos, 68 p. (consulta: 21 marzo 2015). <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018182/geomagalena2.pdf>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2000) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 1. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 23, 330 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/312>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2002) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N°. 2. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 27, 368 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/261>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2003) - Estudio de riesgos geológicos del Perú, Franja N° 3. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 28, 373 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/262>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Dirección de Geotecnia (1997) - Álbum de mapas de zonificación de riesgos fisiográficos y climatológicos del Perú, memoria descriptiva. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 17, 142 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/239>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (1995) - *Estadística de las emergencias producidas en el Perú durante 1995 (en línea)*. Lima: Indeci, 125 p. (consulta: 5 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/edicion-multimedia-de-compendios-estadisticos/1995-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (1996) - *Estadística de las emergencias producidas en el Perú durante 1996 (en línea)*. Lima: INDECI, 134 p. (consulta: 5 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/edicion-multimedia-de-compendios-estadisticos/1996-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (1997) - *Estadística de emergencia producidas en el Perú durante 1997 (en línea)*. Lima: INDECI, 212 p. (consulta: 5 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/edicion-multimedia-de-compendios-estadisticos/1997-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (1998) – *Estadística de emergencia producidas en el Perú: 1998 (en línea)*. Lima: Indeci, 225 p. (consulta: 5 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/edicion-multimedia-de-compendios-estadisticos/1998-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (1999) – *Compendio de emergencias 1999 del SINADECI* (en línea). Lima: Indeci, 181 p. (consulta: 5 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/1999-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2002a) – *Compendio estadístico 2000* (en línea). Lima: Indeci, 228 p. (consulta: 6 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2000-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2002b) - *Compendio estadístico de emergencias 2001* (en línea). Lima: Indeci. (consulta: 6 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2001-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2003) - *Compendio estadístico del SINADECI 2002* (en línea). Lima: Indeci, 359 p. (consulta: 6 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indeci.gob.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2002-2/>>

- Instituto Nacional de Defensa Civil (2004) - *Compendio estadístico del SINADECI 2003* (en línea). Lima: Indeci. (consulta: 6 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2003-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2005) - *Compendio estadístico del SINADECI 2004* (en línea). Lima: Indeci, 100 p. (consulta: 7 mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2004-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2006) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2005* (en línea). Lima: Indeci, 73 p. (consulta: 7 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2005-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2007) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2006* (en línea). Lima: Indeci, 101 p. (consulta: 7 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2006-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2009a) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2007* (en línea). Lima: Indeci, 627 p. (consulta: 7 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2007-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2009b) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2008* (en línea). Lima: Indeci, 614 p. (consulta: 8 de mayo 2016). Disponible en: <https://www.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/01/comp_2008.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2010) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2009* (en línea). Lima: Indeci, 616 p. (consulta: 8 de mayo 2016). Disponible en: <https://www.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/01/comp_2009.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2011) - *Compendio estadístico de prevención y atención de desastres 2010* (en línea). Lima: Indeci, 624 p. (consulta: 8 de mayo 2016). Disponible en: <https://www.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/01/comp_2010.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2012) - *Compendio estadístico del INDECI en la atención de emergencias y desastres 2011* (en línea). Lima: Indeci, 564 p. (consulta: 8 de mayo 2016). Disponible en: <https://www.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/01/comp_2011.pdf>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2014) - *Compendio estadístico del INDECI 2013 en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres* (en línea). Lima: Indeci, 204 p. (consulta: 9 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2013-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2015) - *Compendio estadístico del INDECI 2015 en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres* (en línea). Lima: Indeci, 255 p. (consulta: 9 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2014-2015/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2016) - *Compendio estadístico del INDECI 2016 en la preparación, respuesta y rehabilitación ante emergencias y desastres* (en línea). Lima: Indeci, 261 p. (consulta: 9 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2016-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2017) - *Compendio estadístico del INDECI 2017: Gestión reactiva* (en línea). Lima: Indeci, 290 p. (consulta: 5 de mayo 2016). Disponible en: <<https://www.indec.gov.pe/direccion-politicas-y-planes/compendios-estadisticos/compendios/2017-2/>>
- Instituto Nacional de Defensa Civil (2018) - *Compendio estadístico del INDECI 2018, preparación - respuesta - rehabilitación* (en línea). Lima: Indeci, 294 p. (consulta: 9 de mayo 2016). Disponible en: <https://www.indec.gov.pe/wp-content/uploads/2019/02/COMPENDIO-GRAN-FINAL-2018_28dic_PDF.pdf>
- Instituto Nacional de Vías (1998) - *Manual de estabilidad de taludes - Geotecnia Vial*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 340 p.
- Jakob, M. (2005) - Debris-flow hazard analysis. En: Jakob, M. & Hungr, O. *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin: Springer, Springer Praxis Books vol. 739, p. 411-443. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_17
- Jiménez, P.; Amézaga, J.; Rotting, T. & Guzmán, E. (2010) - *El río Chili: Cuenca árida con presencia minera*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 161 p.

- Julien, P.Y. & Lan, Y. (1991) - Rheology of hyperconcentrations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3): 346-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:3\(346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:3(346))
- Lacho, E., & Rodríguez, J. C. (2016) - Modelamiento de flujos de detritos en la quebrada San Antonio de Pedregal usando FLO – 2D, Perú. En: Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 27, Lima, 2016. *Libro de resúmenes extendidos*. Lima: APIHA.
- Major, J.J., & Pierson, T.C. (1990) - Rheological analysis of fine-grained natural debris-flow material. En: *Proceedings of the International Symposium on Hydraulics/Hydrology of Arid Lands and 1990 National Conference on Hydraulic Engineering, 30 July - 2 August 1990, San Diego, CA, USA*. Boston, MA: Publ by ASCE, p. 225-231.
- Mariño, J.; Rivera, M.; Thouret, J.C. & Macedo, L. (2016) - Geología y mapa de peligros del volcán Misti. *INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 60, 170 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/310>
- Martínez, E. (2012) - A geographical approach to post-flood analysis: The extreme flood event of 12 October 2007 in Calpe (Spain). *Applied Geography*, 32(2): 490-500. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.06.003>
- Martín-Serrano, A.; Salazar, A.; Nozal, F. & Suárez, A. (2005) - *Mapa geomorfológico de España a escala 1:50.000: Guía para su elaboración*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 128 p.
- Meinzer, O.E (1923) - Outline of ground-water hydrology, with definitions. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 494, 71 p. <https://doi.org/10.3133/wsp494>
- Meinzer, O.E (1923) - The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles. *U.S. Geological Survey Water Supply Paper*, 489, 321 p. <https://doi.org/10.3133/wsp489>
- Mishra, S.K. & Singh, V.P. (2003) - SCS-CN Method. En: Mishra, S.K. & Singh, V.P. *Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology*. Springer, Dordrecht, Water Science and Technology Library, vol.42, p. 84-146. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1_2
- Naciones Unidas. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (2009) - *UNISDR Terminología sobre reducción del riesgo de desastres* (en línea). Ginebra: Naciones Unidas, 38 p. http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- O'Brien, J. (2018) - *Predicting Mudflows after a Watershed Burn with FLO-2D*. [Webinar]. FLO-2D Software, Inc.
- O'Brien, J.S. (2003) - *Flo-2D User's Manual, Version 2003.06*. Nutrioso, Arizona: Flo-2D Software, 111 p. <https://pdfcoffee.com/manual-de-usuario-flo-2d-5-pdf-free.html>
- O'Brien, J.S. & Julien, P.Y. (1985) - Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. En: Bowles, D.S., ed. *Proceedings ASCE Speciality Conference on the Delineation of Landslides, Flashflood, and Debris Flows Hazards in Utah*, p. 260-279
- O'Brien, J.S. & Julien, P.Y. (1988) - Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8): 877-887. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:8\(877\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877))
- Oliver-Smith, A. (1994) - Perú, 31 de mayo, 1970: quinientos años de desastre. *Revista Desastres y Sociedad, Especial: Tragedia, Cambio y Desarrollo*, 2(2): 1-15.
- Oré, J. (2016) - Application of flexible ring net barriers technology for debris flow control in San Martín torrent–Ayacucho Peru (en línea). En: Mynett, A., ed. *36th IAHR World Congress 2015: deltas of the future and what happens*. New York: Curran Associates, v. 8, p. 6322-6330. <https://cutt.ly/RnpjMQC>
- Pedraza, J. de; Carrasco, R.M.; Díez, A.; Martín, J.F.; Martín, A. & Sanz, M.A. (1996) - *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Rueda, 414 p.
- Peña, F. (2018) - *Perímetros de protección de manantiales en la zona oriental de Arequipa*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 124 p. Informe Técnico A6799. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1424>
- Peña, F.; Carpio, J. & Vargas, V.; (2015) - Hidrogeología de la cuenca de los ríos Jequetepeque (13774) y Chamán (137752), Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque. *INGEMMET. Boletín. Serie H: Hidrogeología*, 4, 304 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/371>
- Peña, F.; Renou, F.; Condori, E.; Sánchez, M. & Pari, W. (2019) - Hidrogeología de la cuenca del río Huaura (13756) - región Lima. *INGEMMET, Boletín, Serie H: Hidrogeología*, 5, 466 p., 2 mapas. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2164>
- Perú. Ministerio de Energía y Minas (2001) - *Atlas de minería y energía en el Perú 2001*. Lima: MINEM, 97 p.

- Perú. Ministerio de Energía y Minas (2016) – Atlas eólico del Perú. Lima, MINEM, 262 p. http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Electricidad/publicaciones/Atlas_Eolico_Final.pdf
- Perú. Ministerio de Energía y Minas. Dirección General de Electricidad (2018) - *Anuario estadístico de electricidad 2017* (en línea). Lima: MINEM. (consulta: 03 de mayo 2018). http://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=6&idEstadistica=13034
- Perú. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018) - *Ferrocarril del Sur y Sur Oriente* (en línea). (consultado: 07 febrero 2018). http://portal.mtc.gob.pe/transportes/concesiones/ferrovias/ferrocarril_sur_oriente.html
- Perú. Ministerio del Ambiente (2015) - *Mapa nacional de cobertura vegetal: Memoria descriptiva* (en línea). Lima: MINAM, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural, 105 p. (consulta: 22 mayo 2017). Disponible en: <<https://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/MAPA-NACIONAL-DE-COBERTURA-VEGETAL-FINAL.compressed.pdf>>
- Perú. Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres (2014) - *Compendio de normas*. Lima: SGRD, 154 p.
- Pierson, T.C. (2005) - Hyperconcentrated flow – transitional process between water flow and debris flow. En: Jakob, M. & Hungr, O., eds. *Debris-flow hazards and related phenomena*. Berlin: Springer-Praxis, p. 159-202.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (2007) - *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 432 p., Publicación Geológica Multinacional, 4. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2830>
- Rojas, R. (1978) - *Estudio geodinámico y geotécnico de la torrentera de Santo Domingo (distrito de Mariano Melgar provincia de Arequipa, departamento de Arequipa)*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 284 p.
- Sánchez, R.; Mayorga, R.; Urrego, L & Vargas, G. (2002) - Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. En: Simposio Latinoamericano de Control de Erosión, 1, Bucaramanga, 2002. *Memorias*. Bucaramanga: CDMB, 8 p. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18821>
- Santacana, N. (2001) - *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 399 p. <http://hdl.handle.net/10803/6213>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (2003) - *Atlas de energía solar del Perú*. Lima: SENAMHI, 31 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/343>
- Sulca, P. (2012) - *Caracterización hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica de los acuíferos de la sub cuenca del río Chili*. Tesis Ing. Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 176 p.
- Sulca, P.; Peña, F. & Delgado, F. (2010) - Determinación de flujos regionales y locales de los acuíferos orientales de la ciudad de Arequipa en base a datos hidroquímicos e isotópicos. En: Congreso Peruano de Geología, 15, Cusco 2010. *Resúmenes extendidos*. Lima: Sociedad Geológica del Perú, p. 128-131.
- Thouret, J.C.; Enjolras, G.; Martelli, K.; Santoni, O.; Luque, J. A.; Nagata, M.; Arguedas, A. & Macedo, L. (2013) - Combining criteria for delineating lahar-and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(2), 339-360. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-339-2013>
- Tinajeros, M. & Morante, F. (2011) - *Sistemas de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa* [artículo de conferencia]. XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Lima, 14-19 noviembre, 2011. 12 p. <https://cutt.ly/enxf6vJ>
- Unda, N. (2002) - *Geología y geotecnia para el encauzamiento y defensa ribereña del río Chili, 1.457 km – Tiabaya*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 158 p.
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation, Conservation Engineering Division (1986) - *Urban hydrology for small watersheds, TR-55*. Washington, D.C.: USDA: SCS, 164 p. Technical Release 55. <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/other/TR55documentation.pdf>
- Valderrama, L.; Montenegro, E. & Galindo, J. (1964) - *Reconocimiento forestal del departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 86 p.

- Valdivia, A. (1978) - *Estudio geodinámico y geotécnico de la primera torrentera, Arequipa*. Tesis Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Vargas, L. (1970) - Geología del cuadrángulo de Arequipa. *Servicio de Geología y Minería, Boletín*, 24, 64 p. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/142>
- Varnes, D.J. (1978) - Slope movement types and processes. En: Schuster, R.L. & Krizek, R.J., eds. *Landslides: analysis and control*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 176, p. 11-33.
- Villacorta, S.; Fidel, L. & Zavala, B. (2012) - Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 69(3): 393-399.
- Villota, H. (2005) - *Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras*. 2a. ed. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 210 p.
- Weatherbase (s.f) - *Arequipa, Perú, weather records and averages* (en línea). (consulta: 10 junio 2017). Disponible en: <<http://www.weatherbase.com/weather/weather.php?s=25748&cityname=Arequipa-Peru>>

RELACIÓN DE MAPAS E ILUSTRACIONES

Mapas

Mapa 1	Litológico
Mapa 2	Pendientes
Mapa 3	Geomorfología
Mapa 4	Susceptibilidad a los movimientos en masa
Mapa 5	Susceptibilidad a inundaciones y erosión fluvial

Figuras

Figura 2.1	Mapa de ubicación de la zona de estudio.
Figura 2.2	Ubicación y trayectoria de las cinco torrenteras que atraviesan la ciudad de Arequipa, margen derecha del Río Chili.
Figura 2.3	Población de los distritos arequipeños comprendidos en la zona de estudio.
Figura 2.4	Distribución de la población por sexo y edad, distritos comprendidos dentro de la zona de estudio, según el censo 2017.
Figura 2.5	Población según sexo de los distritos considerados en el estudio.
Figura 2.6	Distribución de la población según el sexo por áreas de residencia de la zona de estudio.
Figura 2.7	Mapa de cobertura vegetal de la ciudad de Arequipa y alrededores.
Figura 3.1	Leyenda del mapa geológico de la zona de estudio.
Figura 3.2	Mapa geológico de la zona de estudio (Mariño, <i>et al.</i> , 2016).
Figura 4.1	Mapa de inventario de fuentes de agua.
Figura 4.2	Esquema de ensayo de infiltración (Peña <i>et al.</i> , 2019).
Figura 4.3	Valores de permeabilidad según ensayos de infiltración realizados en la zona de estudio. (Fuente: Peña, 2018)
Figura 4.4	Mapa hidrogeológico.
Figura 4.5	Mapa hidroquímico.
Figura 4.6	Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos porosos.
Figura 4.7	Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos relacionados a fuentes termales.
Figura 4.8	Diagramas de Piper y Scatter para acuíferos relacionados a drenajes captados.
Figura 5.1	Imagen Google Earth donde se puede observar la superficie plana ignimbrítica degradada en la zona de Cerro Colorado.
Figura 5.2	Imagen satelital en la cual se puede observar en una coloración verdosa las cuencas secas de lagunas (Cs-Ig) que se formaron con el avance de los flujos de lavas que bajaron del volcán Chachani.
Figura 6.1	Procesos activos y depósitos superficiales.

- Figura 6.2** Tipo de movimientos seguidos por un bloque caído desde un talud o ladera.
- Figura 6.3** (a) esquema de la caída de rocas; (b) Corominas y García Yagué (1997) denominan a este movimiento colapso (derrumbe).
- Figura 6.4** Esquema del vuelco en bloques (De Freitas y Waters, 1973).
- Figura 6.5** (a) y (b) esquema de un deslizamiento traslacional, llamado resbalamiento y corrimiento según Corominas y García Yagué (1997); (c) esquema de un deslizamiento traslacional en roca en Cerchiaria di Calabria, sur de Italia, según Antronico *et al.* (1993), en Dikau *et al.* (1996) (Tomado de Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007).
- Figura 6.6** Esquema de un deslizamiento traslacional.
- Figura 6.7** Partes de un deslizamiento rotacional.
- Figura 6.8** Esquema de una expansión lateral.
- Figura 6.9** Esquema donde se muestra el depósito que forma un flujo de detritos.
- Figura 6.10** Esquema de una avalancha de rocas.
- Figura 6.11** Esquema de una ladera afectada por reptación de suelos.
- Figura 6.12** Esquema de erosión de laderas en cárcavas.
- Figura 6.13** Mapa de inventario de peligros de la ciudad de Arequipa y alrededores.
- Figura 6.14** Ocurrencia de peligros geológicos por movimientos en masa, geohidrológicos y otros peligros geológicos.
- Figura 6.15** Ocurrencia de movimientos en masa en la ciudad de Arequipa.
- Figura 6.16** Ocurrencia de peligros geohidrológicos y otros peligros geológicos en la ciudad de Arequipa.
- Figura 6.17** Secuencia de imágenes donde se observa cómo se ha impactado y alterado el cauce del río Chili y de la quebrada Los Incas tributaria por su margen izquierda, esta última se ha cubierto o techado el tramo final de la quebrada.
- Figura 6.18** Sección transversal de quebrada Pozo Negro en el distrito Paucarpata (punto de control n° 630), con poca profundidad del lecho de la quebrada; donde la construcción de un puente recto redujo la altura de la quebrada (por la colocación de vigas para sostener la plataforma del puente), que ante la ocurrencia de lluvias que acarreen carga sólida, este puente serviría de dique y favorecería la obstrucción del canal de la quebrada y generaría desbordes que pueden afectar las viviendas que se encuentran en sus márgenes. El tirante o altura de la sección de la quebrada en este punto es de aproximadamente 0.60 m con el puente construido. La solución adoptada por los constructores del puente, fue alterar el perfil de equilibrio de la quebrada y realizar una excavación en el lecho del cauce por debajo del puente, conformado una concavidad que eleva el tirante de la sección hasta los 3 m, la que en tiempo de lluvias se colmata de agua y sedimentos, y no permite que discurra el caudal de agua.
- Figura 6.19** Sección transversal de torrentera en la cual se colocó un muro de encauzamiento en la margen derecha, donde se ubica la calle torrenteras y las viviendas (punto de control n° 624). La sección muestra que el nivel del lecho se encuentra a tan solo 0,50 m del nivel de la calle.
- Figura 6.20** Sección transversal medida en la calle Capitán Novoa (punto de control n° 603), donde se puede observar el muro de encauzamiento de concreto y el relleno de tierra colocado en la cara posterior del muro; también se puede observar claramente el nivel de la calle en el extremo izquierdo de la sección, que se encuentra por debajo del nivel del lecho actual de la quebrada.
- Figura 6.21** Ubicación de secciones transversales al curso de la quebrada San Lázaro.
- Figura 6.22** Mapa de ubicación de los perfiles transversales al río Chili, medidos en la zona de valle con terrazas altas y en Arancota.
- Figura 6.23** Perfil transversal al río Chili, en el cual es posible observar los niveles de terrazas en ambas márgenes.
- Figura 6.24** Perfil B-B', medido en el sector de Arancota, donde es posible observar las terrazas fluviales de menor altura en ambas márgenes del río Chili.

- Figura 6.25** Ubicación de perfiles medidos en el cauce del río Chili, en donde es posible observara el estrechamiento del cauce de casi 300 m a tan solo 38 m en el sector del pueblo tradicional El Huayco.
- Figura 6.26** Zonas críticas de la ciudad de Arequipa.
- Figura 6.27** Cabecera de la torrentera Venezuela, presenta derrumbes, caída de rocas, erosión de laderas que época de lluvias excepcionales como las del 08/02/2013 discurren huaicos por las laderas con material suelto, aportando material al cauce de la torrentera, además del mal diseño de obras, como se aprecia en la foto del lado izquierdo en el sector Mariano Bustamante, Villa Alto Cenepa; derrumbes y huaicos en el A.H Villa El Triunfo.
- Figura 6.28** a) Caída de rocas en el puente Arnao Tahuantinsuyo; b) Fuerte erosión y colapso de muros de viviendas dentro del cauce de la torrentera, puente Arnao.
- Figura 6.29** Flujo de detritos en la torrentera y derrumbes en ambas márgenes de la torrentera, cabecera de la torrentera Venezuela, sector San Juan XXIII, confluencia de ramal I y II.
- Figura 6.30** a) Colapso de muros de contención en la margen izquierda de torrentera, con pérdida de plataforma de la calle Virgen del Pilar, descubriendo un muro antiguo a más de 1 m detrás del actual con 17 m de ancho; b) Colapso de muros de los puestos del mercado del Altiplano; c) El cauce de la torrentera se ha estrechado a 4,54 m de ancho por construcción de edificaciones, por efecto del flujo socavó los cimientos del muro de contención en la margen izquierda generando el colapso de las columnas de la fábrica textil y rebose en ambas márgenes, en el pasaje Victoria; el puente en forma de arco a 11 m aguas abajo tiene un ancho de 3.78 m, el cual estranguló aún más la torrentera; d) Intersección de la Av. Venezuela con el pasaje Jacinto Ibañez, frente a la urbanización Juan El Bueno, se encuentran ubicadas seis viviendas y un total de 20 personas que habitan dicho espacio, en la margen derecha de la torrentera, pese a que se realizó la limpieza del cauce es evidente que las viviendas han avanzado hacia el cauce de la torrentera. Al incrementar el caudal de la torrentera el 08 de febrero se represó debido a un obstáculo en el puente Vidaurrazaga (letrero de centro comercial), al desfogar erosionó 93 m en su margen derecha; e) Cauce de torrenteras que se encuentra invadida por edificaciones construidas por encima de la torrentera.
- Figura 6.31** Erosión de toda la vía izquierda de la Av. Venezuela hasta la berma central; por su margen derecha la torrentera Venezuela afectó aproximadamente 135 m de longitud por un ancho de 11 m.
- Figura 6.32** Vistas del estrangulamiento del cauce de la torrentera Venezuela, afectado por inundaciones de lodo; el depósito de flujo de lodo alcanzó hasta 1 m de altura.
- Figura 6.33** En la izquierda, vista aérea del sector del Terminal Pesquero, se observa la reducción del cauce en forma escalonada de 6 a 3 m de ancho. En la derecha, ampliación de la vista, se puede observar la erosión en la margen izquierda de la torrentera Venezuela.
- Figura 6.34** a y b) Las cabeceras de las torrenteras se encuentran afectadas por deslizamientos y flujos. Además, los cauces se encuentran colmatados de material, sector La Rinconada, distrito Mariano Melgar; c y d) Presenta erosión de la vía asfaltada en la Av. Venezuela, debido al socavamiento de los cimientos de muros de sillar del mercado que generaron el colapso de estos, en el mercado Mariscal Castilla; e) Av. Los Incas y Agricultura (altura de la Gerencia Regional de Salud). Estrechamiento del cauce por obras del bypass de 13 a 4 m de ancho con muros de contención de 4.5 m de alto.
- Figura 6.35** a) erosión en cárcavas y derrumbes en ambas márgenes de la quebrada San Lázaro (parte alta), aportan material suelto al cauce de la quebrada; b) presencia de canteras en el cauce de la quebrada San Lázaro, acumulan material suelto; c y d) Viviendas se encuentran al borde del acantilado formado en la quebrada San Lázaro, algunas ya han colapsado; e) desmonte y basura acumulada en la parte alta de la quebrada San Lázaro; f) plataforma deportiva en terraza baja de la quebrada San Lázaro.
- Figura 6.36** Laderas y taludes propensos a caída de rocas y derrumbes en el cañón del río Chili (ambas márgenes) que obstaculizarían el tránsito y afectan las centrales hidroeléctricas en Charcani (Fotografía: Zavala, 2012).
- Figura 7.1** Diagrama de ingreso y salida de datos con el programa FLO-2D. Adaptado de Chahua, J. (2016).

- Figura 7.2 Imagen donde se puede observar el tramo cauce del río Chili donde se realizará la simulación.
- Figura 7.3 Modelo digital del terreno generado con imágenes satelitales de la ciudad de Arequipa.
- Figura 7.4 Cuencas y subcuencas del río Chili. (Fuente: Elaboración propia).
- Figura 7.5 Metodología para el cálculo del hidrograma. Adaptado de Chahua, J. (2016).
- Figura 7.6 Hidrogramas de máximas avenidas para distintos periodos de retorno.
- Figura 7.7 Dominio del modelo en el programa FLO2D.
- Figura 7.8 Valores del número de Manning en el programa FLO2D.
- Figura 7.9 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 500 años.
- Figura 7.10 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 100 años.
- Figura 7.11 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 50 años.
- Figura 7.12 Alturas máximas del flujo de agua para un periodo de retorno de 10 años.
- Figura 7.13 Vista ampliada del MDT utilizado en la simulación de las inundaciones de inundaciones en el río Chili.
- Figura 7.14 Tramo del río Chili en el que se encuentran los distritos de Cayma y Alto Selva Alegre.
- Figura 7.15 Tramo del río Chili en las que se ubican los distritos de Arequipa, Yanahuara, Sachaca y Jacobo Hunter.
- Figura 7.16 Tramo de estudio de la quebrada San Lázaro, longitud aproximada de 8.5.
- Figura 7.17 Delimitación de la cuenca de la quebrada San Lázaro en Arequipa.
- Figura 7.18 Hidrogramas de máximas avenidas en la cuenca de la quebrada San Lázaro para un TR de 25 años.
- Figura 7.19 Delimitación de las áreas de materiales disponibles a la formación de flujos aluvionales.
- Figura 7.20 Dominio del modelo de la quebrada San Lázaro en el programa FLO2D.
- Figura 7.21 Valores del número de Manning en el programa FLO2D.
- Figura 7.22 Hidrograma y solidograma del evento de flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.
- Figura 7.23 Alturas máximas del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro para un periodo de retorno de 25 años.
- Figura 7.24 Vista ampliada del MDT utilizado en la simulación del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.
- Figura 7.25 Tramo de la quebrada San Lázaro en donde se presentan las alturas máximas del flujo.
- Figura 7.26 Alturas máximas del flujo cerca a la desembocadura de la quebrada San Lázaro en el río Chili.
- Figura 7.27 Vista general de las alturas máximas del flujo aluvional en la quebrada San Lázaro.
- Figura 8.1 Efecto de una escollera sobre la resistencia del terreno (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.2 Colocación de escollera (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000)
- Figura 8.3 Esquema de un talud con bermas intermedias (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.4 Detalle de una canaleta de drenaje superficial (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.5 Disposición de sistema de drenaje en taludes no homogéneos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.6 Esquema de drenaje de un talud por medio de drenes californianos (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.7 Posición óptima de una galería de drenaje (Hoek & Bray, 1997).
- Figura 8.8 Drenaje de superficie de deslizamiento desde una galería de drenaje.
- Figura 8.9 Disposición de zanjas de drenaje en un talud (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.10 Zanjas de talud (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.11 Drenaje tipo espina de pescado (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.12 Detalles de un anclaje y ejemplos de aplicación (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).

- Figura 8.13** Contención de un deslizamiento mediante un muro (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.14** Relleno estabilizador sostenido por el muro (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.15** a) Muro de sostenimiento; b) Muro de contención; c) Muro de revestimiento. (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.16** a) Muros de gravedad de piedra seca.
- Figura 8.16** b) Muros de gravedad de piedra argamasada (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.17** Muros de gravedad de concreto ciclópeo (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.18** Muros de espesor máximo (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.19** Muros en L (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.20** Muros de concreto armado tipo flexión (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.21** Muro de gavión.
- Figura 8.22** Ejemplo de muro con pilotes (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.23** Ejemplo de muro de pantalla (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, 2000).
- Figura 8.24** Obras hidráulicas transversales para el control de la erosión en cárcavas. (Instituto Nacional de Vías-Ministerio de Transporte Republica de Colombia, 1998).
- Figura 8.25** Trincho de matorral tipo doble hilera de postes (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964).
- Figura 8.26** Trincho de matorral tipo una hilera de postes (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964).
- Figura 8.27** Trincho de piedra para cabecera de cárcava en zona de mina (adaptado de Valderrama *et al.*, 1964).
- Figura 8.28** Vista en planta y en perfil de los procesos de forestación en cabeceras y márgenes de las áreas inestables.
- Figura 8.29** Protección del lecho de la cárcava o quebrada.
- Figura 8.30** Protección de márgenes con enrocados, espigones y siembra de bosques ribereños.
- Figura 8.31** Presas transversales a cursos de quebradas.
- Figura 8.32** Vista de puentes, pontones y alcantarillas de la ciudad de Arequipa, cuyos diseños condicionan desbordes de agua o flujos de lodos/detritos, ya que estrechan los cauces de ríos y quebradas o porque favorecen la retención de restos de plantas (troncos de árboles), basuras y material arrastrado de gran dimensión (bolos, bloques y gravas).
- Figura 8.33** Vista donde se puede observar tuberías de desagüe que cruzan las quebradas por debajo de puentes, constituyéndose en retenes de material sólido que provocan desbordes e inundaciones. También se puede observar acueductos que cruzan cuyos pilares reducen la sección de drenaje de las quebradas.
- Figura 8.34** Esquema de los equipos que deben conformar una estación de monitoreo de flujo de detritos y/o lodo. (Fuente: Soil & Water Conservación Bureau, COA. Taipei, Taiwan, 2010).

Fotografías

- Fotografía 3.1** Vista aguas abajo del valle del río Andamayo, sector Puente Chiguata, donde se puede ver el material fluvial conformado por arenas y gravas acumuladas en el cauce activo.
- Fotografía 3.2** Vista de margen izquierda del río Chili, cerca de la desembocadura de la quebrada Venezuela, es posible observar dos niveles de material fluvial que conforman la terraza; el nivel inferior conformado por grava, bolos y arenas, el nivel superior conformado principalmente por arenas y limos, usados como terrenos de cultivo.
- Fotografía 3.3** Gravas y arenas poco consolidados de la Formación Cuico del Cuaternario ubicado en la margen izquierda de la quebrada Río Seco, sector Cuesta Blanca.
- Fotografía 3.4** Vista del acantilado de la margen derecha del río Chili entre los Puentes Quiñones y Bolognesi, se puede observar los materiales gruesos (gravas y bolos) acumulados por un antiguo flujo de detritos (lahar histórico del Misti).

- Fotografía 3.5** Vista de la margen izquierda de un tributario de la quebrada Azufral socavado en la Pampa Cura, donde es posible ver tres niveles de flujos de detritos conformados por material grueso de tipo gravas subangulosas a subredondeadas, englobado en matriz fina; así como material gravo limo-arcilloso; los depósitos se presentan muy compactados y duros. Toda la secuencia aparece cubierta por un depósito de caída de cenizas piroclásticas.
- Fotografía 3.6** Depósitos coluviales acumulados en la ladera media del acantilado de la margen derecha de la quebrada Río Seco, sector prolongación Uchumayo.
- Fotografía 3.7** Vista donde se puede observar los niveles finos lacustrinos en el sector puente Agua Salada, ubicados en la margen izquierda de la quebrada Agua Salada, cerca de su desembocadura en el río Andamayo.
- Fotografía 3.8** Vista aguas debajo en la quebrada Honda cerca de la localidad de Chiguata, es posible observar el material gravoso subredondeado y los bloques transportados por corrientes fluviales que acarrearón depósitos de origen glaciar y los acumularon formando una extensa terraza dentro del valle.
- Fotografía 3.9** Vista de depósitos volcanoclásticos conformado por acumulación de lapillis y flujos piroclásticos inconsolidados; sector Pampa Bateones en el distrito de Alto Selva Alegre.
- Fotografía 3.10** Vista del intrusivo granodiorítico que conforma el Cerro San Ignacio, se puede observar los bolos resultantes de la exfoliación catáfila, al pie de estas laderas se ubica el pueblo joven Inmaculada Concepción, del distrito Tiabaya.
- Fotografía 3.11** Afloramiento de gabro de coloración gris verdosa por alteración de la superficie de la roca, sobre el cual se han construido viviendas, sector de calle Real, distrito de Jacobo Hunter.
- Fotografía 3.12** Vista en la que se puede observar un gabro muy fracturado y ligeramente alterado, ubicado en un afloramiento reducido localizado en la margen derecha de la quebrada Río Seco, cerca del peaje de Uchumayo.
- Fotografía 3.13** Dioritas de la Super Unidad Yarabamba afectados por disyunción esferoidal y disgregación granular, que manifiesta el alto grado de alteración de la roca, sector cerros Pajonal y Malpaso, distrito de Mollebaya.
- Fotografía 3.14** Vista de la facie superior de la Ignimbrita Aeropuerto de Arequipa, cubierto por gravas de la Formación Cuico; margen izquierda de la quebrada Río Seco, cerca de la localidad Uchumayo.
- Fotografía 3.15** Vista del afloramiento andesítico correspondiente a un flujo de lava del volcán Chachani; la roca aparece poco fracturada y ligeramente alterada que le da una coloración rojiza en superficie. Localizado en la planicie ubicada en la margen izquierda del río Chili, distrito Alto Selva Alegre.
- Fotografía 3.16** Gneis de Charcani, es posible ver las bandas de coloración rosado y verde; localizado en la carretera muy cerca de la localidad de Mollebaya.
- Fotografía 4.1** Aforo del manantial Yumina usando correntómetro, $Q = 206.0$ l/s.
- Fotografía 4.2** Aforo del manantial Ojo del Milagro 1, usando correntómetro, $Q = 114.0$ l/s.
- Fotografía 4.3** Aforo del manantial Ojo del Milagro 2, usando correntómetro, $Q = 98.0$ l/s.
- Fotografía 4.4** Manantial captado de la Bedoya en el distrito de Chiguata.
- Fotografía 4.5** Manantial Albertazo 1 (1325-51) ubicado en las inmediaciones de Yumina.
- Fotografía 4.6** Ensayo de infiltración EI-05 ($K=0.37$ m/día) realizado sobre lapilli con cenizas y fragmentos líticos.
- Fotografía 4.7** Ensayo de infiltración EI-08 ($K=0.34$ m/día) realizado sobre flujos piroclásticos y cenizas.
- Fotografía 4.8** Ensayo de infiltración EI-12 ($K=0.30$ m/día) realizado sobre rocas vulcano-clásticas, avalancha de escombros.
- Fotografía 5.1** Vista hacia el sur donde se puede ver a los cerros Pajonal y Mal Paso que rodean a la localidad de Mollebaya.
- Fotografía 5.2** Vista hacia el sur, distrito de Jacobo Hunter, se puede observar el cerro San Ignacio que configura colinas intrusivas en rocas de tipo gabrodioritas; encima se tienen colinas con bloques de roca en sus vertientes.
- Fotografía 5.3** Vista hacia el oeste del centro poblado Las Caseras en el distrito de Socabaya, se puede ver las colinas intrusivas con bloques de roca en sus laderas y en la parte inferior de la fotografía la planicie volcanoclástica.
- Fotografía 5.4** Vistas hacia el suroeste desde el sector de Chillihua donde se ve el Cerro San Bernardo que conforma colinas y lomadas de avalancha de escombros; distrito de Chiguata.

- Fotografía 5.5** Vista de colinas metamórficas a la entrada de la localidad de Mollebaya.
- Fotografía 5.6** Vista hacia el suroeste donde se puede observar una colina volcánica lávica andesítica; urbanización Mariano Bustamante, distrito Mariano Melgar.
- Fotografía 5.7** Vista hacia el oeste donde se puede apreciar la zona encañonada amplia del río Chili, conformada por acantilado volcanoclásticos subverticales; al pie de estos acantilados se tienen piedemontes coluvio-deluviales.
- Fotografía 5.8** Vista con dirección al suroeste del sector de Los Portales, cerca de la Escuela Técnica Superior de la Policía Nacional del Perú, distrito Chiguata, se puede ver la superficie plana conformada por el manto de piroclastos; hacia el fondo se observan colinas de avalancha de escombros.
- Fotografía 5.9** Vista hacia el oeste donde se puede ver la colada de lava que bajó del volcán Misti; configura una topografía subhorizontal; en los bordes se forma un acantilado.
- Fotografía 5.10** Vista hacia el oeste donde se puede observar el domo y flujo de lava que forma parte de la estructura del volcán Chachani. De los piedemontes coluvio-deluviales acumulados en el frente de los domos se extraen áridos de construcción en la actualidad.
- Fotografía 5.11** Vista con dirección hacia el este, cerca del sector de Chilina en la margen izquierda del río Chili, donde se puede ver una zona de derrumbes en acantilado volcánico, cuyos bloques y fragmentos de roca configuran un depósito coluvial.
- Fotografía 5.12** Vista con dirección hacia el noroeste, se puede observar el piedemonte deluvial acumulado sobre la gruta de la Virgen de Chapi en el valle del río Chili. Estos materiales son usados como áridos para la construcción.
- Fotografía 5.13** Vista con dirección hacia el norte, donde se ve la zona encañonada del valle del río Chili, hacia sus márgenes la acumulación de depósitos coluvio-deluvial.
- Fotografía 5.14** Vista con dirección al suroeste donde se puede ver la llanura inundable del río Socabaya que es límite entre los distritos de Paucarpata y Sabandía; es posible ver la ubicación de torres de alta tensión dentro de esta zona inundable.
- Fotografía 5.15** Vista con dirección al oeste de la margen derecha del río Chili, sector de Vallecito, donde es posible ver hasta tres niveles de terrazas aluviales.
- Fotografía 5.16** Vista con dirección hacia el suroeste donde se puede ver el acantilado aluvial vertical y la planicie aluvial en la margen izquierda del río Chili, sector de Congata, distrito de Uchumayo.
- Fotografía 5.17** Vista con dirección hacia el noreste donde se puede observar unos promontorios de material aluvio-proluvial erosionados que se constituyen en islas fluviales cuando la quebrada San Lázaro se activa.
- Fotografía 5.18** Vista con dirección suroeste donde se puede observar una quebrada seca la cual ha sido antropogenizada, se ha construido una loza deportiva en el mismo cauce, dejándose una alcantarilla para que discurra el agua que se concentra durante los periodos de lluvia.
- Fotografía 5.19** Vista con dirección hacia el norte donde se observa la terraza proluvio-aluvial de la quebrada Honda, cerca de la localidad de Chiguata.
- Fotografía 5.20** Vista del río Chili donde se puede ver un afloramiento intrusivo gabrodiorítico en medio del cauce a manera de isla, la cual ha sido usada para colocar un pilar del puente que cruza el río.
- Fotografía 5.21** Vista en la que se puede observar las cárcavas formadas por escorrentía superficial concentrada que corta las ignimbritas rosadas; sector avenida 1 (antigua carretera a Yura), distrito Cerro Colorado.
- Fotografía 5.22** Vista hacia el norte, donde se ve en primer plano el piedemonte volcanoclástico de baja pendiente; hacia el fondo el volcán Misti.
- Fotografía 5.23** Vista con dirección hacia el sur, en el sector de Tingo Grande, distrito Jacobo Hunter, donde se puede ver las laderas del cerro San Ignacio cubiertas con depósitos eólicos conformados por cenizas volcánicas.
- Fotografía 5.24** Vista hacia el sur desde la Vía Paisajística en el distrito de Jacobo Hunter, donde se puede ver un monte isla de roca intrusiva gabrodiorítica que sobresale a la planicie aluvial antropizada de la margen derecha del río Socabaya.

- Fotografía 5.25** Vista con dirección hacia el este donde se puede observar una cantera de extracción de áridos ubicado en la margen izquierda del río Chili, distrito de Uchumayo.
- Fotografía 5.26** Vista con dirección hacia el sur donde es posible observar un montículo formado por la acumulación de desmonte, también se está cubriendo un campo deportivo con estos materiales; sector de Huaranguitos, distrito Sachaca.
- Fotografía 5.27** Vista con dirección hacia el noreste, aguas arriba de un tributario de la quebrada Gamarra en la Pampa Cura, distrito Cayma, donde se puede ver los rellenos antrópicos de material de desmonte colocados en borde de acantilados.
- Fotografía 5.28** Vista con dirección hacia el sur donde se puede ver el botadero de basura localizado al final de la avenida Ecológica en el distrito de Alto Selva Colorada, la basura es acumulada, quemada y cubierta.
- Fotografía 5.29** Vista con dirección hacia el suroeste donde se ve puede observar el cauce de una quebrada seca la cual ha sido cubierta completamente por el desmonte producto de la extracción de bloques de sillar; distrito Cerro Colorado.
- Fotografía 5.30** Vista con dirección hacia el norte, aguas arriba del río Chili cerca a la confluencia de la quebrada Venezuela, donde se puede ver en el centro de la imagen el muro de encauzamiento formado con la acumulación de material aluvial del mismo cauce del río; distrito de Arequipa.
- Fotografía 5.31** Vista con dirección hacia el suroeste, donde se puede observar un dique de concreto y mampostería colocada para encauzar el río Chili y proteger terrenos de cultivo de la margen derecha; distrito de Sachaca.
- Fotografía 5.32** Vista con dirección hacia el norte donde se puede observar el cauce de una quebrada seca obstruida con un dique de tierra, localizado en las nuevas zonas expansión urbana del distrito Cayma.
- Fotografía 5.33** Vista con dirección hacia el norte donde se puede observar un tramo de la quebrada El Chullo cubierto por construcción de viviendas; cruce de la quebrada con la avenida Ejército, en el límite de los distritos Cayma y Cerro Colorado.
- Fotografía 5.34** Vista hacia el sureste del cauce desviado y encauzado con muros de gaviones de un tributario de la quebrada Venezuela, en la urbanización Alameda de Salaverry, distrito Miraflores.
- Fotografía 5.35** Vista con dirección hacia el sur donde se puede observar la margen izquierda del río Chili conformada por terrazas ignimbríticas en varios niveles; entre Chilina y el santuario de Chapi.
- Fotografía 6.1** Vista de alcantarillas colocadas en la carretera que sube por el sector de Cabrería en el distrito de Cayma. Vista hacia el suroeste.
- Fotografía 6.2** Quebrada cuyo cauce ha sido borrado por la explanación del terreno para habilitar una nueva urbanización de viviendas. Vista hacia el suroeste.
- Fotografía 6.3** Vista donde se puede observar la obstrucción de dos cauces de quebradas con el material colocado como terraplén para habilitar vías de acceso hacia la urbanización Villa Real. Vista hacia el noreste.
- Fotografía 6.4** Alcantarilla destruida por flujos que discurren por la quebrada Pastoras. Vista con dirección al noreste.
- Fotografía 6.5** Sector Seis en el Complejo Habitacional Dean Valdivia, a partir de este punto la quebrada ha sido borrada con obras de explanación de terreno con fines de urbanización, las aguas de precipitación pluvial tienen como nuevo curso de drenaje las pistas asfaltadas. Vista hacia al noreste.
- Fotografía 6.6** Desmonte arrojado en la margen izquierda de la quebrada Pastoras. Vista hacia el noreste.
- Fotografía 6.7** Local comunal y loza deportiva de la Asociación de Vivienda San Luis Gonzaga, del distrito de Alto Selva Alegre-Zona A, construida en el mismo cauce de la quebrada San Lázaro (cuena Alta). Vista hacia el suroeste.
- Fotografía 6.8** Izquierda; quebrada San Lázaro, cuyo cauce es obstruido con puente vehicular.
- Fotografía 6.9** Derecha; cauce techado de la quebrada Venezuela.
- Fotografía 6.10** Izquierda. Vista aguas arriba de la quebrada Pozo Negro, donde se observa la excavación realizada por debajo del puente vehicular.
- Fotografía 6.11** Derecha. Vista aguas abajo de la quebrada Pozo Negro, también es posible distinguir la excavación realizada por debajo del puente vehicular.

- Fotografía 6.12** Vista donde se observa las marcas del agua en los estribos del puente, así como las bolsas de plástico y lodo que se acumula debajo de su estructura, los cuales marcan el nivel de carga que alcanza la quebrada por los flujos de lodo y agua que discurren por la quebrada.
- Fotografía 6.13** Vista aguas abajo de quebrada encauzada en la calle Torrentera (punto de control n° 624), se observa el muro de concreto y el desnivel existente entre la calle y el lecho de la quebrada. Vista con dirección hacia el suroeste.
- Fotografía 6.14** Vista agua arriba de quebrada seca en la calle Capitán Novoa, donde se puede apreciar la ubicación de muro de concreto el relleno y la calle (lado derecho de la fotografía). Vista con dirección hacia el sureste.
- Fotografía 6.15** Quebrada seca de corto recorrido en cuyo cono proluvial y laderas con bloques sueltos, viene siendo ocupado por las viviendas de la Asociación de Viviendas La Rinconada, distrito Jacobo Hunter. Vista con dirección hacia el suroeste.
- Fotografía 6.16** Tamaño alcanzado por los bolones subredondeados producto de la disyunción esferoidal que afecta las tonalitas en la Asociación de Vivienda La Rinconada. Distrito Jacobo Hunter. Vista con dirección hacia el suroeste.
- Fotografía 6.17** Vista aguas arriba de la quebrada Churumpaya, en donde las viviendas se vienen construyendo dentro del cauce de la misma. Vista con dirección al este.
- Fotografía 6.18** Vista del mismo sector de la quebrada Chullo, encauzada con muros de concreto y viviendas, localizada en el cruce de las avenidas Pancho Fierro y Arequipa, tomadas con una diferencia temporal de 16 meses; donde es posible ver la intensidad de la erosión producida con la crecida de la quebrada en la temporada de lluvias del año 2016; se produjo la destrucción de una vivienda en la margen derecha, destrucción de muro de ladrillos en la margen izquierda y socavamiento de las bases de otra vivienda de cuatro pisos.
- Fotografía 6.19** Vista del mismo sector de la quebrada Chullo, encauzada con muros de concreto y viviendas, localizada en el cruce de las avenidas Pancho Fierro y Arequipa, tomadas con una diferencia temporal de 16 meses; donde es posible ver la intensidad de la erosión producida con la crecida de la quebrada en la temporada de lluvias del año 2016; se produjo la destrucción de una vivienda en la margen derecha, destrucción de muro de ladrillos en la margen izquierda y socavamiento de las bases de otra vivienda de cuatro pisos.
- Fotografía 6.20** Río Yarabamba. Botadero de desmonte en la margen derecha que estrecha su cauce (Fotografía: Zavala, 2012).
- Fotografía 6.21** Vivienda colapsada en la margen derecha de la quebrada San Lázaro debido al incremento del caudal por efecto de las lluvias excepcionales del 08/02/2013.
- Fotografía 6.22** Sector Chilina, sujeta a derrumbes, flujos de detritos y erosión fluvial. Esta quebrada llega a desembocar en la ciudad de Arequipa (fotografía: Zavala, 2012)
- Fotografía 6.23** Flujo de detritos en la quebrada Peral, por la presencia de lluvias excepcionales afectaría canal de riego y terrenos de cultivo (Fotografía: Zavala, 2012).
- Fotografía 6.24** Río Chili (margen izquierda), se observa caída de rocas puede afectar cultivos, y canal de regadío (Fotografía: Zavala, 2012).
- Fotografía 6.25** Flujo de detritos en la quebrada Azufral - fundo Cabrería (Fotografía: Zavala, 2012).
- Fotografía 7.1** Material proluvial en la quebrada San Lázaro en el año 2015.

Cuadros

- Cuadro 2.1** Distribución de la población a nivel de distrito de la provincia Arequipa.
- Cuadro 2.2** Nivel de instrucción de la población en la zona de estudio.
- Cuadro 2.3** Tipo de vivienda de la zona de estudio.
- Cuadro 2.4** Material de construcción usado en las paredes de las viviendas de la zona estudiada.
- Cuadro 2.5** Material de construcción usado en los techos de las viviendas de la zona estudiada.
- Cuadro 2.6** Alumbrado eléctrico por tipo de vivienda por red pública de la ciudad de Arequipa.

Cuadro 2.7	Tipo de abastecimiento de agua en las viviendas de la ciudad de Arequipa.
Cuadro 2.8	Tipo de servicio higiénico en las viviendas de la ciudad Arequipa.
Cuadro 2.9	Característica de la pista de aterrizaje ubicada dentro de la zona de estudio.
Cuadro 2.10	Ruta cubierta por el ferrocarril del sur y sur-oriente.
Cuadro 2.11	Centrales hidroeléctricas en la zona de estudio.
Cuadro 2.12	Centrales hidroeléctricas en la zona de estudio.
Cuadro 2.13	Parámetros climáticos promedio de la ciudad de Arequipa.
Cuadro 4.1	Resumen de fuentes de agua subterránea, parámetros hidráulicos y físico-químicos.
Cuadro 4.2	Clasificación de la descarga, según Meinzer (1923).
Cuadro 4.3	Tabla convencional de permeabilidad según Benítez (1963).
Cuadro 4.4	Valores de conductividad hidráulica (m/día) registrados en la zona de estudio.
Cuadro 6.1	Cronología de peligros geológicos ocurridos en la ciudad de Arequipa.
Cuadro 6.2	Zonas críticas en la ciudad de Arequipa.
Cuadro 6.3	Ponderación de variables temáticas.
Cuadro 6.4	Variables consideradas y su susceptibilidad a los movimientos en masa en la ciudad de Arequipa.
Cuadro 6.5	Ponderación de variables temáticas.
Cuadro 6.6	Variables consideradas y su susceptibilidad a las inundaciones fluviales en la ciudad de Arequipa
Cuadro 7.1	Propiedades morfométricas de cada subcuenca del río Chili.
Cuadro 7.2	Caudales máximos del hidrograma clasificados en periodos de retorno.
Cuadro 7.3	Propiedades morfométricas de la cuenca de la quebrada San Lázaro.
Cuadro 7.4	Esfuerzos dominantes para los diferentes tipos de flujos.



Av. Canadá 1470 - San Borja, Lima 41, Perú

Teléfono: 051 - 1- 618 9800

Fax: 051-1-225-3063 | 051-1-225-4540

www.gob.pe/ingemmet

comunicacion@ingemmet.gob.pe