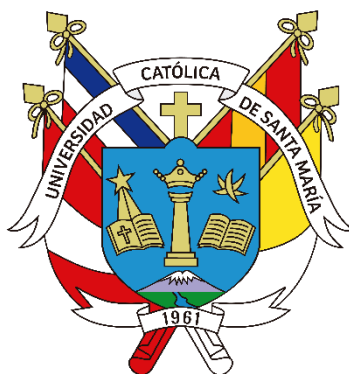


**Universidad Católica de Santa María**  
**Escuela de Postgrado**  
**Maestría en Gerencia de la Construcción**



**Identificación de vulnerabilidad, mitigación y gestión de riesgos por  
inundación en obras viales existentes, frente al cambio climático en las  
principales torrenteras de la ciudad de Arequipa**

Tesis presentada por el Bachiller:

**Ccancapa Puma, Joel**

**ORCID: 0009-0005-4439-0711**

Para optar el Grado Académico de Maestro en Gerencia de la Construcción

Asesor:

**Mg. Arroyo Ambia, Arturo Félix**

**ORCID: 0009-0003-2851-4513**

Arequipa - Perú

2024

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS**

Arequipa, 02 de Abril del 2024

**Dictamen: 007788-C-EPG-2024**

Visto el borrador del expediente 007788, presentado por:

**2020004281 - CCANCCAPA PUMA JOEL**

Titulado:

**IDENTIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD, MITIGACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS POR  
INUNDACIÓN EN OBRAS VIALES EXISTENTES, FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS  
PRINCIPALES TORRENTERAS DE LA CIUDAD DE AREQUIPA**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**29470716 - RIOS VIZCARRA GONZALO JESUS  
DICTAMINADOR**



**29440909 - MOLINA RODRIGUEZ FREDY NICOLAS  
DICTAMINADOR**



**44087928 - VILLANUEVA PAREDES KAREN SOLEDAD  
DICTAMINADOR**



# Identificación de vulnerabilidad, mitigación y gestión de riesgos por inundación en obras viales existentes, frente al cambio climático en las principales torrenteras de la ciudad de Arequipa

## ORIGINALITY REPORT

29%

SIMILARITY INDEX

26%

INTERNET SOURCES

24%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

1	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet Source	11%
2	Joel Ccancapa Puma, Alejandro Víctor Hidalgo Valdivia, Guillermo Yorel Noriega Aquisé, Alex Eduardo Aguilar Chavez et al. "Análisis y prevención del peligro por inundaciones en quebradas de alto riesgo en la ciudad de Arequipa – Perú", Tecnología y ciencias del agua, 2023 Publication	9%
3	<a href="https://laccei.org">laccei.org</a> Internet Source	4%
4	<a href="https://repositorio.ucsm.edu.pe">repositorio.ucsm.edu.pe</a> Internet Source	2%
5	<a href="https://repositorio.ingemmet.gob.pe">repositorio.ingemmet.gob.pe</a> Internet Source	2%
6	<a href="https://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Internet Source	

### *Dedicatoria*

A Dios, por permitirme llegar a este punto de mi formación profesional. A mis padres Angelica y Ciro por ser los pilares más importantes, fundamentales e incondicionales a través de su apoyo y motivación en cada etapa de mi vida.



## *Agradecimientos*

A mi alma mater la Universidad Católica de Santa María, por fomentar la investigación científica a través de fondos para la investigación.

Al ingeniero Arturo Arroyo Ambia, por su amistad, consejos y recomendaciones para el desarrollo del presente trabajo de investigación.



## RESUMEN

Arequipa, la segunda ciudad más importante del Perú, cada año sufre de inundaciones en las márgenes de los cauces de las quebradas posteriormente torrenteras que hacen su ingreso a la ciudad y que confluyen hacia el río Chili. Desencadenando en caudales cada vez más críticos por precipitaciones de corta duración, pero de alta intensidad, y a medida que la carga de sedimentos aumenta y se vuelve más gruesa, el flujo pasa a ser no newtoniano, un peligro geológico catastrófico en regiones con climas áridos o semiáridos, como la ciudad de Arequipa. Situación que se agrava por la poca o nula planificación urbana, ya que en más de los últimos 20 años las tormentas extremas se hacen cada vez más frecuentes debido al cambio climático.

En tal sentido, para una correcta Gestión de Riesgo de Desastre (**GRD**) por eventos extremos en la ciudad de Arequipa, se formulan componentes bajo un enfoque reactivo y bajo estándares establecidos en la Guía del PMBOK (**Project Management Body of Knowledge**) del PMI (**Project Management Institute**). De esta manera, se busca reducir la vulnerabilidad frente al cambio climático e incrementar la resiliencia por peligros hidrometeorológicos tomando medidas estructurales y no estructurales en las diferentes torrenteras de la ciudad de Arequipa.

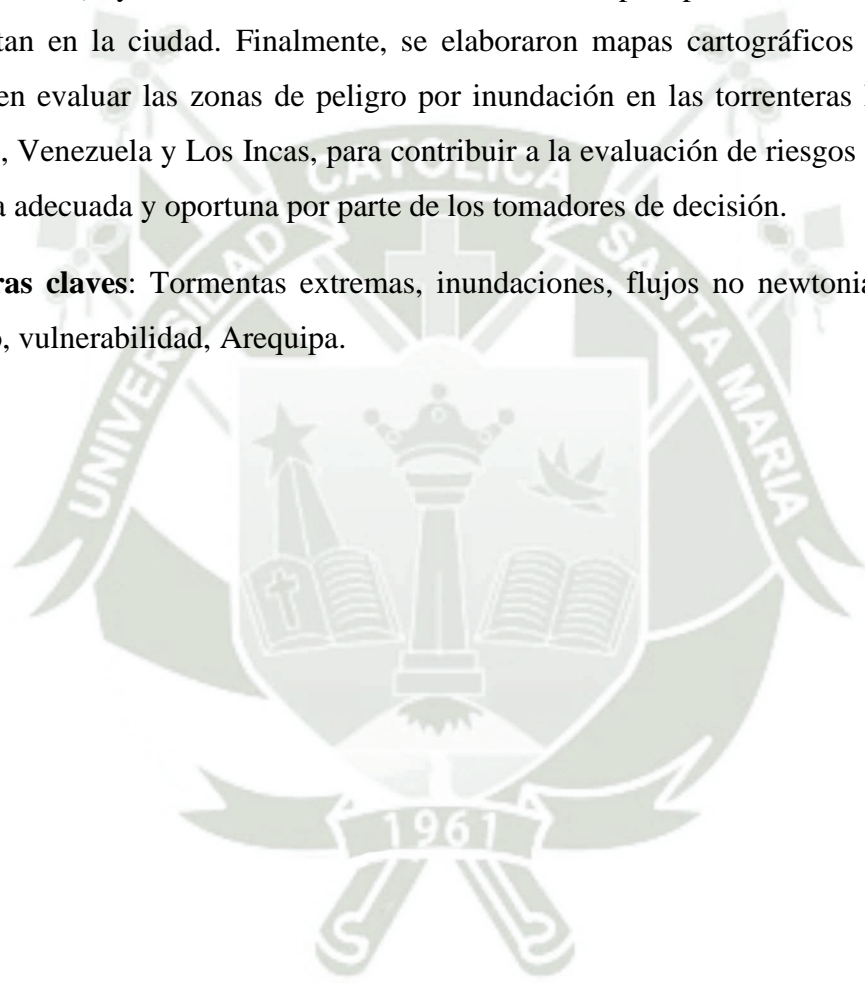
Este estudio presenta los resultados por la ocurrencia de flujos hiperconcentrados, lodo y escombros debido a lluvias extremas, para ello se generaron umbrales de precipitación máxima, para determinar la peligrosidad de un fenómeno meteorológico adverso, previsto o en desarrollo y su correspondiente caracterización como índices climáticos. Se utilizó la serie de tiempo de precipitación de las estaciones meteorológicas La Pampilla y Chiguata del SENAMHI (**Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú**) con un registro de 43 años (**1981 - 2023**) para obtener hidrogramas de avenidas con el modelo numérico HEC – HMS, considerando un perfil de tormenta tipo SCS-II. Luego, se realizó el modelamiento bidimensional (**2D**) a través de modelos reológicos de Bingham y O'Brien Equation (**Quadratic**) para el evento suscitado el año 2020, común denominador por eventos históricos de la ciudad de Arequipa. Se calibró el modelo hidráulico por huella hídrica con las nuevas características no newtonianas del modelo numérico HEC – RAS.

Se determinó el peligro de inundaciones a través de una matriz de riesgo, el cual combina altura/velocidad de flujo y la vulnerabilidad en obras viales existentes (**puentes**

**viales y/o peatonales**) a través de una matriz multicriterio con 04 dimensiones: ambiental, técnico, social y económico en base a una exhaustiva revisión de literatura. La matriz se aplicó a 60 puntos críticos en las diferentes torrenteras, resultando una **ALTA** vulnerabilidad hidrológica e hidráulica.

Se identificó como factores condicionantes a la pendiente, la geología y la geomorfología por peligros asociados a movimientos rápidos de masa (**flujos no newtonianos**), y como factor desencadenante a las precipitaciones extremas que se presentan en la ciudad. Finalmente, se elaboraron mapas cartográficos en QGIS que permiten evaluar las zonas de peligro por inundación en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas, para contribuir a la evaluación de riesgos de desastre de manera adecuada y oportuna por parte de los tomadores de decisión.

**Palabras claves:** Tormentas extremas, inundaciones, flujos no newtonianos, puentes, peligro, vulnerabilidad, Arequipa.



## ABSTRAC

Arequipa, the second most important city in Peru, suffers from flooding every year on the banks of the streams of the streams that enter the city and flow into the Chili River. Triggering increasingly critical flows due to short-duration but high-intensity rainfall, and as the sediment load increases and becomes thicker, the flow becomes non-Newtonian, a catastrophic geological hazard in regions with arid climates or semi-arid, like the city of Arequipa. A situation that is aggravated by little or no urban planning, since in more than the last 20 years extreme storms have become increasingly frequent due to climate change.

In this sense, for correct Disaster Risk Management (**DRM**) due to extreme events in the city of Arequipa, components are formulated under a reactive approach and under standards established in the PMBOK (**Project Management Body of Knowledge**) Guide of the PMI (**Project Management Institute**). In this way, the aim is to reduce vulnerability to climate change and increase resilience to hydrometeorological hazards by taking structural and non-structural measures in the different torrents of the city of Arequipa.

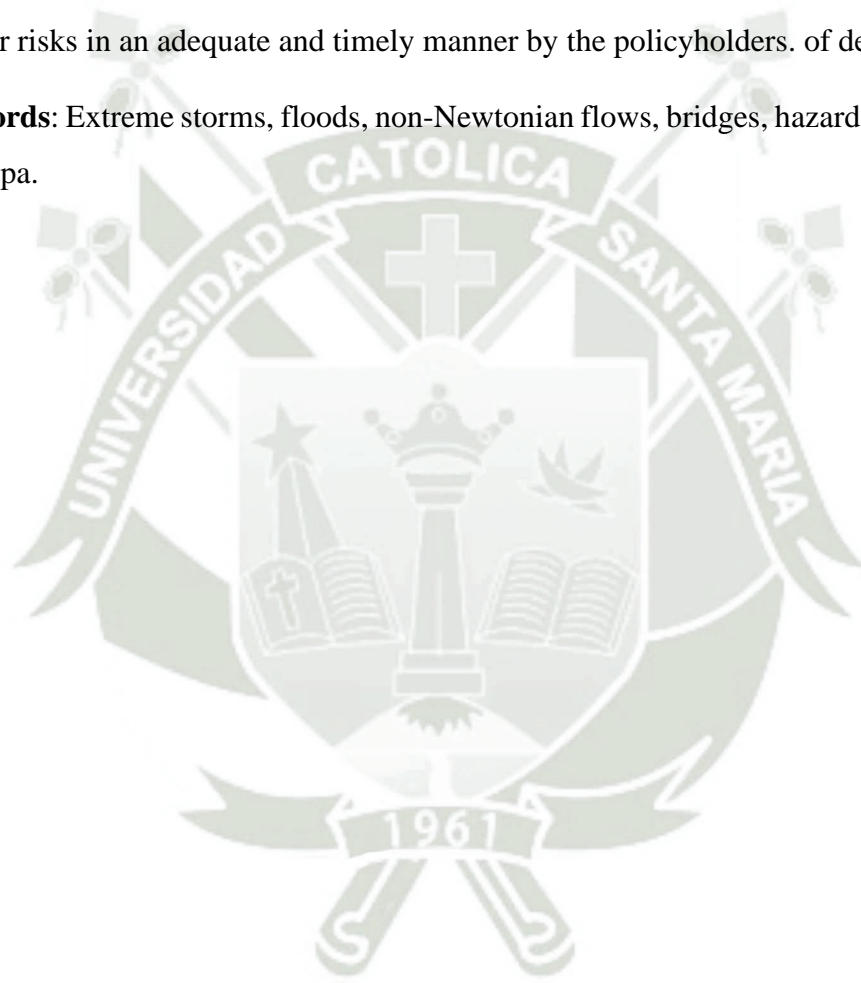
This study presents the results for the occurrence of hyperconcentrated flows, mud and debris due to extreme rains, for this maximum precipitation thresholds were generated, to determine the danger of an adverse meteorological phenomenon, predicted or in development and its corresponding characterization as climatic indices. The precipitation time series from the La Pampilla and Chiguata meteorological stations of the SENAMHI (**National Service of Meteorology and Hydrology of Peru**) with a record of 43 years (**1981 - 2023**) was used to obtain flood hydrographs with the numerical model HEC - HMS considering a SCS-II type storm profile. Then, two-dimensional (**2D**) modeling was carried out through Bingham and O'Brien Equation (**Quadratic**) rheological models for the event that occurred in 2020, a common denominator for historical events in the city of Arequipa. The hydraulic model was calibrated by water footprint with the new non-Newtonian characteristics of the HEC – RAS numerical model.

The danger of flooding was determined through a risk matrix, which combines height/flow speed, and the vulnerability in existing road works (**bridges**) through a multi-criteria matrix with 04 dimensions: environmental, technical, social, and economic based

on an exhaustive literature review. The matrix was applied to 60 critical points in the different torrents, resulting in **HIGH** hydrological and hydraulic vulnerability.

Slope, geology and geomorphology were identified as conditioning factors due to dangers associated with rapid mass movements (**non-Newtonian flows**), and extreme rainfall in the city of Arequipa was identified as a triggering factor. Finally, cartographic maps were prepared in QGIS that allow the evaluation of flood danger zones in the Del Pato, San Lázaro, Venezuela and Los Incas torrents, to contribute to the evaluation of disaster risks in an adequate and timely manner by the policyholders. of decision.

**Keywords:** Extreme storms, floods, non-Newtonian flows, bridges, hazard, vulnerability, Arequipa.



## INDICE

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I PLANTEAMIENTO	4
1.1 Enunciado del problema	4
1.2 Descripción del problema	4
1.3 Justificación	10
1.3.1 Justificación técnica	10
1.3.2 Justificación económica	13
1.3.3 Justificación social	13
1.4 Objetivos	14
1.4.1 Objetivo general	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
1.5 Análisis operacional de variables	14
1.6 Hipótesis	15
CAPITULO II METODOLOGIA	17
2.1 Estado del arte	17
2.2 Guía de Proyectos	19
2.3 Principios de la dirección de proyectos	20
2.3.1 Optimizar las repuestas a los riesgos	20
2.3.2 Adoptar la adaptabilidad y la resiliencia	21
2.3.3 Dominios de desempeño del proyecto	21
2.4 Variable independiente	22
2.4.1 Eventos extremos	22
2.5 Hidrología	23
2.5.1 Umbrales de precipitación máxima	23
2.6 Geología	34
2.7 Pendiente	36
2.8 Geomorfología	37
2.9 Topografía	40
2.10 Mecánica de suelos	42

2.11 Flujos no newtonianos .....	42
2.12 Simulación bidimensional.....	44
2.13 Variable dependiente .....	47
2.13.1 Identificar los riesgos .....	47
2.13.2 Análisis FODA.....	47
2.14 Obras viales existentes.....	49
2.14.1 Análisis de vulnerabilidad multicriterio.....	49
CAPITULO III RESULTADOS .....	55
3.1 Umbrales de precipitación máxima .....	55
3.2 Torrentera Del Pato.....	59
3.1.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Del Pato.....	61
3.2 Torrentera San Lázaro .....	62
3.2.1 Evaluación de obras viales - Torrentera San Lázaro.....	65
3.3 Torrentera Venezuela.....	66
3.3.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Venezuela.....	69
3.4 Torrentera Los Incas .....	70
3.4.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Los Incas .....	73
3.5 Mitigación.....	77
DISCUSIÓN.....	78
CONCLUSIONES.....	86
RECOMENDACIONES .....	87
REFERENCIAS .....	89
ANEXOS.....	96

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Clasificación Climática.....	13
<b>Tabla 2</b> Definición y Operacionalización de las Variables .....	14
<b>Tabla 3</b> Caracterización de Extremos de Precipitación .....	24
<b>Tabla 4</b> Estaciones Meteorológicas .....	26
<b>Tabla 5</b> Parámetros Morfológicos – Parte I.....	29
<b>Tabla 6</b> parámetros Morfológicos – Parte II.....	29
<b>Tabla 7</b> Parámetros de las Quebradas – HEC HMS .....	33
<b>Tabla 8</b> Caudales Máximos Líquidos .....	33
<b>Tabla 9</b> Geología .....	36
<b>Tabla 10</b> Ensayos de Estudios de Mecánica de Suelos .....	42
<b>Tabla 11</b> Caudales Máximos para diferentes Periodos de Retorno .....	46
<b>Tabla 12</b> Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Ambiental .....	50
<b>Tabla 13</b> Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Técnica.....	51
<b>Tabla 14</b> Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Social .....	52
<b>Tabla 15</b> Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Económica .....	53
<b>Tabla 16</b> Registro Histórico.....	55
<b>Tabla 17</b> Umbrales de Precipitación Máxima – Estación La Pampilla .....	56
<b>Tabla 18</b> Umbrales de Precipitación Máxima – Estación Chiguata .....	57
<b>Tabla 19</b> Puntuación de Evaluación de Vulnerabilidad de los Puentes Viales y Peatonales de las Torrenteras Del Pato, San Lázaro y Venezuela.....	75
<b>Tabla 20</b> Puntuación de Evaluación de Vulnerabilidad de los Puentes Viales y Peatonales de la Torrentera Los Incas .....	76

## Indicé de Figuras

<b>Figura 1</b> Sistema Regulado de las Represas en la Cuenca Quilca - Chili .....	5
<b>Figura 2</b> Registro del 08 de febrero del 1989 .....	7
<b>Figura 3</b> Registro del 08 de febrero del 2012 .....	7
<b>Figura 4</b> Registro del 08 de febrero del 2013 .....	8
<b>Figura 5</b> Registro del 01 de enero del 2015.....	8
<b>Figura 6</b> Registro del 23 y 24 de febrero del 2016.....	9
<b>Figura 7</b> Registro del 30 de enero y 08 de febrero del 2017 .....	9
<b>Figura 8</b> Registro del 26 de febrero del 2020 .....	10
<b>Figura 9</b> Susceptibilidad a Inundación de la Ciudad de Arequipa .....	11
<b>Figura 10</b> Clasificación Climática en la Ciudad de Arequipa .....	12
<b>Figura 11</b> Guía del PMBOK: Sexta Edición - Séptima Edición .....	20
<b>Figura 12</b> Dominios de Desempeño del Proyecto .....	22
<b>Figura 13</b> El Ciclo del Agua.....	23
<b>Figura 14</b> Ubicación de Estaciones Meteorológicas .....	25
<b>Figura 15</b> Cuencas Delimitadas.....	27
<b>Figura 16</b> Precipitación Máxima de 24 horas - Estación La Pampilla (1981-2023) .....	28
<b>Figura 17</b> Precipitación Máxima de 24 horas - Estación Chiguata (1981-2021) .....	28
<b>Figura 18</b> Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Del Pato.....	30
<b>Figura 19</b> Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada San Lázaro .....	30
<b>Figura 20</b> Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Venezuela.....	30
<b>Figura 21</b> Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Los Incas .....	31
<b>Figura 22</b> Analisis de Frecuencia - Estacion La Pampilla.....	32
<b>Figura 23</b> Analisis de Frecuencia - Estacion Chiguata.....	32
<b>Figura 24</b> Perfil Longitudinal de Quebradas que Confluyen hacia el Rio Chili .....	34
<b>Figura 25</b> Geología .....	35
<b>Figura 26</b> Pendiente.....	37
<b>Figura 27</b> Geomorfología .....	38
<b>Figura 28</b> Litología.....	39
<b>Figura 29</b> Topografía de las Torrenteras .....	41
<b>Figura 30</b> Modelos Reológicos.....	43
<b>Figura 31</b> Coeficiente de Manning .....	45
<b>Figura 32</b> Hidrograma Liquido y Solido .....	46

<b>Figura 33</b> Matriz FODA .....	48
<b>Figura 34</b> Caracterización de Umbrales de Precipitación Máxima - Estación La Pampilla.....	55
<b>Figura 35</b> Estación La Pampilla (1981-2023) - Precipitación (mm) vs Percentiles (%)	56
<b>Figura 36</b> Caracterización de Umbrales de Precipitación Máxima - Estación Chiguata	57
<b>Figura 37</b> Estación Chiguata (1981-2021) - Precipitación (mm) vs Percentiles (%)....	58
<b>Figura 38</b> Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Del Pato .	60
<b>Figura 39</b> Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Del Pato	62
<b>Figura 40</b> Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera San Lázaro .....	64
<b>Figura 41</b> Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera San Lázaro .....	66
<b>Figura 42</b> Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Venezuela .....	68
<b>Figura 43</b> Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Venezuela .....	70
<b>Figura 44</b> Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Los Incas	72
<b>Figura 45</b> Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Los Incas	74
<b>Figura 46</b> Infraestructuras presentes en los cauces de las diferentes Torrenteras .....	80
<b>Figura 47</b> Susceptibilidad a Inundaciones y Erosión Fluvial en Quebradas de Estudio	82
<b>Figura 48</b> Identificación de Obras Viales Existentes en las Torrenteras de Estudio.....	84

## Lista de abreviaturas

- ANA** : Autoridad Nacional del Agua.
- CENEPRED** : Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastre.
- COEN** : Centro de Emergencia Nacional.
- GIS** : Sistema de Información Geográfica
- HEC-HMS** : Hydrologic Engineering Center's - Hydrologic Modeling System.
- HEC-RAS** : Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System.
- INGEMMET** : Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- INDECI** : Instituto Nacional de Defensa Civil.
- INEI** : Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- IPCC** : Panel Intergubernamental del Cambio Climático.
- MTC** : Ministerio de Transporte y Comunicaciones.
- MHHYD** : Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje.
- MP** : Manual de Puentes.
- MDE** : Modelo Digital de Elevación.
- MINAM** : Ministerio del Ambiente.
- ONU** : Organización de Naciones Unidas.
- PMI** : Instituto de Gestión de Proyectos.
- PIP** : Proyecto de Inversión Pública.
- PMBOK** : Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos.
- SENAMHI** : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- WEF** : Foro Económico Mundial.

## INTRODUCCIÓN

El Project Management Institute (**PMI**), es una institución encargada de proporcionar estándares para la buena gestión y control de proyectos, dentro de ellos la gestión de riesgos, es la encargada de estudiar la incidencia de factores externos e internos al proyecto para completar los objetivos de manera satisfactoria.

El último informe del Foro Económico Mundial [WEF] (2023), sobre riesgos globales, identifico a corto y largo plazo los desastres naturales y fenómenos meteorológicos extremos como los más críticos y que cada vez estamos menos preparados. El fenómeno del niño costero ocurrido entre el 2016 y 2017, evidencio estudios deficientes en la parte hidrológica e hidráulica, lo que conllevó a la destrucción de 449 puentes a nivel nacional según el Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI] (2017) y expuso la falta de resiliencia en el Perú debido a eventos extremos (Espinoza y Booker, 2023a).

El Perú está altamente expuesto frente al cambio climático, que repercute en la severidad y ocurrencia de fenómenos meteorológicos como El Niño, una situación que se ve agravada con la situación de desigualdad, pobreza y el crecimiento demográfico (IPCC, 2022). En este contexto, en el Perú se producen intensas lluvias, aluviones, granizadas, desbordes, huaycos, inundaciones, sequías, entre otros, que alteran la geodinámica de nuestro territorio. Las inundaciones de origen hidrometeorológico son los fenómenos más letales y representan aproximadamente el 40% de los desastres naturales (**factor externo clasificado de alta prioridad**) según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] (2014). En Arequipa, la precipitación excepcional del 08/02/2013 (**124.5 mm**) donde producto de las intensas lluvias dejó 5 muertos y el 26/01/2017 en la Variante de Uchumayo, Kilometro 12, 13 y 14 dejó 3 muertos según el Centro de Emergencia Nacional [COEN] (2017).

De esta manera, La Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en Arequipa Metropolitana (2018), evidencia que los sistemas de infraestructura e información frente a inundaciones son de vital importancia, para enfrentar las fuertes precipitaciones e inundaciones que se generan actualmente y que se ven potenciadas por el cambio climático.

Arequipa, alberga más de 1 millón 301 mil habitantes según el Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú [INEI] (2017), y la ciudad cada año sufre de

inundaciones en los cauces de las torrenteras que confluyen hacia el río Chili, porque se producen precipitaciones de corta duración, pero de alta intensidad y en los últimos 20 años las tormentas extremas se hacen cada vez más frecuentes debido al cambio climático (Ccanccapa et al., 2023). Desencadenando en caudales cada vez más críticos hacia las torrenteras. Estas lluvias extremas han evidenciado el mal dimensionamiento y destrucción de los puentes sobre las torrenteras y cauces de ríos (Espinoza y Booker, 2023b) como también una planificación urbana inadecuada.

En consecuencia, la presente investigación propone una metodología para caracterizar eventos extremos como las inundaciones en las principales torrenteras de la ciudad de Arequipa (**Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas**), en base a estudio básicos en hidrología, geotecnia e hidráulica, para conocer el comportamiento de las lluvias extremas y torrenciales que llegan a ocasionar pérdidas económicas, adaptando estándares establecidos por el Project Management Institute (**PMI**) y así determinar el peligro y la vulnerabilidad de obras viales existentes, con la ayuda de modelos numéricos hidrológicos e hidráulicos, proporcionando información confiable y de manera oportuna para la alerta de eventos extremos y sus potenciales zonas de afectación.



# CAPÍTULO I

## CAPITULO I PLANTEAMIENTO

### 1.1 Enunciado del problema

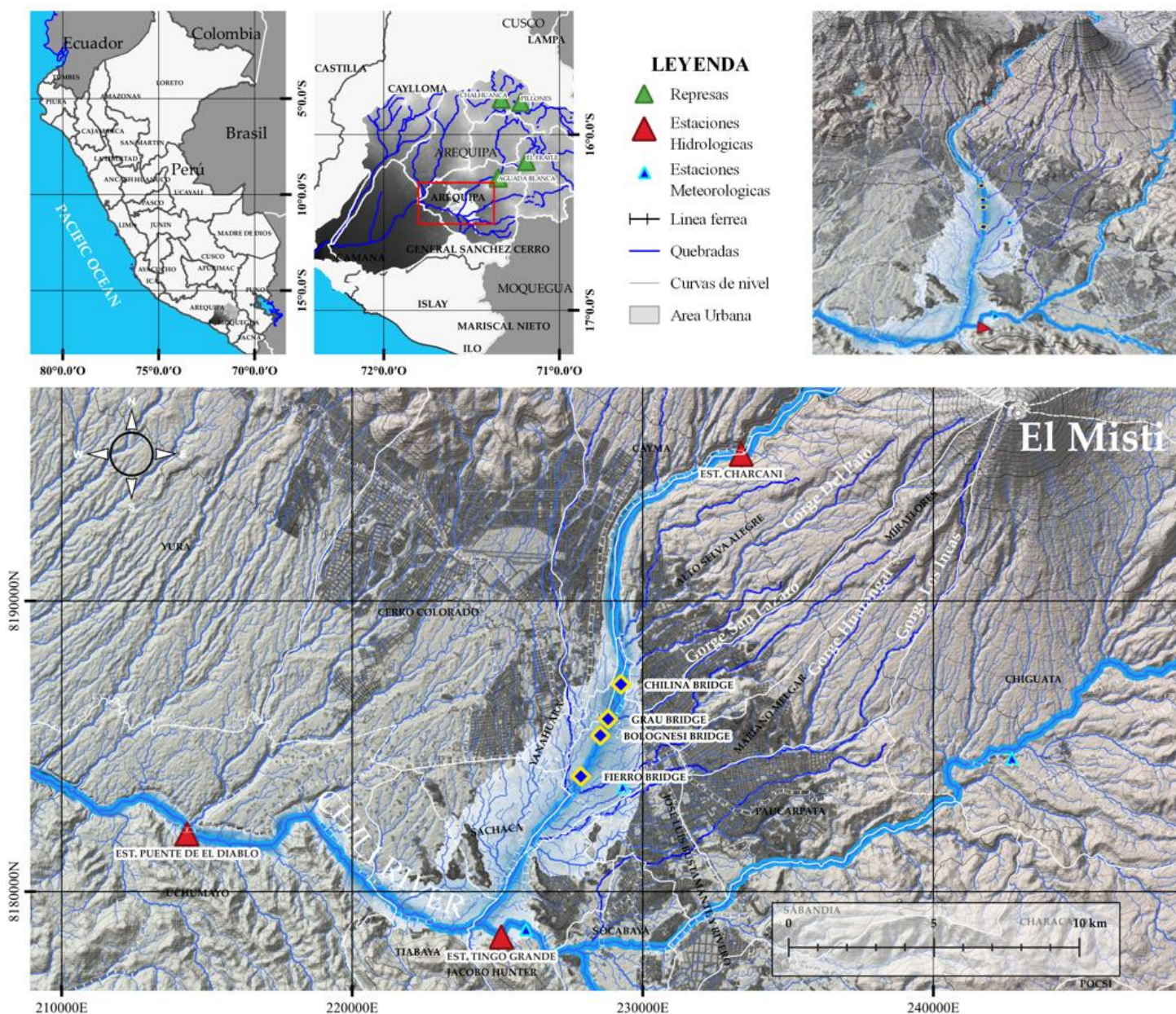
La ciudad de Arequipa se enfrenta a eventos extremos, como precipitaciones de corta duración, pero de alta intensidad, de tal manera que en los últimos 20 años las tormentas extremas generan cada vez mayores y más frecuentes inundaciones debido al cambio climático. Desencadenando en caudales más críticos en las quebradas posteriormente torrenteras que confluyen hacia el río Chili. Estas inundaciones agravan la situación de la población debido a la poca o nula planificación territorial, colapsando puentes y alcantarillas, porque no se cuentan con estudios básicos ante eventos hidrometeorológicos por parte de entidades gubernamentales o tomadores de decisión, y que se ven reflejadas en pérdidas económicas que superan los S/. 350 millones y en más de 80 mil personas afectadas por lluvias torrenciales, como el 08 de febrero del 2013 (**124.5 mm**) (INDECI, 2013).

### 1.2 Descripción del problema

Las quebradas Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas se activan por lluvias extremas, exacerbados por el cambio climático en inundaciones en las principales torrenteras que hacen su ingreso al casco urbano de la ciudad de Arequipa, y que confluyen hacia el río Chili. En consecuencia, las infraestructuras presentes en los cauces naturales y revestidos como puentes y pontones son los más afectados por caudales cada vez más críticos, presentando erosión y socavación en los estribos, incumpliendo con especificaciones técnicas de acuerdo con normas peruanas como el N.A.M.E. (**nivel de aguas máximas extraordinarias**) y profundidades de cimentación.

Según el Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Quilca – Chili (2015), la activación de las torrenteras en ambos márgenes del río Chili provocan inundaciones de alto riesgo al momento de ingresar hacia la ciudad de Arequipa. De igual Manera, las represas El Frayle y Aguada Blanca que protegen a la ciudad de Arequipa regulando las crecidas del río Chili, ante una hipotética rotura de la primera de ellas, produciría la ruptura de la segunda y que generaría un frente de onda que llegaría a la ciudad. En tal sentido, unas 15,000 personas se verían afectadas debido a que el río se incrementaría en aproximadamente 1600 m<sup>3</sup>/s (Méndez, 2015), como se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1**  
*Sistema Regulado de las Represas en la Cuenca Quilca - Chili*



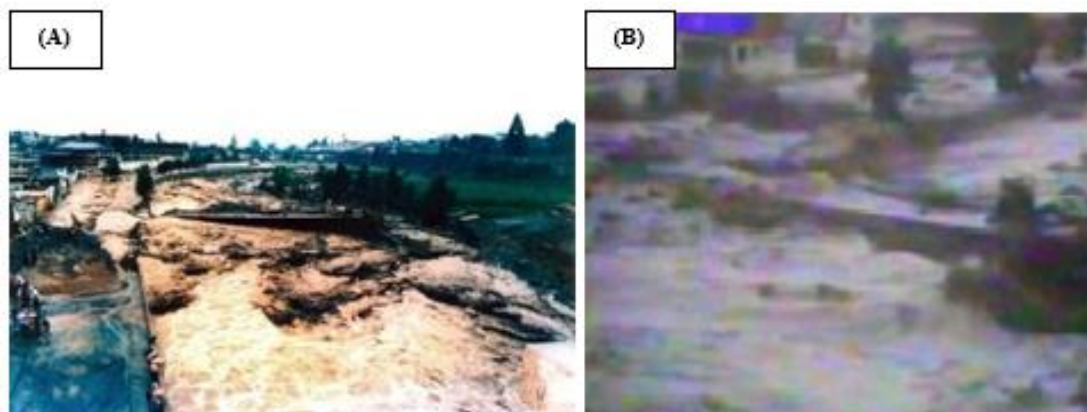
*Nota.* La figura muestra la Cuenca Quilca – Chili y la simulación bidimensional (2D) para un caudal de 1600 m<sup>3</sup>/s del río Chili, bajo el volcán Misti. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se recopiló información de eventos históricos suscitados en la ciudad de Arequipa (1981 - 2023) a través de artículos, periódicos e instituciones como: la Autoridad Nacional del Agua [ANA], SENAMHI y el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET] (2021).

**1989: 08 de febrero**, se produjo una lluvia intensa (**37.7 mm/h**) que ocasiono que todas las torrenteras hicieran su ingreso, causando que el caudal del rio chili se incremente. **1997: 25 de febrero**, debido a lluvias intensas se activaron 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. **2000: 18 de enero**, lluvias intensas causaron inundación de Asentamientos Humanos El Mirador, Pueblo Libre, Los Ángeles y Villa María del Triunfo (**Distrito de Mariano Melgar**). 20 de enero, viviendas inundadas por lluvias (**Distrito de Paucarpata**). **2001: 19 de marzo**, se produjo lluvias intensas que provocaron la activación de quebradas de los Distritos de Cayma, Paucarpata, Socabaya, Alto Selva Alegre y José Luis Bustamante y Rivero. 20 de marzo, inundaciones en Alto Selva Alegre y Arequipa. **2008: 09 de enero**, lluvias intensas en los Distritos de Alto Selva Alegre, Cayma, Hunter y Mariano Melgar. **2012: 01 de enero**, se presentaron lluvias intensas en el Distrito de Alto Selva Alegre. **2013: 08 de febrero**, se activaron las quebradas de la ciudad por lluvias intensas (**124.5 mm**) posteriormente torrenteras como: San Lázaro, Venezuela y Los Incas. Con una duración de 03 horas intensas de precipitación. **2015: 01 de enero**, se produjo la inundación de la ciudad de Arequipa, con una tormenta de 6 horas de lluvia. **2016: 26 de enero**, se activaron las quebradas de los Distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, Alto Selva Alegre. **2017: 13 de enero**, se activaron las quebradas de en Alto Selva Alegre y se afectaron los sectores de Villa Ecológica Independencia y las Gardenias, se afectaron 150 viviendas por los huaicos. **2020: 26 de febrero**, debido a intensas lluvias, se afectaron más de 250 viviendas en 6 distritos por inundaciones. También, se interrumpió el tránsito vial y peatonal del Terminal Terrestre y Terrapuerto por ingreso de flujo de lodo.

**Figura 2**

*Registro del 08 de febrero del 1989*



*Nota.* A), B) Desborde registrado del río Chili, por consecuencia de la construcción del puente Bajo Grau que sirvió como dique, desviando el flujo de agua por el barrio obrero.  
Fuente: Clima y Ecología de Arequipa (2013).

**Figura 3**

*Registro del 08 de febrero del 2012*



*Nota.* A), B) Crecida del río Chili evidencia la vulnerabilidad del Puente Bajo Grau. C), D) lluvias intensas se observan en las principales calles Puente Grau y Bolívar. Fuente: Villalobos (2012).

**Figura 4**

*Registro del 08 de febrero del 2013*



*Nota.* A), B) Calles invadidas de lodo por activación de quebradas posteriormente torrenteras. C), D) Vías destruidas como consecuencias de las inundaciones por acción de la intensa lluvia registrada. Fuente: Diario Correo (2013).

**Figura 5**

*Registro del 01 de enero del 2015*



*Nota.* A) Viviendas fueron dañadas por las lluvias torrenciales. B) Inundación del intercambio vial de la variante de Uchumayo. C) Lluvias intensas ponen al descubierto precariedad de obras viales. Fuente: El Búho (2015).

**Figura 6**

*Registro del 23 y 24 de febrero del 2016*



*Nota.* A) Lluvia de 10 horas afectaron a la ciudad de Arequipa y el colapso de varios transformadores que dejó sin energía eléctrica en varios distritos. B) Las intensas lluvias ocurridas dañaron infraestructuras, vías urbanas e ingreso de flujo de lodo a viviendas asentadas en márgenes de quebradas. Fuente: El Búho (2016).

**Figura 7**

*Registro del 30 de enero y 08 de febrero del 2017*



*Nota.* A) Fuertes lluvias desencadenaron en la activación de la quebrada Paucarpata, produciéndose huaycos. B) Colapso del Puente Concordia en la torrentera del Chulo debido a las fuertes lluvias que afectaron a la ciudad de Arequipa. Fuente: El Búho (2017).

**Figura 8***Registro del 26 de febrero del 2020*

*Nota.* A), B) Precipitaciones de fuerte intensidad se registraron, provocando la activación de quebradas y huaicos que arrastraron vehículos e inundaron viviendas. C), D) Daños significativos en seis distritos, más de 350 viviendas han sido afectadas producto de las inundaciones y desborde de las torrenteras e ingreso de lodo al Terminal Terrestre y Terrapuerto de la ciudad de Arequipa. Fuente: El búho (2020).

Estas lluvias extremas han evidenciado el mal dimensionamiento y destrucción de obras viales existentes como: puentes, pontones y alcantarillas en las torrenteras de la ciudad de Arequipa, como también una planificación urbana inadecuada (El Búho, 2021).

### 1.3 Justificación

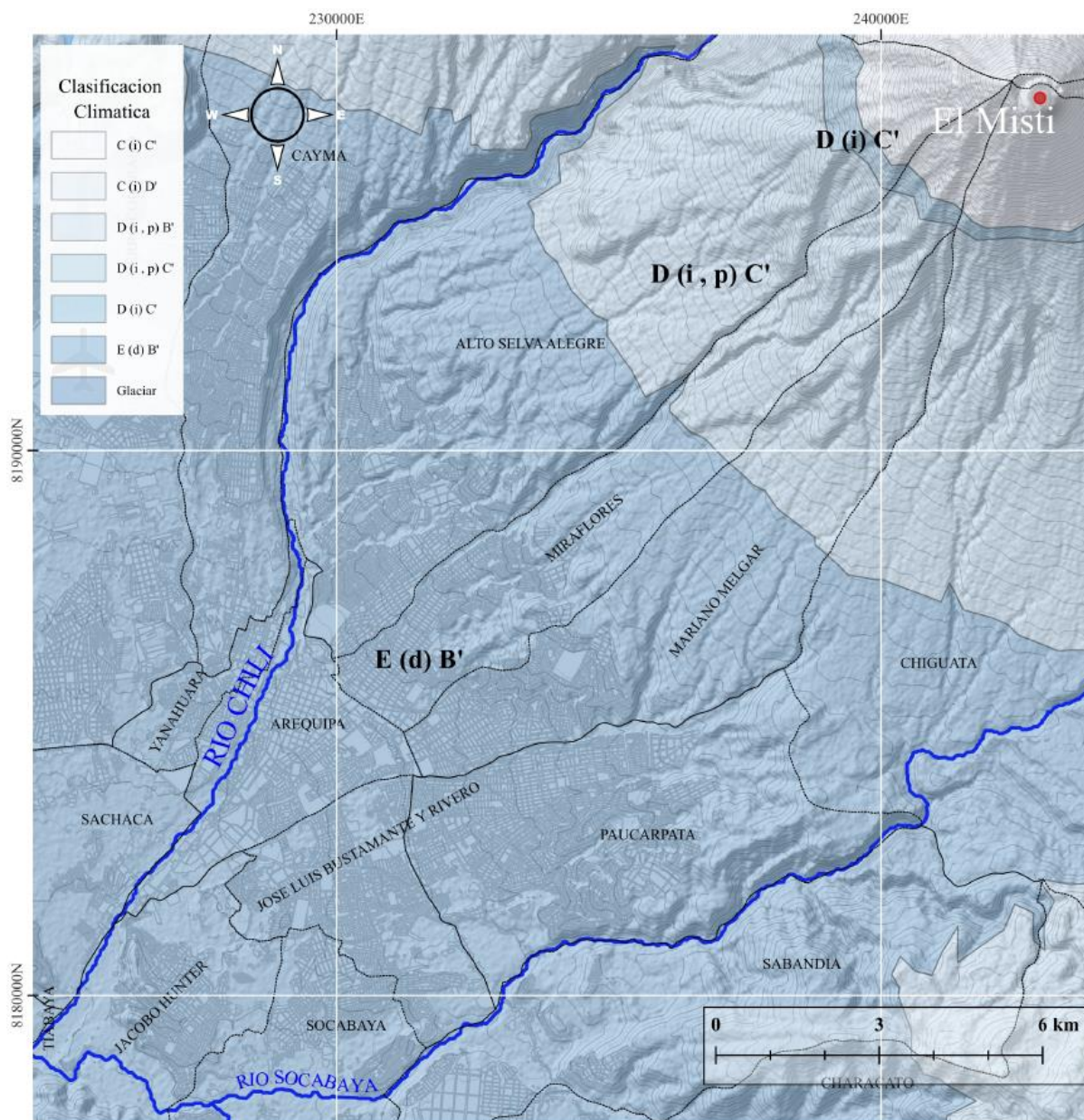
#### 1.3.1 Justificación técnica

Los eventos extremos en la ciudad de Arequipa desencadenan en la activación de las quebradas efímeras por la parte izquierda y derecha del río Chili (Ccanccapa et al., 2023). Vélchez y Sosa (2021) muestran que estas condiciones en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas hacen que esté presente un riesgo alto a inundaciones y erosión fluvial (Figura 9), según el análisis heurístico – cualitativo elaborado por el INGEMMET (2021).



templado **E(d)B'** (Figura 10) (Tabla 1) con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año (SENAMHI, 2021).

**Figura 10**  
*Clasificación Climática en la Ciudad de Arequipa*



*Nota.* Adaptación propia, Climas del Perú: Mapa de Clasificación Climática Nacional.  
Fuente: SENAMHI (2021).

**Tabla 1**  
*Clasificación Climática*

Tipos de Clima	Simbología
<b>Semiárido / Estepa</b>	
Con invierno y primavera seca / frío	D (i, p) C'
Con invierno seco / frío	D (i) C'
<b>Árido / Desierto</b>	
Deficiencia de humedad en todas las estaciones / templado	<b>E (d) B'</b>
<b>Glaciar</b>	<b>Glaciar</b>

*Nota.* La tabla muestra la clasificación climática elaborado por el método de Thornthwaite. Fuente: SENAMHI (2021).

La ANA, como ente rector del sistema nacional de gestión de recursos hídricos, elaboro un estudio denominado Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos (2016), con el objetivo de asegurar la continuidad a través de un desarrollo sostenible y responsable, basándose en criterios e indicadores. Estableciendo que la cuenca Quilca - Chili, tiene una mayor vulnerabilidad, considerado de alta prioridad (**en el primer nivel**) predominando el aspecto hidrológico (**Estrés Hídrico**), como también la presencia de puntos críticos ante eventos extremos (**Inundaciones**) en la ciudad de Arequipa.

### 1.3.2 Justificación económica

Eventos históricos como los años: 1995, 1997, 2001, 2008, 2012, 2013, 2015, 2016 y 2020 (Figuras 2-8) suscitados en época de lluvia (**enero, febrero y marzo**) en la ciudad de Arequipa, representan pérdidas económicas que superan los S/. 350 millones en infraestructuras por lluvias torrenciales y la activación de quebradas (**08 de febrero del 2013**), como consecuencia de no contar con estudios básicos de manera cuantitativa.

### 1.3.3 Justificación social

La presente investigación permite, de una manera inédita, cuantificar las áreas de peligro y de alto riesgo por inundaciones en la ciudad de Arequipa, caracterizando las lluvias extremas registradas por las estaciones La Pampilla, Chiguata y Huasacache (**representativas de la ciudad**) a través de umbrales de precipitación máxima, con el fin de informar a la población sobre la peligrosidad de un fenómeno meteorológico adverso, previsto o en desarrollo, constituyendo así índices climáticos de lluvias extremas, con un método practico y reconocido internacionalmente (Alfaro, 2014). De esta manera, La

metodología aplicada puede servir de base para solucionar problemas similares en otras ciudades, a través de la importancia sobre la gestión de riesgos de desastre frente al cambio climático.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Identificar los riesgos bajo el enfoque del “Project Management Institute” (PMI) en obras viales existentes de las principales torrenteras de la ciudad de Arequipa.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el peligro frente a inundaciones en obras viales existentes de las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas de la ciudad de Arequipa, incluyendo la elaboración de una matriz FODA.
- Determinar la vulnerabilidad frente a inundaciones en obras viales existentes de las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y los Incas de la ciudad de Arequipa y proponer medidas de mitigación e intervención necesarias.
- Analizar cualitativa y cuantitativamente los riesgos de acuerdo con los estándares de la guía del PMBOK del Project Management Institute (PMI).

## 1.5 Análisis operacional de variables

La tabla 2 muestra la variable, tipo, definición y las dimensiones sobre la gestión de riesgos en obras viales existentes frente a eventos extremos (**inundaciones**) para el presente proyecto de investigación.

**Tabla 2**  
*Definición y Operacionalización de las Variables*

Variable	Tipo	Definición Conceptual	Dimensiones
Vulnerabilidad de Obras viales existentes	Dependiente	Planificar las respuestas ante la vulnerabilidad de infraestructuras en las principales torrenteras de la ciudad de Arequipa.	Estado actual de las infraestructuras a través de una matriz multicriterio.
Eventos extremos ( <b>inundaciones</b> )	Independiente	Incertidumbres asociadas frente a una amenaza, para evitar que se vea transformada en peligro.	Técnico Ambiental Social Político

*Nota.* El cuadro muestra las variables que se estudian en la presente investigación.

## 1.6 Hipótesis

El análisis y la caracterización de eventos extremos (**inundaciones**) para diferentes periodos de retorno, permitirá identificar la vulnerabilidad de obras viales existentes, para una adecuada planificación y reducción de riesgos de desastres en las principales torrenteras de la ciudad de Arequipa.





## CAPITULO II

## CAPITULO II METODOLOGIA

### 2.1 Estado del arte

Lamb et al. (2017) resumieron hallazgos en un taller internacional de expertos sobre la evaluación de riesgos en puentes, explorando las incertidumbres sobre la vulnerabilidad, concluyendo el papel crucial y esencial de la evaluación y mantenimiento. Las inundaciones son la causa más frecuente de daños a las infraestructuras en comparación con cualquier otro tipo de peligro natural (Pregolato et al., 2022). Los puentes son componentes de infraestructura crítica en redes de transporte vial y ferroviario (Tubaldi et al., 2022).

Roldan et al. (2022) evaluaron la cuenca Chimba en Antofagasta del desierto de Atacama (**Chile**) por presentar diferentes características geomorfológicas, geológicas y climáticas (**Zona árida**), provocando catástrofes. Realizaron un análisis de frecuencia, determinando la función de mejor ajuste probabilístico (**Gumbel**). Obteniendo caudales máximos de escorrentía líquida y de escombros para diferentes periodos de retorno, utilizando el modelo numérico HEC - RAS. Validando los resultados a través de un análisis morfométrico y sedimentológico, concluyendo que el factor pluviométrico es capaz de provocar deslizamientos en zonas montañosas.

Ettinger et al. (2015) concluyeron que las inundaciones repentinas son comunes en zonas áridas o semiáridas, como la ciudad de Arequipa, presentando lluvias fuertes entre los meses de enero, febrero y marzo. Evidenciando efectos devastadores en términos económicos. Por otra parte, Lousada et al. (2023) realizaron un análisis de susceptibilidad a inundaciones del cauce principal de la cuenca Sao Joao (**Portugal**) por niveles extremos de precipitación, determinando medidas de mitigación frente a inundaciones sobre la cuenca delimitada, a través de ajustes en el coeficiente de rugosidad del cauce (**estrategia efectiva**). El proceso de caracterización de la cuenca y datos geomorfológicos permitieron estimar el caudal máximo, considerando un periodo de retorno de  $T=100$  años, utilizando una distribución Gumbel.

Martínez et al. (2023) evaluaron inundaciones en la ciudad de Santa Clara, Cuba. La investigación desarrolló un modelo de simulación hidráulica unidimensional (**1D**) y bidimensional (**2D**) con el modelo numérico HEC - RAS y métodos basados en SIG. Analizaron 3 escenarios (**10, 50 y 100 años**) de probabilidad para ventos hidrometeorológicos. De esta manera, Concluyeron que los mapas de inundación en áreas

urbanas son una herramienta para los planificadores de gobiernos locales para la evaluación de riesgos y el desarrollo de planes estratégicos de mitigación, con el fin de reducir pérdidas humanas y económicas durante una inundación.

Almeida et al. (2019) realizaron una evaluación de flujo de lodo y escombros por lluvias torrenciales en zonas de montaña caracterizados por el desprendimiento de material de laderas y de cauces en Mirave (**Tacna**). Concluyendo que el modelo utilizado para evaluar el riesgo de desastres por flujos no newtonianos de manera empírica tiene resultados aceptables, de acuerdo con huellas históricas dejadas por el evento del 08 de febrero del 2019. Entre otros procesos, los volcánicos afectan a los puentes viales a través de lahares, que son flujo de agua y material volcánico que discurren por las laderas de un volcán (Daga et al., 2018).

El desplazamiento o remoción de masas rocosas (**fracturadas y/o meteorizadas**), depósitos no consolidados o ambos por efecto de la gravedad, están estrechamente vinculadas a las intensas lluvias, sismos y modificaciones antrópicas (**factores detonantes**), que responden a factores condicionantes o intrínsecos como la pendiente, morfología, cobertura vegetal, etc. (Vílchez y Sosa, 2021).

Thouret et al. (2022) analizaron la quebrada San Lázaro y Huarangal por movimientos rápidos de masa y lahares a través de modelos numéricos en hidráulica (**Tatan2F, VolcFlow y Flo-2D**), determinando áreas de posible afectación por desborde e inundación, con el objetivo de proporcionar información a los tomadores de decisión y emprender proyectos de modernización y mejorar la planificación ante riesgos urbanos.

Estudios previos en la ciudad de Arequipa, como el de Núñez y Peñalva (2016), mostraron un análisis de gestión de riesgo de desastre y adaptación al cambio climático en la zona de Cono Norte de la ciudad de Arequipa, evaluando componentes que contribuyen a la vulnerabilidad en base a criterios como el económico, físico, técnico, social, cultural e institucional que presenta la población de Cono Norte ante riesgos recurrentes de inundaciones cada año.

Arenas (2019) realiza un plan de gestión para mitigación de riesgo por inundación en la torrentera Chullo (**margen derecha del río Chili**), ante la ocurrencia de fenómenos pluviales e intensos que han ocurrido en los últimos años y como consecuencia dejaron pérdidas materiales derivados de infraestructuras públicas y privadas a través de una metodología observacional y descriptiva (**análisis y síntesis**), con la finalidad de proponer

ejes estratégicos. Ancco (2020) realiza un análisis de correlación entre la calidad en la gestión y la sostenibilidad de proyectos de inversión frente al cambio climático de la periferia de la ciudad de Arequipa. El estudio formula que la generación de condiciones para el crecimiento urbano sostenible, reducción de la vulnerabilidad e incremento de la resiliencia, es realizable bajo un enfoque crítico, reflexivo y más allá de la mejora continua. Cruz (2021) desarrolla un problema que se agrava por el cambio climático, como las fuertes precipitaciones que desencadenan en inundaciones en la ciudad de Arequipa, que cada vez son más frecuentes, con la finalidad de realizar un análisis de vulnerabilidad de la torrentera Huarangal, viabilizando su desarrollo sostenible.

Gonzales (2022) proporciono una visión holística sobre el riesgo de las torrenteras de la ciudad de Arequipa, desde un punto de vista físico, ambiental, socioeconómico. Un estudio de caso de la torrentera Miraflores – Venezuela, a través de un modelo de gestión y recuperación del espacio público urbano ambiental.

Por consiguiente, existe una brecha del conocimiento respecto a la evaluación hidrológica e hidráulica, de manera técnica en obras viales existentes de cauces de quebradas posteriormente torrenteras, que incluyan modelos más representativos, como los 1D/2D.

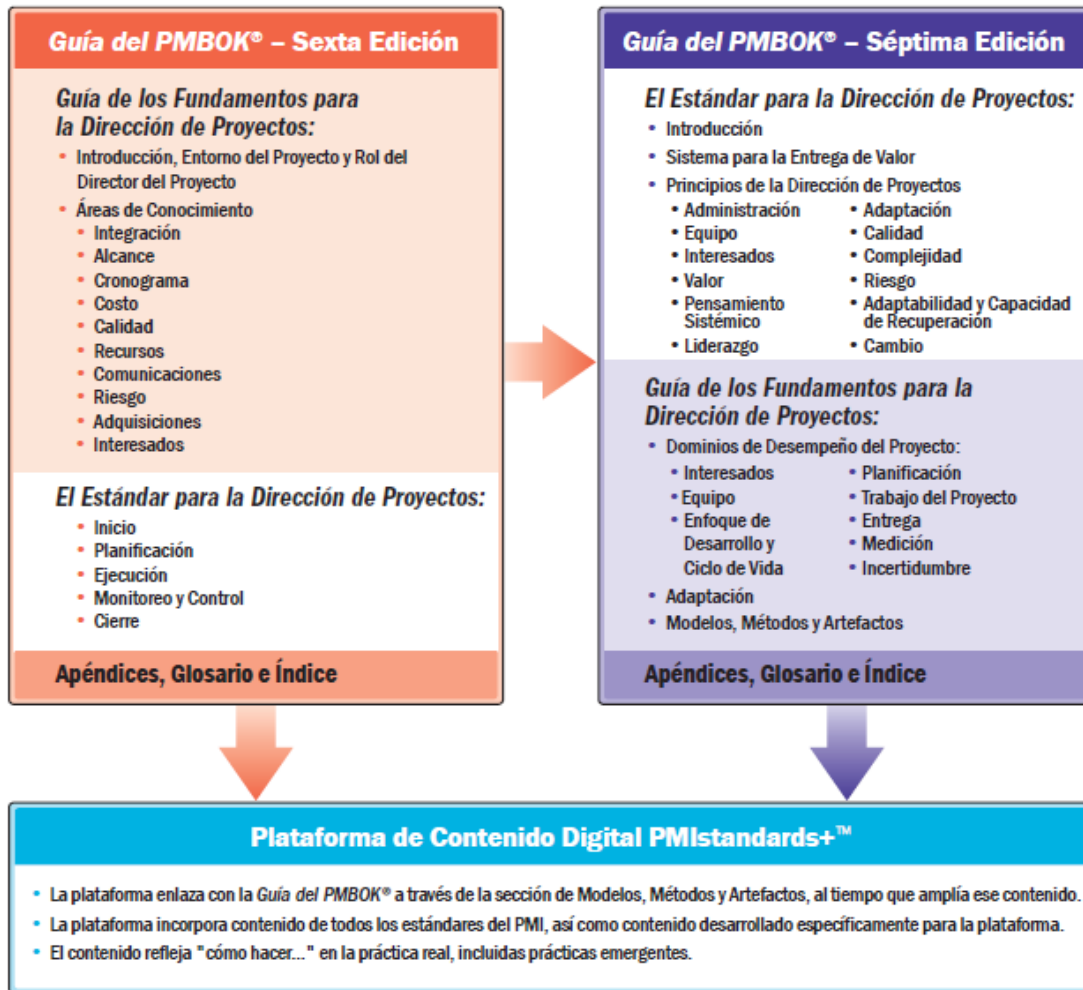
Esta investigación contribuye a cerrar dicha brecha mediante un análisis exhaustivo de las quebradas Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas que justamente incluye modelos en hidrología e hidráulica con HEC - HMS y HEC - RAS respectivamente.

## 2.2 Guía de Proyectos

La Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (**PMBOK**) ha evolucionado con el tiempo y los aspectos fundamentales sobre la gestión de proyectos. En su séptima edición, las buenas prácticas a través de procesos cambian a principios con el fin de apoyar la dirección eficaz de los proyectos y se centran más en los resultados previstos que en los entregables (Figura 11).

Figura 11

Guía del PMBOK: Sexta Edición - Séptima Edición



*Nota.* La figura muestra la comparación de la Sexta Edición a la Séptima Edición de la Guía del PMBOK. Fuente: PMI (2021).

## 2.3 Principios de la dirección de proyectos

Según la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK, 2021), los principios están orientados a reconocer, evaluar y responder a las interacciones del sistema u optimizar las respuestas a los riesgos, estos principios son: (1) Administración, (2) Equipo, (3) Interesados, (4) Valor, (5) Pensamiento sistémico, (6) Liderazgo, (7) Adaptación, (8) Calidad, (9) Complejidad, (10) Riesgo, (11) Adaptabilidad y Capacidad de recuperación, y (12) Cambio.

### 2.3.1 Optimizar las repuestas a los riesgos

Según la Guía del PMBOK (2021) optimizar las respuestas a los riesgos es evaluar continuamente la exposición al riesgo, tanto de oportunidades como de amenazas, con el fin de maximizar los impactos positivos y minimizar los impactos negativos para el

proyecto y sus resultados. De esta manera, es de vital importancia para una gestión de riesgos de desastres en la ciudad de Arequipa, identificar y caracterizar las inundaciones en magnitud y frecuencia. Conocer el comportamiento de las cuencas y mitigar el impacto por medio de estudios básicos, para ello se realizaron estudios hidrológicos, topográficos, geotécnicos e hidráulicos en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas.

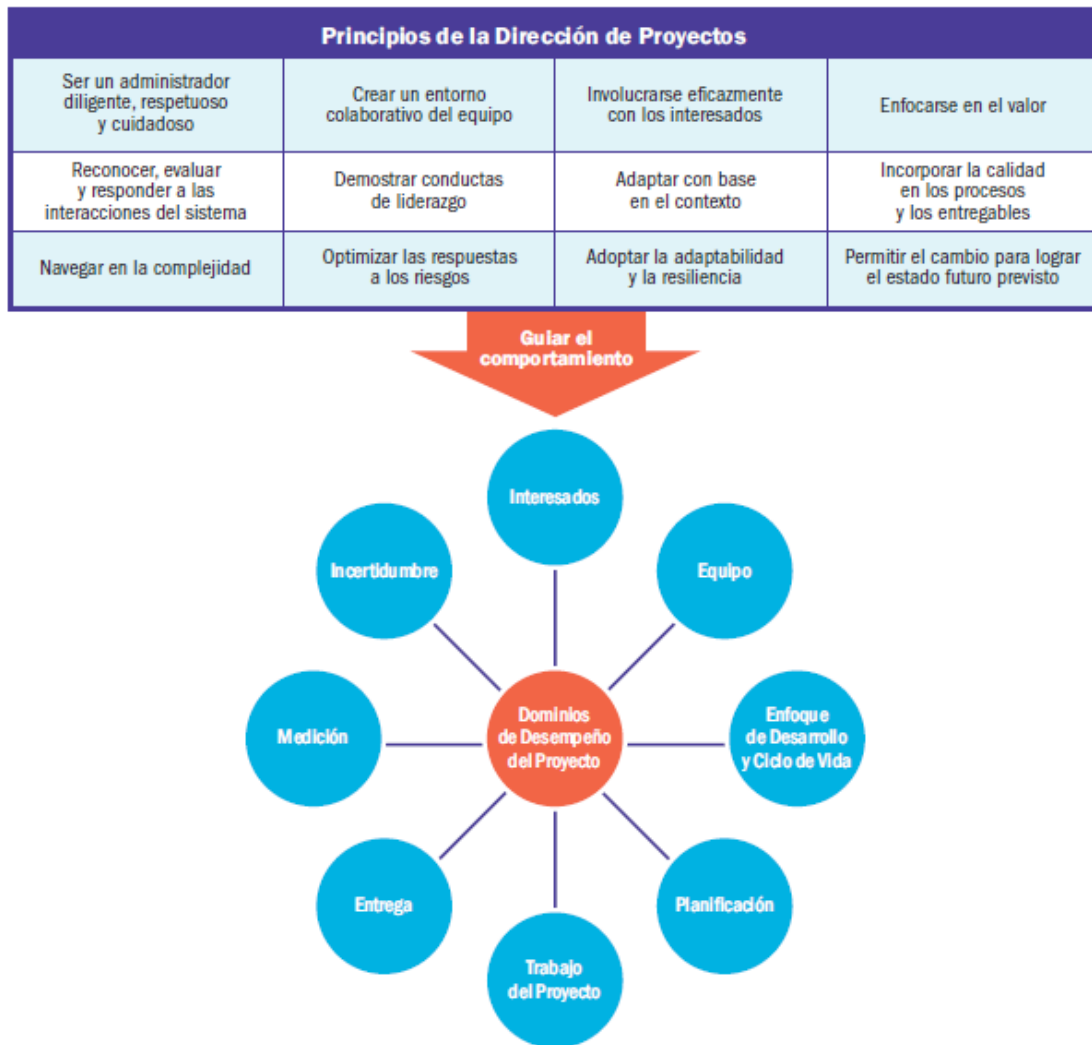
### **2.3.2 Adoptar la adaptabilidad y la resiliencia**

Según la Guía del PMBOK (2021) adoptar la adaptabilidad y resiliencia es construir enfoques de la organización y del equipo de proyecto para ayudar al mismo a acomodar el cambio, recuperarse de los reveses y avanzar en el trabajo del proyecto. En consecuencia, una vez identificada el peligro, riesgo y vulnerabilidad por inundaciones en obras viales existentes (**puentes y/o pontones**) se deben tomar medidas para mitigar el impacto y sobre todo enfoques estructurales y no estructurales, formando la resiliencia en la ciudad de Arequipa por eventos extremos debido al cambio climático.

### **2.3.3 Dominios de desempeño del proyecto**

En su séptima edición, la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (PMBOK, 2021), se incluye también ocho dominios o campos de conocimiento que se deben gestionar en un proyecto: (1) Interesados, (2) Equipo, (3) Enfoque de desarrollo y ciclo de vida, (4) Planificación, (5) Trabajo del proyecto, (6) Entrega, (7) Métricas e (8) Incertidumbre. De esta manera, los dominios de desempeño funcionan como un sistema integrado (Figura 12).

**Figura 12**  
*Dominios de Desempeño del Proyecto*



*Nota.* La figura muestra la relación entre los principios de la dirección de proyectos y los dominios de desempeño del proyecto. Fuente: PMI (2021).

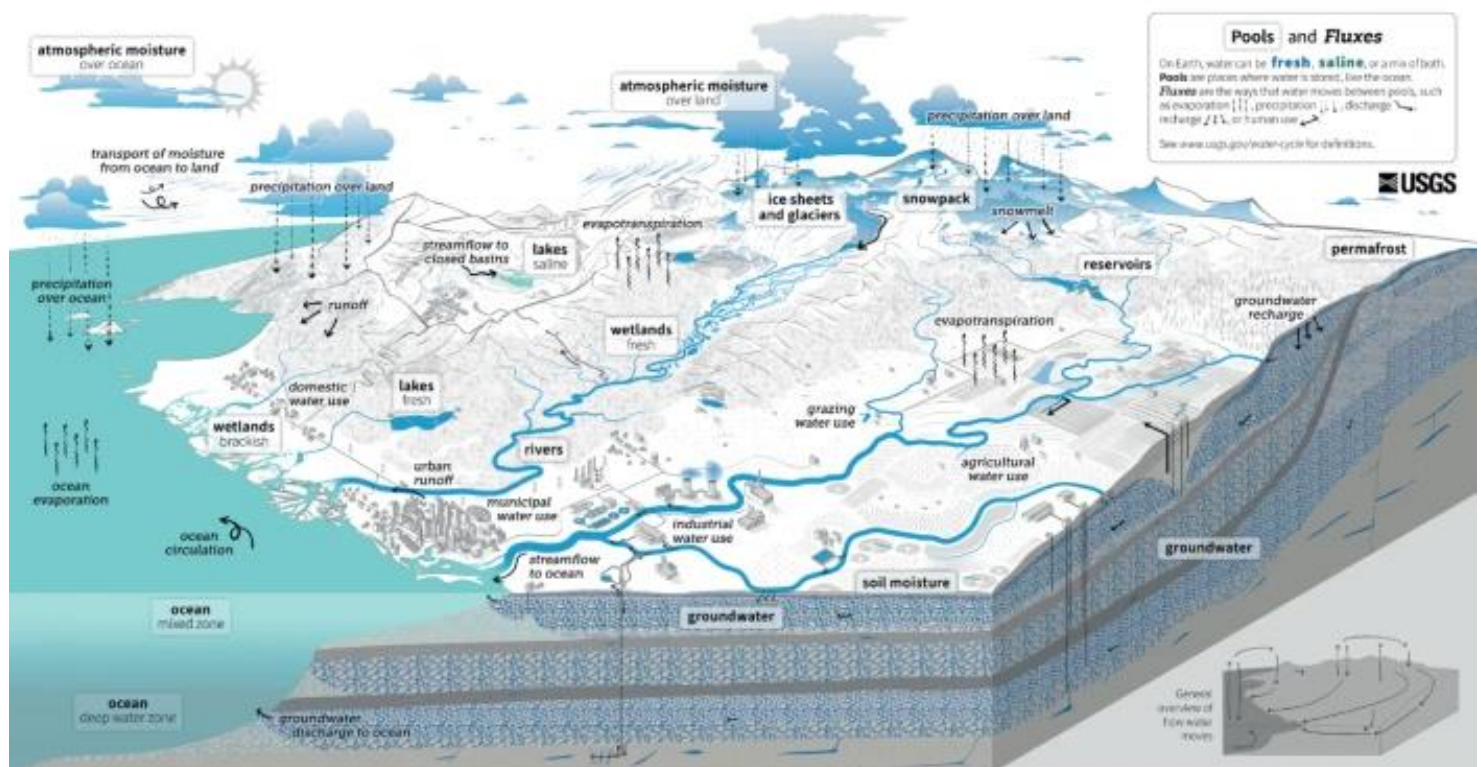
## 2.4 Variable independiente

### 2.4.1 Eventos extremos

¿Como el cambio climático altera el ciclo del agua? (2023), menciona que en las últimas décadas se plantean dos marcos hipotéticos para tendencias en la disponibilidad del agua bajo el cambio climático: que lo húmedo se volverá más húmedo y lo seco se volverá más seco o se producirá una aridificación global. Ante ello es importante explicar el ciclo del agua (Figura 13), ya que el agua se almacena y se mueve naturalmente a través de sus depósitos, es decir, la atmosfera, la superficie de la tierra y el subsuelo (USGS, 2022).

Figura 13

El Ciclo del Agua



Nota. La figura muestra el ciclo del agua describiendo dónde se encuentra el agua en la tierra y cómo se mueve. Fuente: U.S. Geological Survey (2022).

La interferencia antropogénica en el sistema climático se manifiesta cada vez más como intensidades y probabilidades alteradas de fenómenos meteorológicos extremos (Seneviratne et al., 2021) y esto se evidencia en la ciudad de Arequipa, a través de eventos históricos (Figuras 2-8) que cada vez son más frecuentes. De esta manera, se necesita realizar estudios por eventos extremos, como estudios de caso, debido a las características del evento y la solidez de la evidencia misma (Clarke et al., 2023).

*La ciudad de Arequipa, cada cierto tiempo sufre de inundaciones en las márgenes de los cauces de las torrenteras que confluyen hacia el río Chili (Ccanccapa et al., 2023), colapsando alcantarillas, puentes viales y peatonales asentadas en las partes bajas del volcán Misti, ya que se producen precipitaciones de corta duración, pero de alta intensidad. De tal manera que, en los últimos 20 años las tormentas extremas se hacen cada vez más frecuentes debido al cambio climático, desencadenando en caudales cada vez más críticos hacia las torrenteras (Ccanccapa et al., 2024).*

## 2.5 Hidrología

### 2.5.1 Umbrales de precipitación máxima

Los umbrales son indicadores que van en relación con la peligrosidad ya sea de precipitación, nivel del agua o caudal. Para una caracterización de lluvias extremas (Tabla 3) un criterio común es establecer umbrales de precipitación como índices climáticos. Para la determinación de umbrales de precipitación máxima para este estudio, se siguió de acuerdo con el procedimiento descrito por Alfaro (2014), el cual es utilizado por norma técnica en el SENAMHI. La base de información necesaria para estimar los umbrales son la de precipitación diaria de una estación climatológica de largo registro, para este estudio se utilizó la estación La Pampilla y Chiguata, también se menciona que la utilización de estos índices se justifica porque hay más información disponible de acumulados de precipitación (**lluvia diaria**) en 24 horas que intensidades de precipitación.

**Tabla 3**  
*Caracterización de Extremos de Precipitación*

Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
RR/día > 99p	Extremadamente Lluvioso
95p < RR/día ≤ 99p	Muy Lluvioso
90p < RR/día ≤ 95p	Lluvioso
75p < RR/día ≤ 90p	Moderadamente Lluvioso

\*RR/día es la cantidad acumulada de precipitación en 24 horas.

\*99p, 95p, 90p, 75p, son los percentiles expresados en %.

Para el cálculo de los percentiles, el procedimiento que se debe tener en cuenta es lo siguiente: (i) Excluir del cálculo el valor más alto de la serie. (ii) Cuando en la serie histórica se observan “Outliers” es necesario verificar su impacto en los parámetros estadísticos de la serie debido a su presencia. (iii) Excluir del cálculo todos los días con trazas. (iv) Considerar como día con precipitación cuando  $RR > 0.1$  mm. (v) Si se trabaja con Excel usar la función PERCENTIL.INC. (vi) En lo posible utilizar el periodo de referencia establecido por SENAMHI para la caracterización climática (1981 – 2010), si no es así, referir explícitamente el periodo analizado. (vii) La longitud de la serie es muy importante ya que ello afecta la determinación de los umbrales, por ello se recomienda tomar como referencia aquellas estaciones donde los datos empiecen en 1981. (viii) La longitud de la serie ideal es la establecida para la caracterización climática, si no fuera posible hacer esto, se recomienda que explícitamente se advierta al lector, ser cuidadosos con el uso de estos resultados y no considerarlos como umbrales climáticos, si no umbrales deducidos de la muestra utilizada (**se sugiere muestras no menores a 10 años**).



La tabla 4 muestra la ubicación geográfica y la altitud de las estaciones de la ciudad de Arequipa utilizadas en el estudio.

**Tabla 4***Estaciones Meteorológicas*

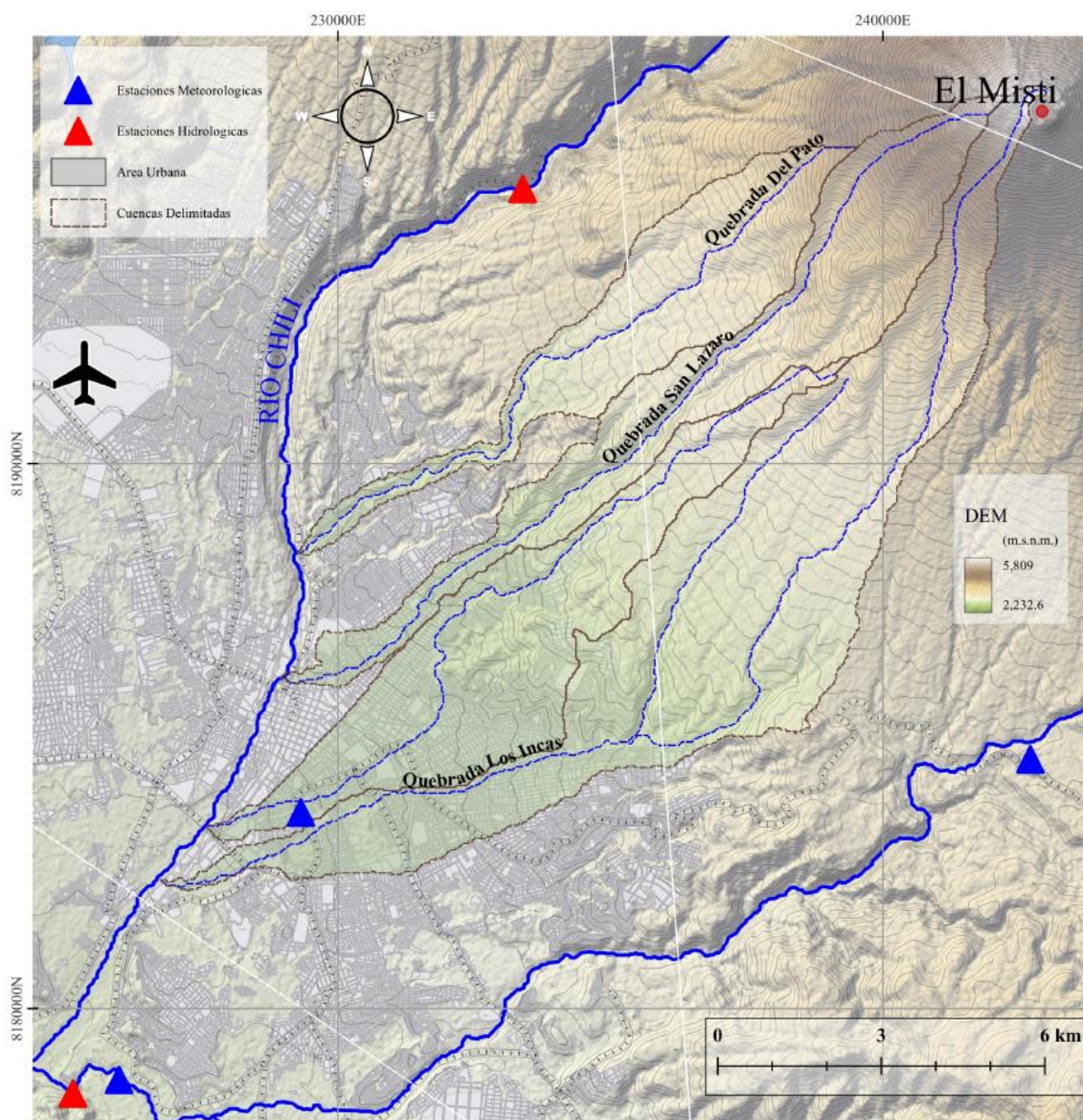
<b>Estaciones Meteorológicas</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Altitud (m.s.n.m.)</b>
Estación La Pampilla	-71.534	-16.413	2326
Estación Chiguata	-71.409	-16.406	2902
Estación Huasacache	-71.566	-16.458	2200

*Nota.* La tabla muestra la ubicación geográfica de las estaciones de estudio.

Thouret et al. (2013) proporcionaron el mapeo y la cartografía como fuente de apoyo para el peligro y riesgo frente a inundaciones repentinas y lahares (**flujos de lodo volcánico**) de las quebradas San Lázaro y Huarangal a través de la morfología de los cauces. Sin embargo, Ccancapa et al. (2024) mencionan que se requiere de un análisis precipitación – escorrentía para obtener caudales máximos a través de un modelo hidrológico en base a datos observados (**estaciones meteorológicas**). La delimitación de las cuencas se realizó siguiendo las buenas prácticas desarrolladas en Qgis, por Der Kwats y Menke (2019), determinando las características fisiográficas y geomorfológicas por cada quebrada de estudio en base al modelo digital de elevación FAB-DEM, a resolución de 30 m, ya que los últimos datos de elevación global contienen aspectos forestales y de construcción que limitan su utilidad para aplicaciones que requieren alturas precisas del terreno, en particular la simulación de inundaciones (Hawker et al., 2022).

De esta manera se utilizó FAB-DEM, para la delimitación de cuencas urbanas (Figura 15) de la ciudad de Arequipa.

**Figura 15**  
*Cuencas Delimitadas*



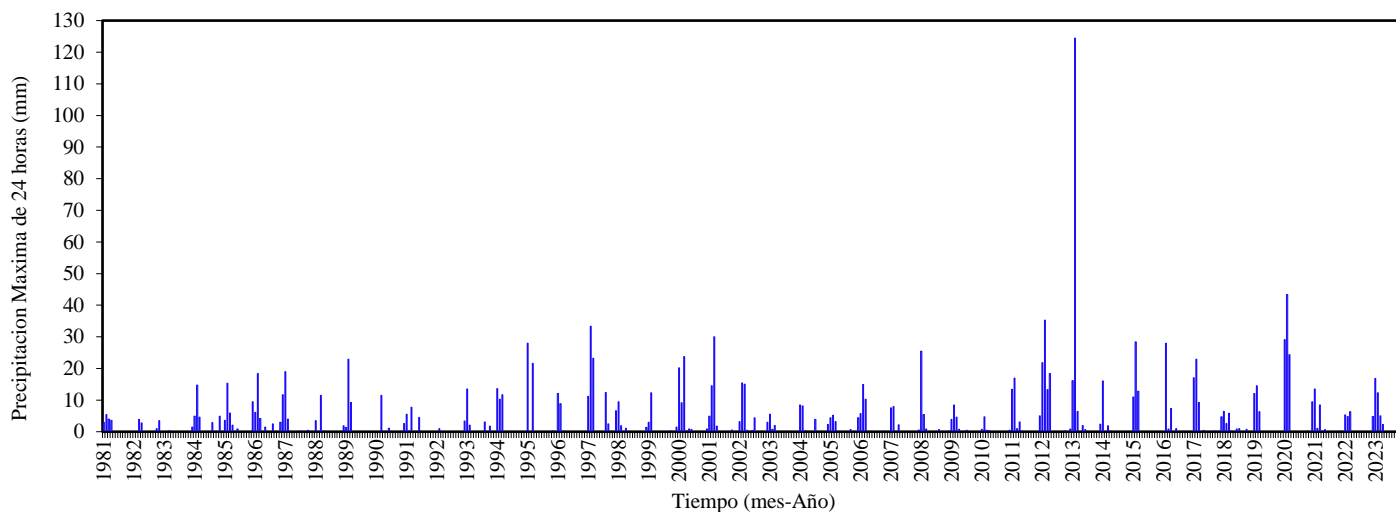
*Nota.* La figura muestra la delimitación de las cuencas Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas en Qgis. Fuente: Elaboración propia.

El hidrograma liquido se obtiene a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas de las estaciones: La Pampilla y Chiguata (Figura 16-17), con un registro de 43 años (1981 - 2023), descartando la estación Huasacache porque no presenta un área de influencia sobre las torrenteras, realizado por el método de los polígonos de Thiessen o diagramas de Voronoi (Figura 15).

Se recopiló información de precipitación máxima de 24 horas del SENAMHI (Figura 16-17) para conocer el comportamiento de las lluvias diarias a través de eventos históricos.

**Figura 16**

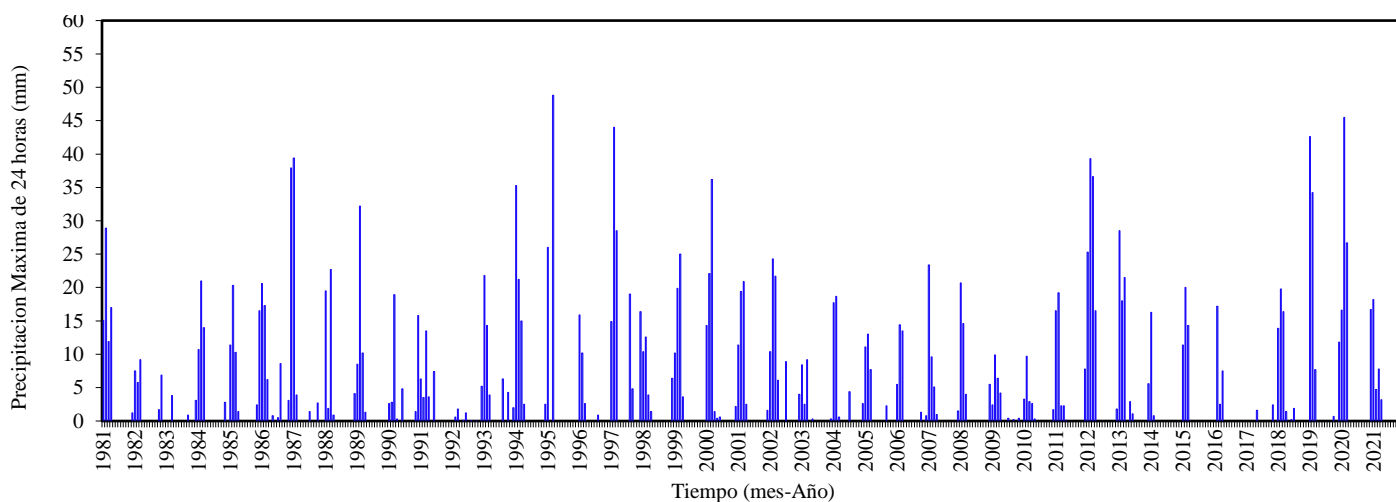
*Precipitación Máxima de 24 horas - Estación La Pampilla (1981-2023)*



*Nota.* La figura 16 muestra el histograma de precipitaciones máximas de la estación La Pampilla.

**Figura 17**

*Precipitación Máxima de 24 horas - Estación Chiguata (1981-2021)*



*Nota.* La figura 17 muestra el histograma de precipitaciones máximas de la estación Chiguata.

Se delimito las principales quebradas de la ciudad de Arequipa hasta la confluencia del rio Chili, obteniendo parámetros generales como: áreas de drenaje (**A**), perímetro (**P**), diferencias altitudinales (**DA**) y parámetros de forma como: índice de gravelius (**Cg**), y longitudes de rectángulo equivalentes (**Lre**, **lre**) (Tabla 5)

**Tabla 5**  
*Parámetros Morfológicos – Parte I*

Quebrada	Parámetros generales			Parámetros de forma		
	A [Km <sup>2</sup> ]	P [Km]	DA [m]	Cg [-]	Lre [Km]	lre [Km]
Del Pato	15.0	36.8	1931.5	2.7	17.6	0.9
San Lázaro	20.2	50.1	3446.5	3.1	24.2	0.8
Venezuela	21.5	43.4	1281.0	2.6	20.7	1.0
Los Incas	41.3	39.1	3576.4	2.9	31.5	1.4

*Nota.* La tabla muestra los parámetros generales y de forma de las cuencas delimitadas.

En cuanto a los parámetros de relieve, se determinaron la longitud del cauce principal (**L**), pendiente de la cuenca (**j**) y la pendiente del cauce principal (**J**), como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6**  
*parámetros Morfológicos – Parte II*

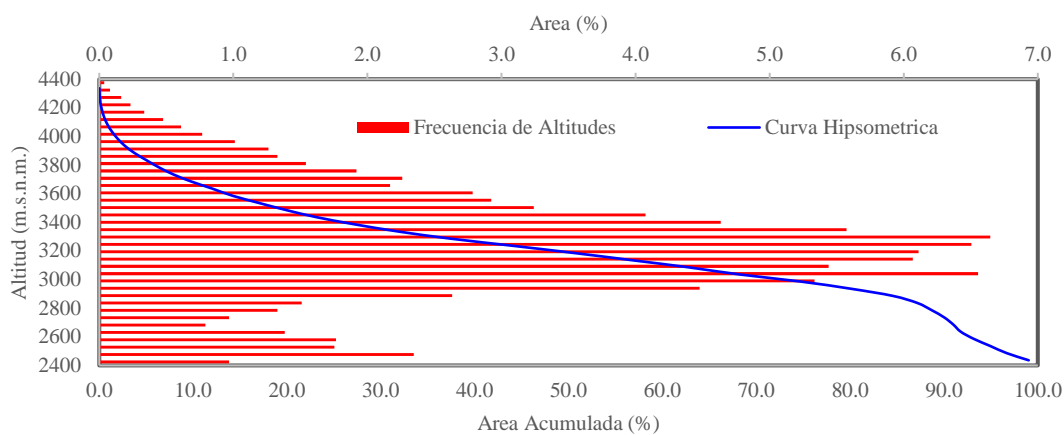
Quebrada	Parámetros de Relieve			Índice Hipsométrico	
	L [Km]	j [%]	J [m/m]	Curva [-]	Altitud Media [m]
Del Pato	15.0	24.1	0.13	B	3199.6
San Lázaro	19.1	37.7	0.18	B	2420.0
Venezuela	17.6	13.6	0.07	B	2633.6
Los Incas	27.1	19.4	0.13	B	3046.3

*Nota.* La tabla muestra los parámetros de relieve e índice hipsométrico de las cuencas.

Se evaluó la relación del área de drenaje con su altitud a través de un índice hipsométrico (Tabla 6) por cada cuenca de estudio (Figuras 18-21).

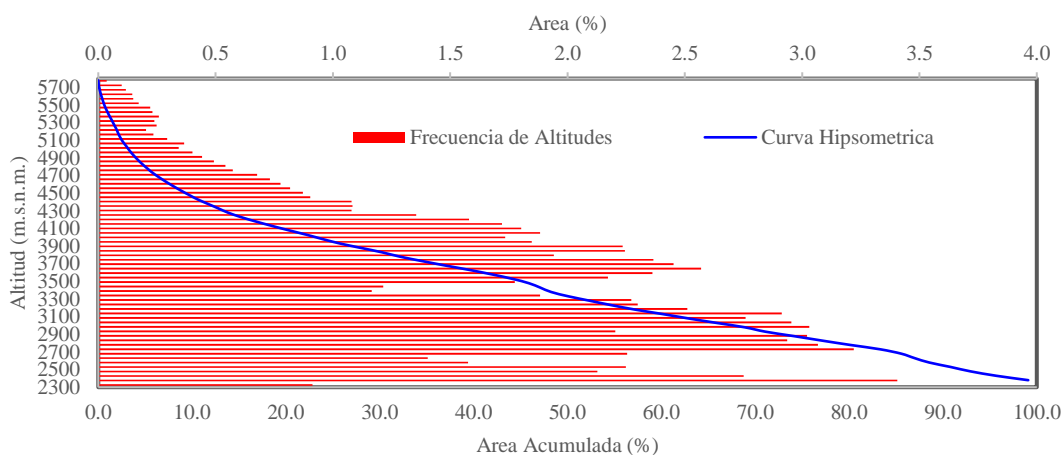
**Figura 18**

*Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Del Pato*



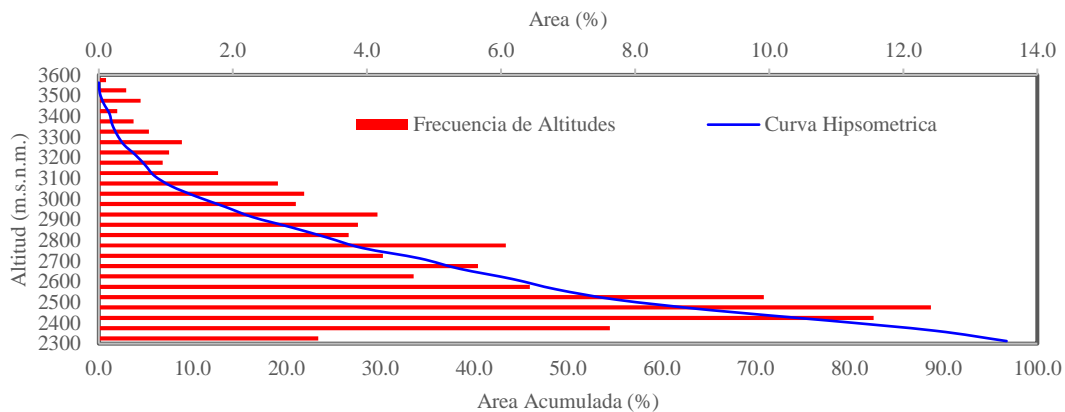
**Figura 19**

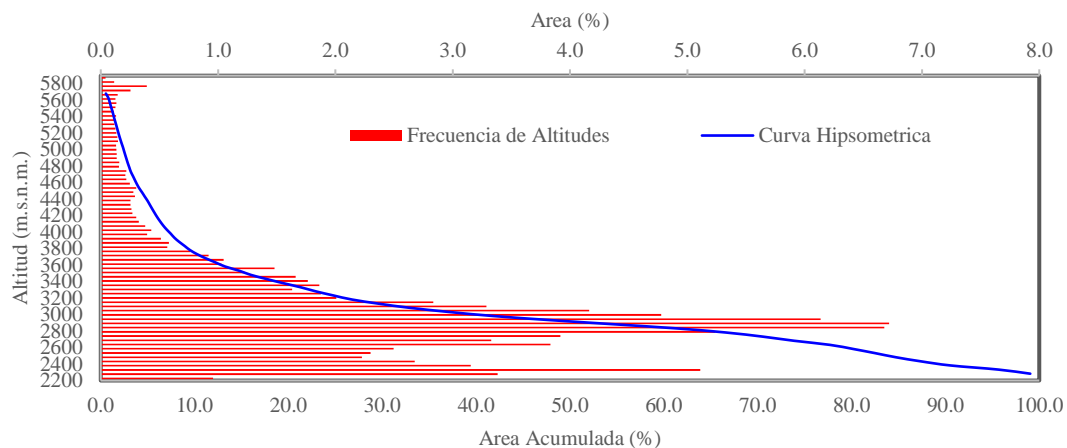
*Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada San Lázaro*



**Figura 20**

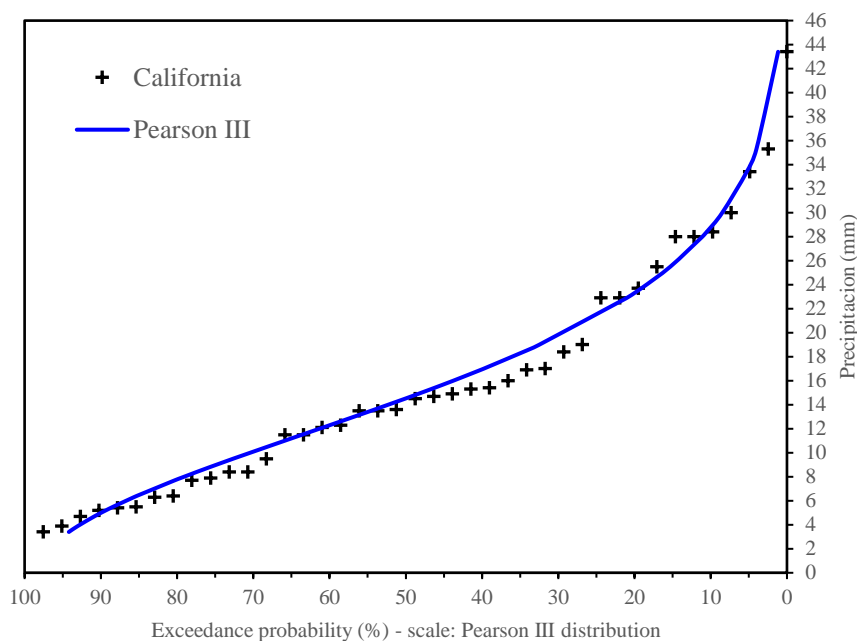
*Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Venezuela*



**Figura 21***Curva Hipsométrica y Frecuencia de Altitudes-Quebrada Los Incas*

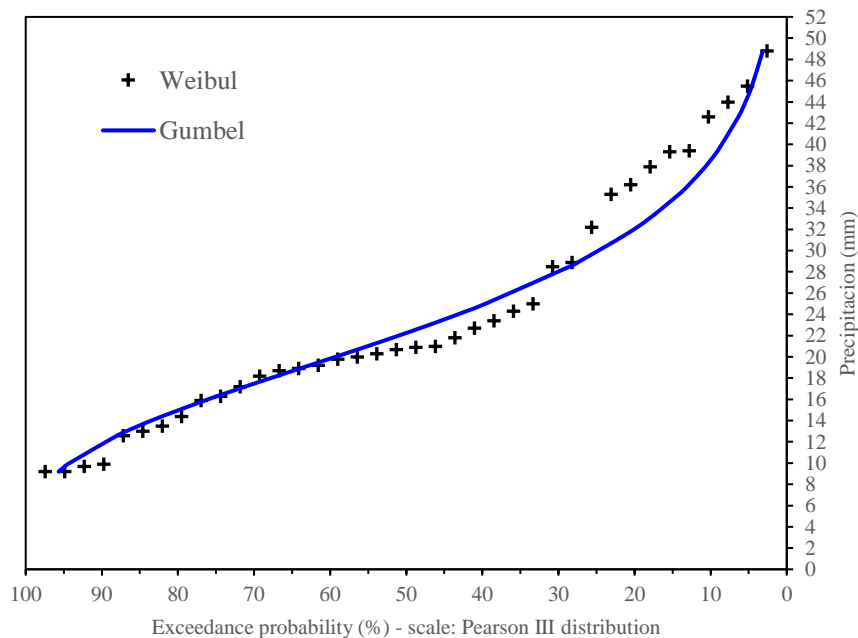
Luego, se realizó el análisis de frecuencia según el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje [MHHYD] del Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], para ocho funciones de distribución de probabilidad teóricas (**Normal, Log Normal II/III Parámetros, Gumbel, Log Gumbel, Gamma II/III Parámetros y Log Pearson tipo III**), se tuvo en cuenta la teoría de valores extremos para caracterizar los eventos de precipitación extrema (Endara, 2017), con siete funciones empíricas de probabilidad (**Hazen, California, Weibull, Chegodayev, Blom, Gringorten y Cunnane**) para determinar el mejor ajuste a la serie de caudales máximos a través de la prueba no paramétrica de bondad y ajuste Smirnov - Kolmogorov con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ . La función empírica California, Weibull y la teórica Pearson III, Gumbel son las que mejor se ajustaron. Las Figuras 22 y 23 muestran el análisis de frecuencia y el ajuste.

**Figura 22**  
*Analisis de Frecuencia - Estacion La Pampilla*



*Nota.* La figura muestra la función Pearson III que mejor se ajusta a los datos de precipitación máxima, con la función de probabilidad de excedencia empírica California.  
Fuente: Elaboración Propia.

**Figura 23**  
*Analisis de Frecuencia - Estacion Chiguata*



*Nota.* La figura muestra la función Gumbel que mejor se ajusta a los datos de precipitación máxima, con la función de probabilidad de excedencia empírica Weibul.  
Fuente: Elaboración Propia.

Para determinar el hidrograma líquido, se utilizó el modelo hidrológico del HEC - HMS, con la metodología del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1986) para conocer la lluvia neta con el número de curva (SCS, 1972) y el método de transformación precipitación - escorrentía por el hidrograma unitario (SCS, 1972).

**Tabla 7**  
*Parámetros de las Quebradas – HEC - HMS*

Quebrada	Parámetros		
	Pmax [mm]	CN [-]	Tc [min]
Del Pato	54.6	81.8	70.5
San Lázaro	60.8	85.0	74.6
Venezuela	55.8	85.7	99.4
Los Incas	63.0	83.8	110.2

*Nota.* (**Pmax**) representa la precipitación para un periodo de retorno de T=100 años.

Para el presente estudio se utilizó la distribución de tormenta SCS - Tipo II que calcula los hidrogramas de avenida para precipitación de 24 horas y la distribución Tipo II por tratarse de cuencas altoandinas, los parámetros de entrada al modelo HEC - HMS son las que se muestra en la Tabla 7 y los resultados en la Tabla 8.

**Tabla 8**  
*Caudales Máximos Líquidos*

Cuenca	Caudal (m <sup>3</sup> /s) para diferentes periodos de retorno (años)				
	TR=5	TR=25	TR=50	TR=100	TR=200
Del Pato	7.0	24.9	34.7	45.3	56.3
San Lázaro	15.9	46.8	61.8	77.4	93.5
Venezuela	10.0	23.9	31.0	38.6	46.5
Los Incas	22.2	69.6	93.1	117.7	143.1

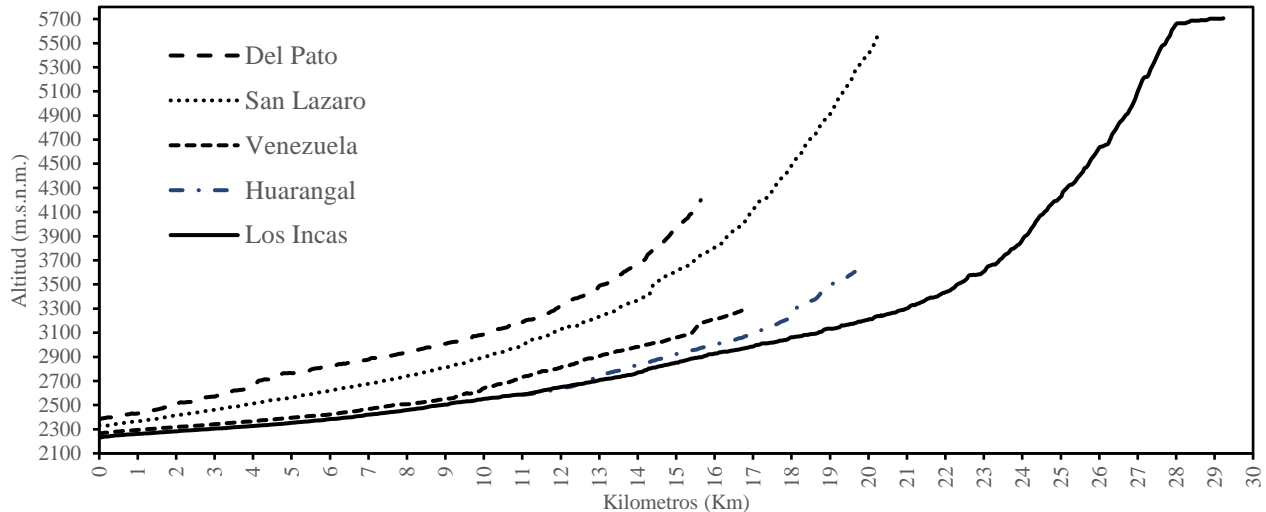
*Nota.* La tabla muestra caudales líquidos estimados.

Los aspectos topográficos tienen un factor importante en la producción de sedimentos como la pendiente, en tal sentido se determinó el perfil longitudinal de las quebradas posteriormente torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela, Huarangal y Los Incas, que se encuentran a la margen izquierda del río Chili y que confluye hacia él, presentando una pendiente del cauce principal que va desde los 7 a 18.0 % (Tabla 6), lo que sugiere una alta capacidad de transporte ante máximas avenidas. Se evidencio también, que la principal fuente de sedimentos está localizada en la parte media – alta de las quebradas y que corresponden a depósitos sedimentarios aluviales antiguos y el

principal modo de erosión es el de tipo superficial, cárcavas y fluvial del cauce principal (Figura 24).

**Figura 24**

*Perfil Longitudinal de Quebradas que Confluyen hacia el Rio Chili*



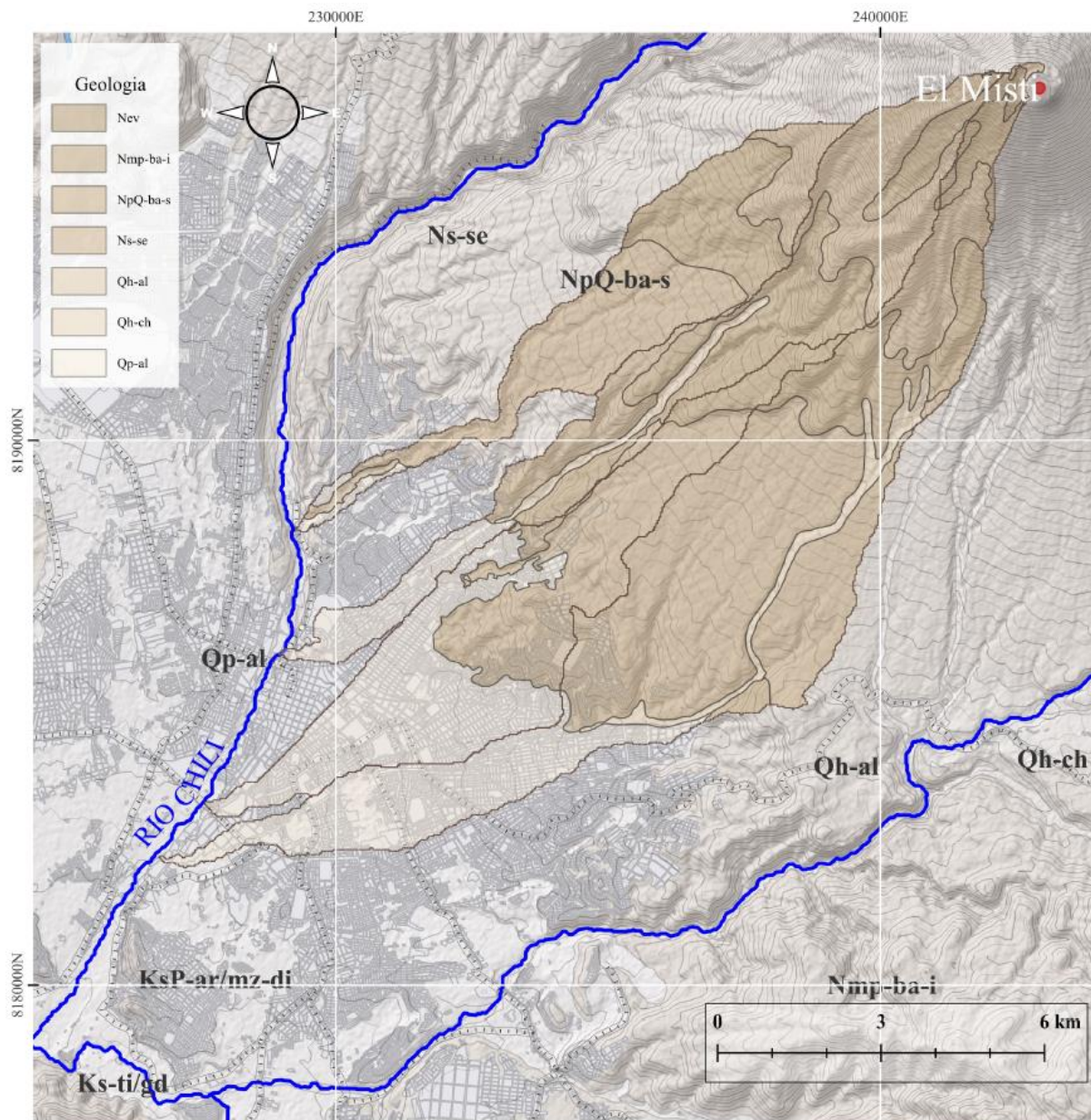
*Nota.* La figura muestra el perfil longitudinal de las cuencas Del Pato, San Lázaro, Venezuela, Huarangal y Los Incas. Fuente: Elaboración Propia.

Suarez (2001) muestra perfiles longitudinales de canales para diferentes tipos de flujo (**flujos de lodo, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos**), puede verse la relación directa entre la pendiente y la longitud del cauce principal para eventos dados.

## 2.6 Geología

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente [MINAM] (2018), la ciudad de Arequipa presenta al noreste coladas volcánicas provenientes del Chachani y Misti (**NpQ-ba-s**) cortadas por el cañón del río Chili. La ciudad y alrededores corresponden a depósitos de abanicos aluviales (**Qp-al**), al oeste por tufos volcánicos, por el este flujo de lodos y al sur por el batolito de la caldera (Figura 25) (Tabla 9).

**Figura 25**  
*Geología*



*Nota.* Adaptación propia de la base de datos, Geología. Fuente: MINAM (2018).

**Tabla 9**  
*Geología*

<b>Tipo de Roca</b>	<b>Litología</b>	<b>Unidad Estratificada</b>	<b>Simbología</b>
<b>Sedimentaria</b>	Gravas, arenas y limos	Deposito Aluvial Antiguo	<b>Qp-al</b>
Sedimentaria	Gravas, arenas y limos	Deposito Aluvial	Qh-al
Volcánica	Tobas	Formación Sencca	Ns-se
<b>Volcánica</b>	Andesitas	Formación Barroso Superior	<b>NpQ-ba-s</b>

*Nota.* La tabla muestra la geología presente en el área de estudio. Fuente: MINAM (2018).

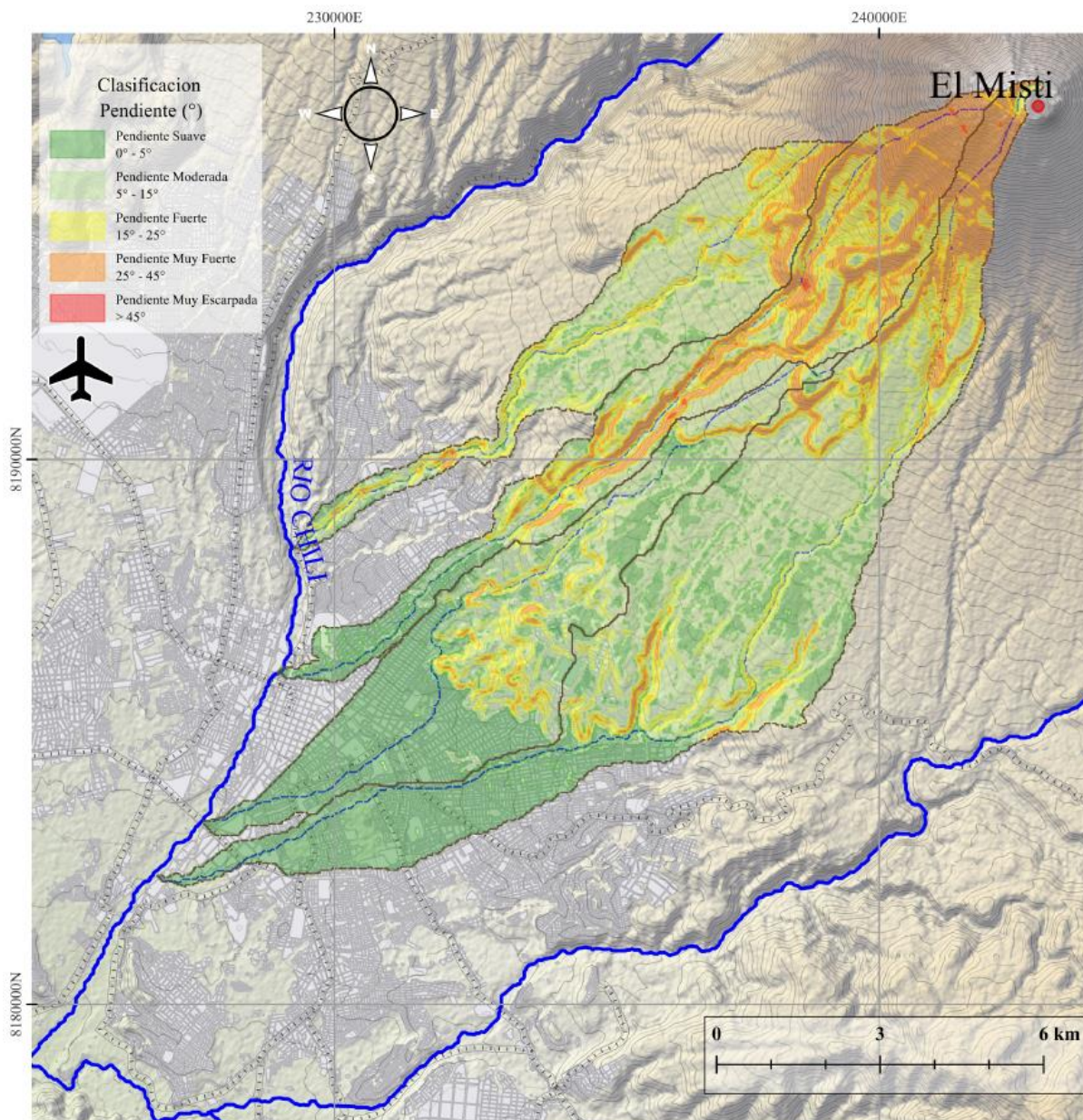
### 2.7 Pendiente

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).

Los movimientos en masa en laderas y cauces ocurren en cuya pendiente principal varía entre media a fuerte ( $>30^\circ$ ), porque a mayor pendiente facilita el escurrimiento superficial y, por ende, la erosión hídrica o pluvial (Vílchez y Sosa, 2021).

Vílchez y Sosa (2021) mencionan también que pendientes muy fuertes ( $25^\circ - 45^\circ$ ), están distribuidas principalmente en las laderas de colinas y montañas del Batolito de La Caldera, bordes de terrazas aluviales, islas fluviales de planicies lávicas, domos volcánicos que forman acantilados y vertientes del río Chili (Figura 26).

**Figura 26**  
*Pendiente*

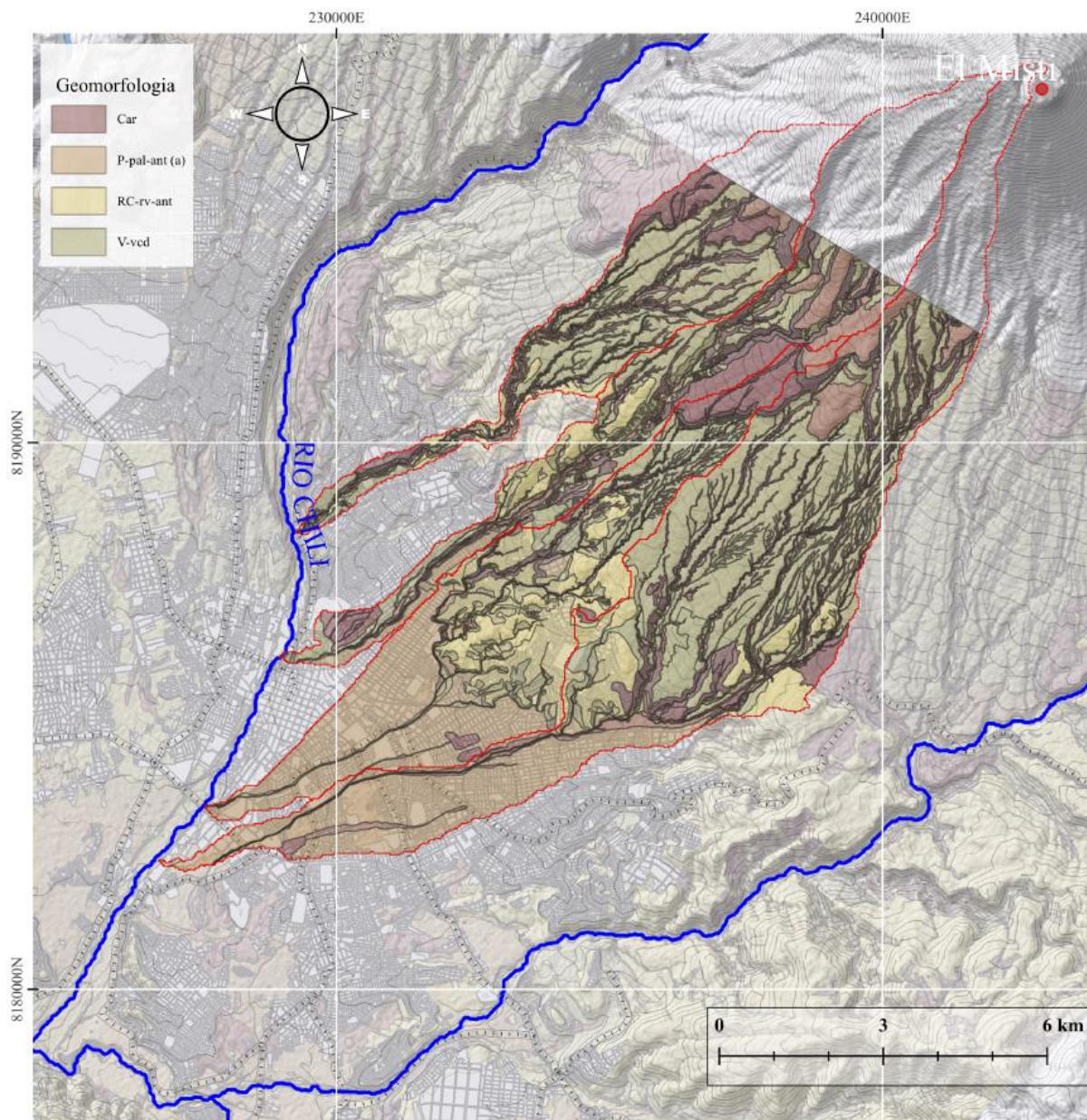


*Nota.* La figura muestra la pendiente de las cuencas de estudio a través del modelo digital de elevación: FAB DEM. Fuente: Elaboración propia.

## 2.8 Geomorfología

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 (Figura 27).

Figura 27  
Geomorfología

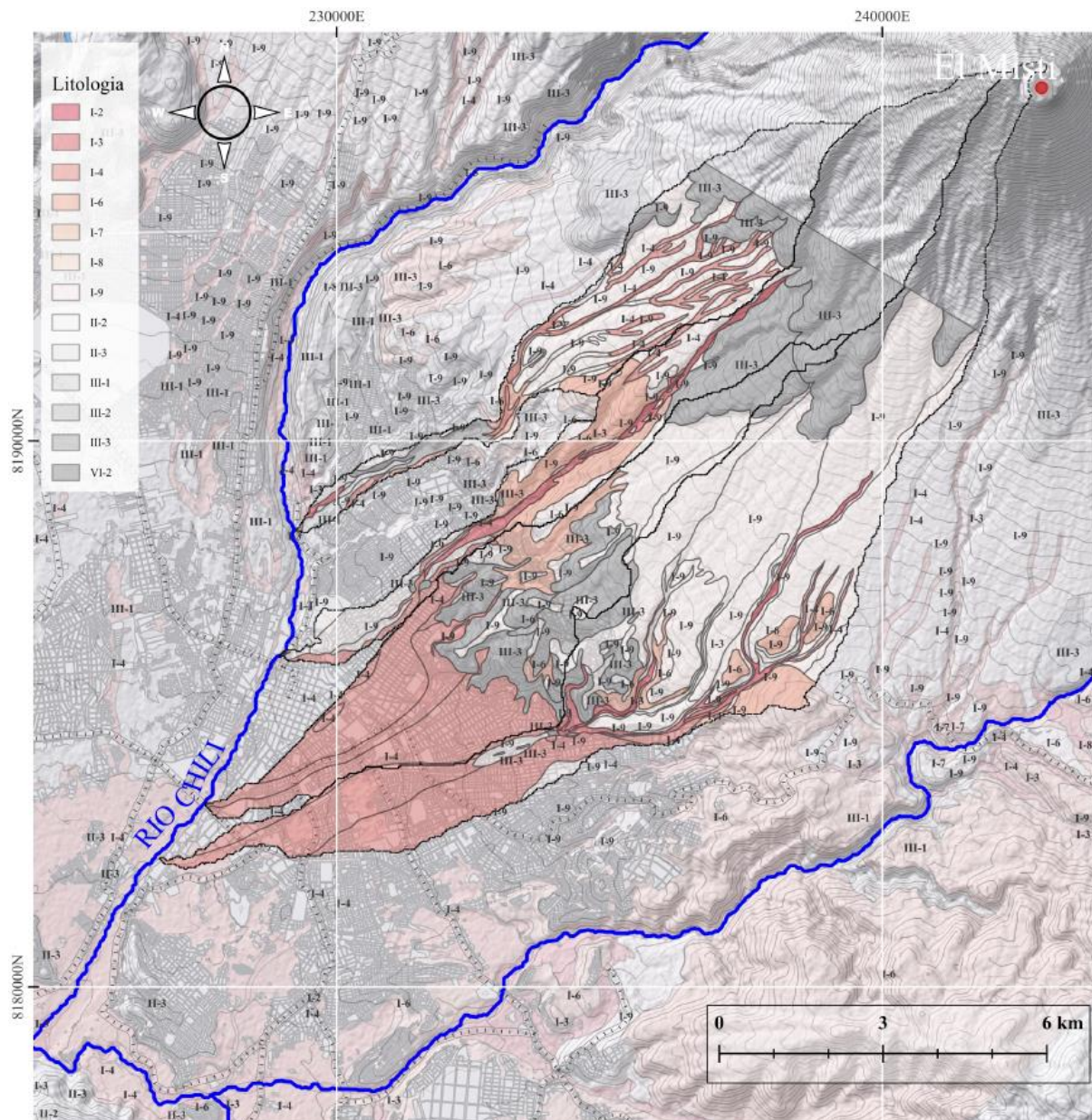


*Nota.* Adaptación propia de la base de datos, Geomorfología. Fuente: INGEMMET (2021).

De acuerdo con las geoformas de carácter deposicional y agradacional, la zona de estudio presenta un origen fluvial (**P-pal**) y (**Car**), estas subunidades fueron originadas por la acumulación de materiales de origen aluvial (**I-3**) y proluvial (**I-4**), relacionadas a episodios de desbordes de quebradas con regímenes de precipitación fuerte, formadas por actividad hídrica de las quebradas San Lázaro, Venezuela y Los Incas, como resultado de erosión por escorrentía. Las unidades geomorfológicas que se presentan en la zona de estudio son las de colinas y lomadas con una subunidad de colinas volcánicas lávicas

(RC-rv) que presentan pendientes medias ( $15^\circ$ ) y se encuentran en la parte central de la zona de estudio (**Distritos de Alto Selva Alegre, Miraflores y Mariano Melgar**). Litológicamente están conformadas por flujos de lava andesítica (**III-3**) y flujos de lavas en bloques (Figura 28).

**Figura 28**  
*Litología*



*Nota.* Adaptación propia a la base de datos Geomorfología. Fuente: INGEMMET (2021).

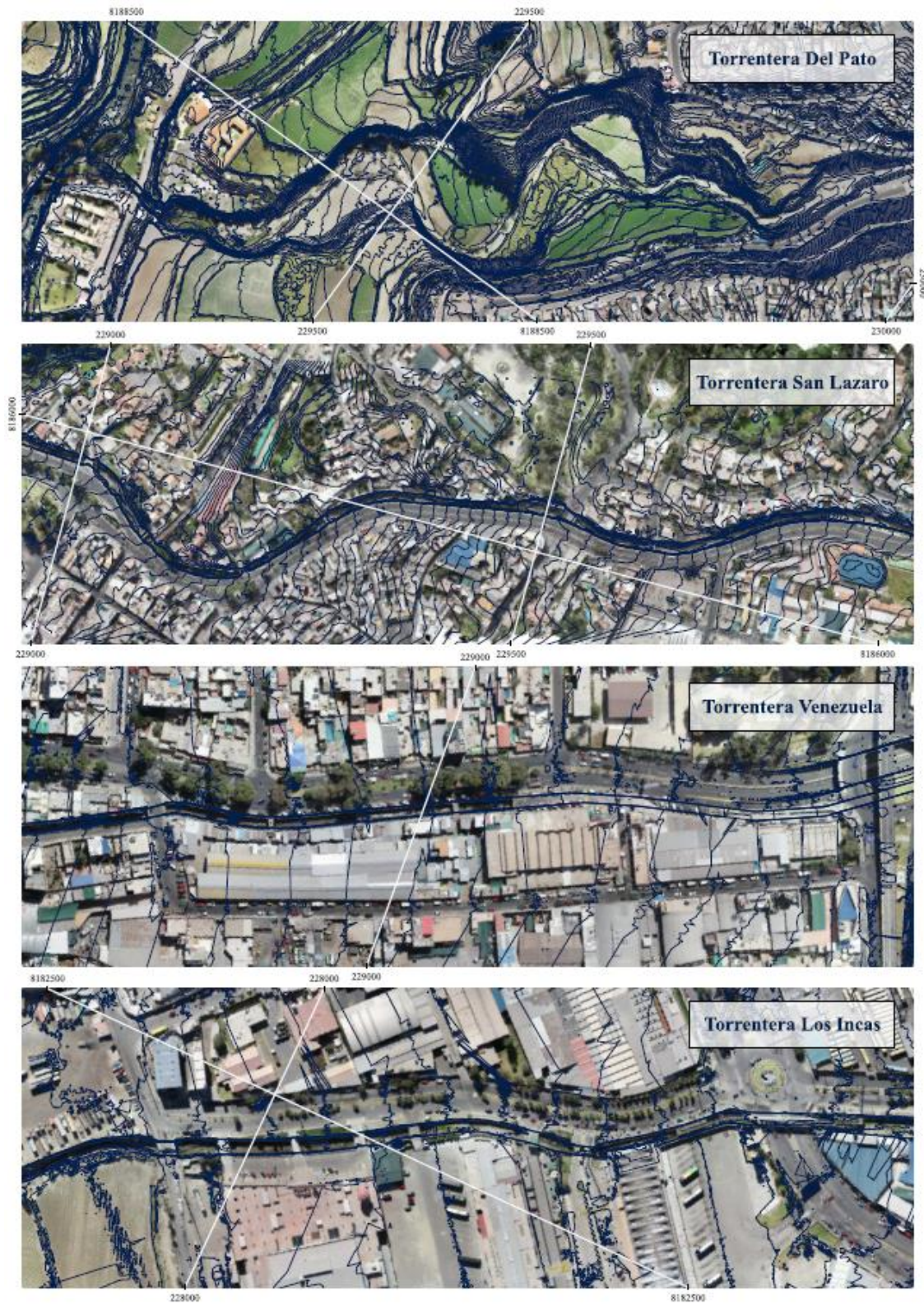
La caracterización litológica elaborado por el INGEMMET (2021), identifico unidades y subunidades de depósitos no consolidados fluviales (**I-2**), aluviales (**I-3**), proluviales (**I-4**), coluviales (**I-6**), lacustrinos (**I-7**), glaciario (**I-8**) y volcanoclasticos (**I-9**) como factores condicionantes a movimiento de masas (Figura 28) que son producto de la meteorización, erosión y acumulación.

- Los depósitos fluviales (**I-2**) las constituyen material de lechos de ríos o quebradas, son depósitos constituidos por cantos y gravas subredondeadas en matriz arenosa-limosa.
- Los depósitos aluviales (**I-3**) las conforman llanuras antiguas de los ríos Andamayo (Socabaya) Mollebaya y Chili, como también las principales quebradas Huarangal, San Lázaro, entre otras.
- Los depósitos proluviales (**I-4**) presentan fragmentos rocosos con relleno fino areno-arcilloso, presentan la ocurrencia de vario flujos de detritos (**lahar histórico**) a través del tiempo.

## 2.9 Topografía

El levantamiento topográfico de las principales torrenteras se realizó utilizando un dron DJI Phantom 4 RTK por el método de fotogrametría, debido a la alta precisión que ofrece por la visión estereoscópica y GPS diferencial. Obteniendo curvas de nivel cada metro (Figura 29), georreferenciado desde un punto de control proporcionado por el Instituto Geofísico del Perú (**IGN**) en el Sistema Geodésico Mundial WGS84/UTM Zona 19S.

**Figura 29**  
*Topografía de las Torrenteras*



*Nota.* La figura muestra las curvas de nivel cada metro de las torrenteras de estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

## 2.10 Mecánica de suelos

Se realizaron muestras a través de calicatas en puntos críticos a la entrada de la ciudad de Arequipa (Figura 14) para las diferentes torrenteras de estudio según la Norma técnica Peruana (NTP), de esta manera se determinaron las características geotécnicas mediante ensayos en laboratorio con el método de ensayo para análisis granulométrico por tamizado NTP 339.128, ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo NTP 339.131, ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (**peso unitario**) NTP 400.017 y el ensayo normalizado para el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas NTP 339.171 a una profundidad máxima alcanzada de 1.5 m (Tabla 10). Donde la matriz de sedimentos está constituida principalmente por arenas y gravas sobre los finos (**menor al 8%**), lo que sugiere la nula cohesión entre las partículas de depósitos sedimentarios, suelos erosionables, ante flujos hiperconcentrados. También se encontró presencia de flancos constituidos por flujos de barro, lahares y residuos sólidos.

**Tabla 10**  
*Ensayos de Estudios de Mecánica de Suelos*

Variable	Del Pato	San Lázaro	Venezuela	Los Incas
Profundidad (m)	1.5	1.5	1.5	1.5
Grava (%)	34.6	43.8	33.7	22.0
Arena (%)	58.5	51.5	57.9	74.2
Finos (%)	6.9	4.7	8.4	3.8
D95 (mm)	35.6	60.0	55.2	40.0
D90 (mm)	24.6	52.4	43.4	19.3
D50 (mm)	1.0	3.0	1.6	0.5
SUCS	SM	GP	GP	GP
Humedad (%)	0.4	6.7	0.9	6.7
Peso unitario (gr/cm <sup>3</sup> )	1.67	1.67	1.92	1.67
Gravedad específica (G)	2.62	2.55	2.53	2.58
Angulo de fricción Interna (°)	33	35	33	33

\*SM (arenas limosas), GP (gravas con mala gradación).

## 2.11 Flujos no newtonianos

La mezcla de sedimentos y agua que discurren en un cauce, en el Perú son conocidos como “huaicos” (Castillo, 2006). Según Gibson y Sánchez (2021) a medida que la carga de sedimentos aumenta y se vuelve más gruesa, el fluido pasa de newtoniano

( $C_v < 30\%$ ) a hiperconcentrado ( $C_v > 30\%$ ), lodo y escombros ( $C_v > 60\%$ ). La ecuación hidráulica de momento (**ecuación 1**) es utilizada para flujo newtoniano.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (1)$$

Donde,  $S_f$  representa todas las pendientes de pérdida adimensional en las simulaciones newtonianas, incluidas la expansión, contracción y de viento.

Los métodos de flujo de lodo y escombros son enfoques no newtonianos, que calculan las pérdidas internas de los modelos de tensión-deformación que no tienen una intersección cero y/o no son lineales (Figura 30).

**Figura 30**  
*Modelos Reológicos*



*Nota.* La figura muestra los modelos reológicos utilizados para simular (a) agua clara y (b, c) flujo de lodo y escombros. Fuente: Mud and Debris Flow – HEC - RAS (2020).

Hay una variedad de enfoques para simular fluidos no newtonianos, para este estudio se realizó un enfoque monofásico es decir a través de parámetros reológicos con el modelo HEC - RAS en su nueva versión 6.4, basados en algoritmos no newtonianos en DebrisLib (Gibson et al., 2020).

El enfoque monofásico para flujo de lodo y escombros simplemente agrega otra pendiente de pérdida adimensional, una pendiente de lodo y escombros (**SMD**) (**ecuación 2**), que incorpora los efectos no newtonianos en las ecuaciones hidráulicas.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial z}{\partial x} + S_f + S_{MD} \right) = 0 \quad (2)$$

Representando los efectos no newtonianos como una pendiente de “**fricción**” que es el movimiento matemático que permite incorporar la “**reología**” que es simplemente el estudio de como los materiales de deforman bajo esfuerzo o tensión.

De esta manera es crucial determinar el tipo de flujo que se presentan en las diferentes torrenteras de la ciudad de Arequipa, y la lluvia como factor antecedente crítico en regiones áridas (Siman-Tov y Marra, 2023).

## 2.12 Simulación bidimensional

Para determinar los mapas de peligro frente a inundaciones generalmente toma dos pasos, un análisis hidrológico para determinar la magnitud de la descarga de tormenta de baja probabilidad (**100 años**) y un modelo hidráulico 1D/2D para estimar la profundidad del flujo (Mazer et al., 2021). En el Perú, la ANA, es un organismo público adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego, responsable de dictar normas y establecer los procedimientos para la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos. Según el Uso y Gestión de Fajas Marginales (2020), se busca establecer un límite superior de la ribera, una “*Faja Marginal*”, donde se señala que en terrenos aledaños a los cauces naturales o artificiales de las fuentes de agua colindantes a asentamientos poblacionales un “*periodo de retorno de 100 años*”.

El modelamiento hidráulico bidimensional (**2D**) para cada torrentera se realizó con la ayuda del software HEC - RAS (**Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System**), teniendo en cuenta condiciones contorno o frontera de entrada (**Flow Hydrograph**), salida (**Normal Depth**) y la rugosidad de Manning (Figura 31), tomando valores recomendados por libro hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow (1994).

**Figura 31**  
*Coeficiente de Manning*

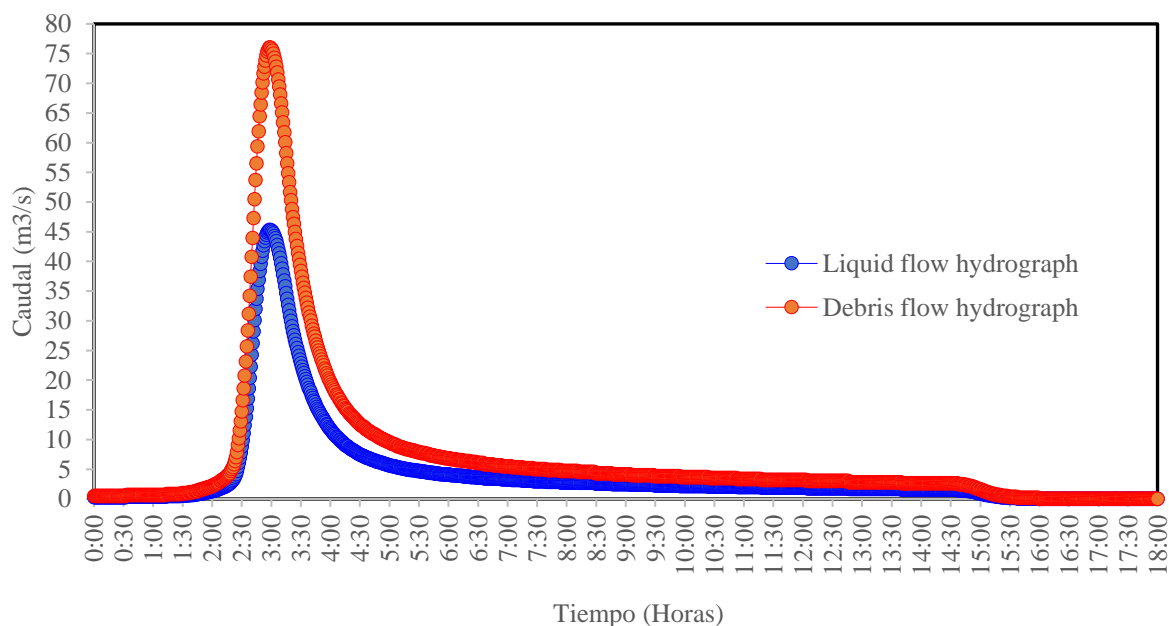


*Nota.* Coeficiente de Manning en las diferentes torrenteras de estudio. A) Del Pato, B) San Lázaro, C) Venezuela y D) Los Incas. Fuente: Elaboración Propia.

La figura 32, muestra el hidrograma de flujo de huaico para la quebrada de Del Pato, construida a partir del hidrograma del caudal líquido o agua (Tabla 8).

**Figura 32**

*Hidrograma Líquido y Sólido*



*Nota.* La figura muestra el hidrograma de flujo líquido y escombros de la quebrada del Pato, para un periodo de retorno de  $T=100$  años. Fuente: Elaboración Propia.

La Tabla 11 muestra los caudales determinados según el tipo de flujo bajo análisis en las diferentes cuencas de estudio.

**Tabla 11**

*Caudales Máximos para diferentes Periodos de Retorno*

Cuenca	Caudal (m3/s) para diferentes periodos de retorno (años)				
	TR=5	TR=25	TR=50	TR=100	TR=200
Del Pato	11.7	41.8	58.2	76.0	94.6
San Lázaro	18.2	53.5	70.6	88.5	106.9
Venezuela	11.4	27.3	35.4	44.1	53.1
Los Incas	25.4	79.6	106.4	134.5	163.6

*Nota.* La tabla muestra los caudales para flujos hiperconcentrados, de lodo y escombros en las diferentes cuencas de la ciudad de Arequipa.

## 2.13 Variable dependiente

### 2.13.1 Identificar los riesgos

La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (**Guía del PMBOK**) / Project Management Institute (**PMI**), establece que la Gestión de Riesgos de un Proyecto incluye los procesos para llevar a cabo la planificación, identificación, análisis e implementación de respuesta y monitoreo de los riesgos en un proyecto. Por consiguiente, teniendo en cuenta estos procesos se determinó la vulnerabilidad de obras viales existentes frente a eventos extremos a través de un análisis multicriterio.

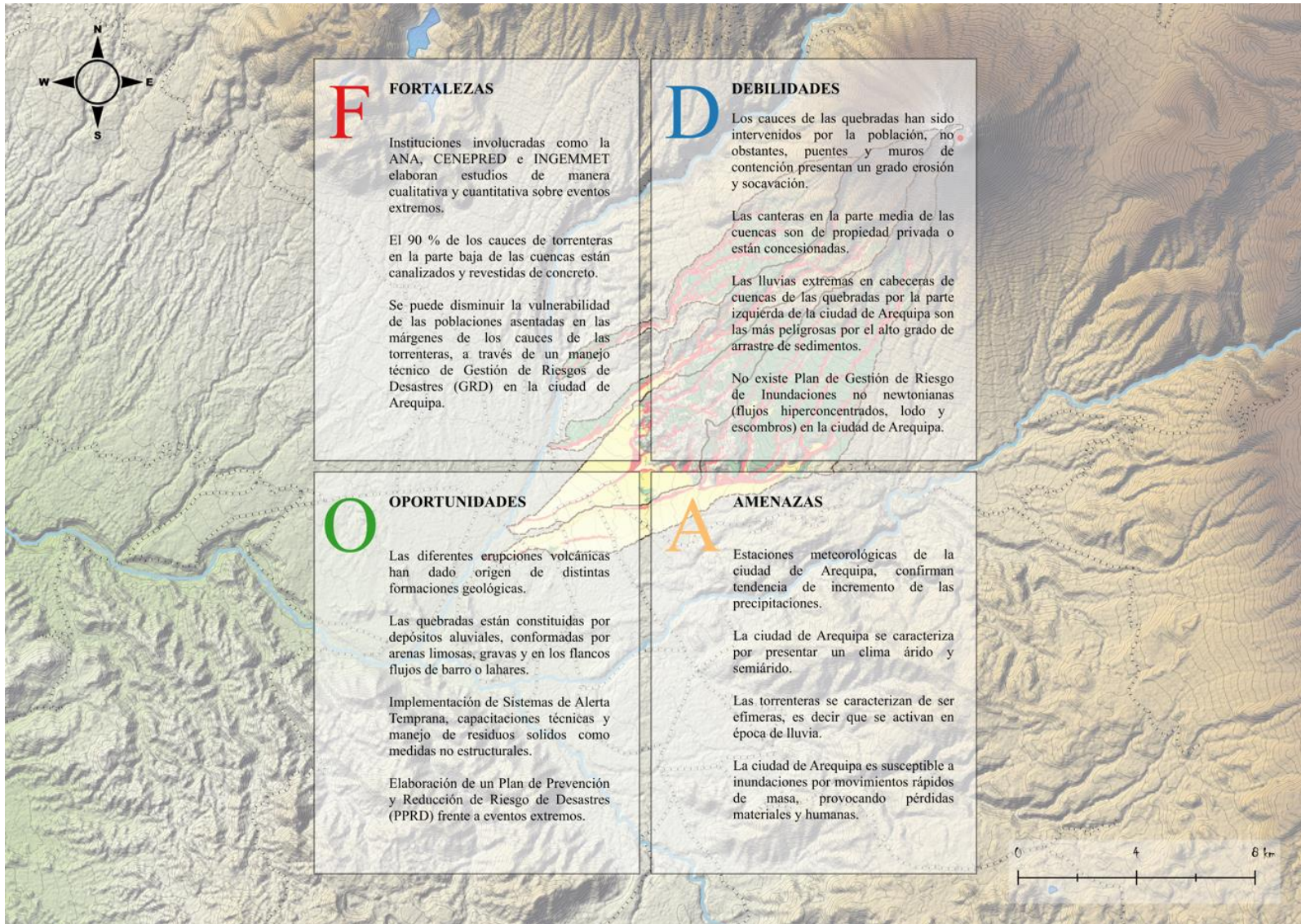
Las inundaciones son la causa más frecuente de daños en puentes (Pregnotato et al., 2022), esto hace que los puentes estén expuestos, frente a factores determinantes que son inciertos debido a la naturaleza estocástica de las inundaciones (Lamb et al., 2020).

### 2.13.2 Análisis FODA

Según la Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en Arequipa Metropolitana (2018), la matriz FODA es una herramienta de análisis e identificación que puede ser aplicada a diferentes áreas de conocimiento a través de medidas de adaptación propuestas, con el objetivo de obtener un diagnóstico para la toma de decisiones.

De esta manera se elaboró la matriz FODA (Figura 33) para tomar medidas respecto a la información de inundaciones en las diferentes torrenteras de estudio frente a la vulnerabilidad respecto a eventos hidrometeorológicos en obras viales existentes (**Puentes viales y peatonales**).

**Figura 33**  
*Matriz FODA*



*Nota.* La figura muestra la matriz FODA, a través del análisis y desarrollo de la presente investigación. Fuente: Elaboración Propia.

## 2.14 Obras viales existentes

### 2.14.1 Análisis de vulnerabilidad multicriterio

La metodología propuesta por Huarca et al. (2023), con 17 parámetros a través de una matriz multicriterio con 4 dimensiones: ambiental (**A1-3**), técnico (**T1-6**) social (**S1-4**) y económico (**E1-4**) permite determinar la vulnerabilidad hidrológica en puentes fluviales.

De esta manera, la matriz se aplicó a 8 puentes fluviales del río Chili, y para su evaluación tomó las siguientes consideraciones: a) profundidad de cimentación, b) el río Chili es regulado por las represas El Frayle y Aguada Blanca y c) la población se encuentra a menos de 5 Km.

El fenómeno del niño costero ocurrido entre el 2016 y 2017, evidenció estudios deficientes en la parte hidrológica e hidráulica lo que conllevó a la destrucción de 449 puentes a nivel nacional y expuso la falta de resiliencia en el Perú debido a eventos extremos. También, porque los puentes tienen una larga vida útil con valores de diseño de 50 a 100 años, lo que implica que se construyeran sin considerar el impacto del cambio climático (Tubaldi et al., 2022).

En consecuencia, la presente investigación utilizó una matriz multicriterio para la evaluación de las infraestructuras presentes en las diferentes torrenteras de estudio a través de variables (Tablas 12-15) que afectan la vulnerabilidad en puentes de las diferentes torrenteras de la ciudad de Arequipa.

**Tabla 12**

*Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Ambiental*

ID	Variable	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
A1	Cambio climático	Niveles de temperatura consistente en el tiempo	Niveles de temperatura ligeramente por encima de la media	Los niveles están moderadamente por encima de los niveles promedio	Niveles de temperatura superiores a la media	Los niveles de temperatura están por encima del promedio
A2	Calidad del agua	Ningún grado de contaminación	bajo nivel de contaminación	Nivel moderado de contaminación	Alto nivel de contaminación	Nivel muy alto de contaminación
A3	Obstáculos	El cauce de quebrada se encuentra libre de desechos y/o basuras	El cauce de quebrada tiene una pequeña cantidad de basura liviana, como bolsas y botellas de plástico	El cauce de quebrada presenta de pequeños a medianas cantidades de escombros	El cauce de quebrada presenta escombros de tamaño medio en cantidades regulares	El cauce de quebrada presenta grandes restos de escombros

*Nota.* Se tomo los criterios establecidos por Huarca et al., (2023) para la matriz de evaluación en la dimensión ambiental.

**Tabla 13**

*Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Técnica*

ID	Variable	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
T1	Material de construcción	Concreto reforzado	Acero	Madera	Adobe, caña y materiales menos resistentes	Materiales locales de considerable resistencia
T2	Estado de conservación	Sin deterioro	Ligero deterioro de acabados estructurales debido al uso normal	No existe deterioro y si lo hay no está comprometido y es remediable, o los acabados estructurales e instalaciones tienen deterioro visible por mal uso	La estructura presenta signos de deterioro que la comprometen, aunque no existe peligro de derrumbe y los acabados estructurales e instalaciones presentan desperfectos visibles	La infraestructura esta tan deteriorada que es probable que colapse
T3	Protección de flujo en pilares y estribos	Los estribos están extremadamente bien protegidos contra inundaciones	Los estribos están altamente protegidos contra inundaciones	Los estribos están medianamente protegidos contra inundaciones	Los estribos están mal protegidos contra inundaciones	Los estribos se encuentran desprotegidos contra inundaciones
T4	Altura entre cota mínima del tablero del puente y el N.A.M.E.	El galibo tiene 3 m de altura	El galibo tiene 2.5 m de altura	El galibo tiene 2 m de altura	El galibo tiene menos de 2 m de altura	El nivel de agua supera la cota mínima del tablero
T5	Velocidad de flujo	La velocidad de flujo es menor a 1 m/s	La velocidad de flujo esta entre 1 m/s - 2 m/s	La velocidad de flujo esta entre 2 m/s - 3 m/s	La velocidad de flujo esta entre 3 m/s - 4 m/s	La velocidad de flujo es mayor a 4 m/s
T6	Profundidad de socavación en cimentaciones poco profundas	La profundidad de socavación con margen de seguridad de más de 1 m	La profundidad de socavación con margen de seguridad de 1 m	La profundidad de socavación, con margen se seguridad de menos 1 m	La profundidad de socavación llega hasta la base de cimentación	La profundidad de socavación supera la base de cimentación

*Nota.* Se tomo los criterios establecidos por Huarca et al., (2023) en las variables T1, T2 y T3 para la evaluación en la dimensión técnica.

**Tabla 14**

*Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Social*

ID	Variable	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
S1	Estado de pobreza o desarrollo humano	Población cercana sin pobreza	Población cercana con menor porcentaje de pobreza	Población cercana con pobreza media	Población cercana con alta pobreza	población cercana que vive en pobreza total o extrema
S2	Programas de capacitación en Prevención y Atención de Desastres (DPR) para la población	La población está constantemente capacitada en la RPD, actualizados y participando en simulacros, con difusión y cobertura total	La población se capacita constantemente en RDP, y su difusión y cobertura son totales	La población recibe capacitación periódica en material de RDP, y su difusión y cobertura son amplias	La población esta escasamente capacitada en RDP, y su difusión y cobertura son escasas	Toda la población no tiene ni desarrolla ningún programa de capacitación de la DPR
S3	Proximidad a núcleos de población	Muy lejos, >5 km	Lejos, de 3 a 5 km	Proximidad media, 1 a 3 Km	Cerca, entre 0.2 y 1 Km	Muy cerca 0-0.2 Km
S4	Material de casas cercanas	Albañilería y hormigón armado	Madera y/o quincha reforzada con elementos diagonales	Quincha (Caña con barro)	Adobe o tapial	Tapete y/o cartón

*Nota.* Se tomo los criterios establecidos por Huarca et al., (2023) para la matriz de evaluación en la dimensión social.

**Tabla 15**

*Matriz de Evaluación de Vulnerabilidad Multidimensional-Dimensión Económica*

ID	Variable	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
E1	Tiempo de funcionamiento	Menos de 10 años	Entre 10 y 25 años	De 25 a 50 años	De 50 a 75 años	Mas de 75 años en funcionamiento
E2	Importancia según el volumen de tránsito vehicular	Muy pocos vehículos transitando por día	Pocos vehículos transitando por día	Un numero regular de vehículos transitando por día	Es utilizado por muchos vehículos al día	Transporta un elevado número de vehículos diariamente
E3	Cierre al tránsito vehicular ante una máxima avenida	El puente no ha sido cerrado al tráfico vehicular por una máxima avenida	Se planeo cerrar el puente debido a una máxima avenida	El puente ha sido cerrado al tráfico vehicular ante una máxima avenida	El puente ha sido cerrado al tráfico vehicular por una máxima avenida en dos ocasiones	El puente ha cerrado por una máxima avenida más de dos veces
E4	Historia e incertidumbre sobre inundaciones	El puente nunca se ha inundado	El puente se inundó en una ocasión	El puente se inundó en dos ocasiones	El puente se inundó en tres ocasiones	El puente se inundó en cuatro ocasiones

*Nota.* Se tomo los criterios establecidos por Huarca et al., (2023) para la matriz de evaluación en la dimensión económica.



### CAPITULO III RESULTADOS

#### 3.1 Umbrales de precipitación máxima

La tabla 16 muestra el registro de 43 y 41 años de datos de precipitación máxima de 24 horas de las estaciones La Pampilla y Chiguata para la determinación de umbrales de precipitación máxima con un porcentaje de 5.3 y 5.7 % de datos faltantes a causa de datos no disponibles por cada estación meteorológica.

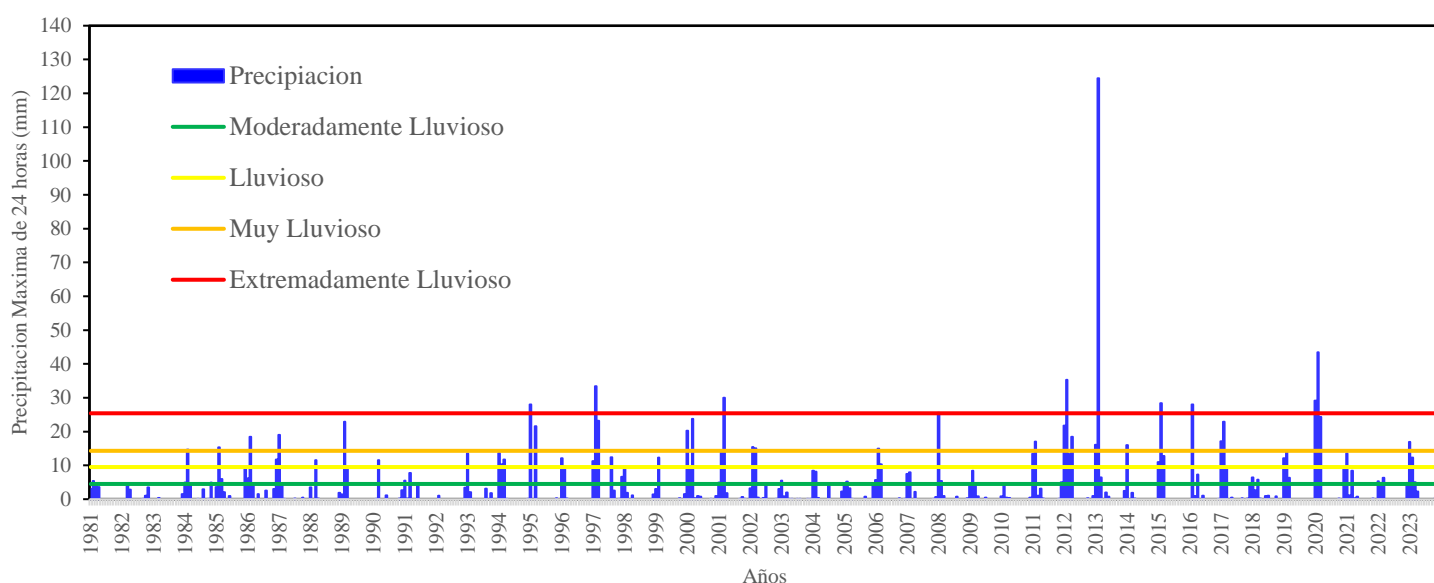
**Tabla 16**  
*Registro Histórico*

Estaciones Meteorológicas	Periodo	Nro. de años	Datos faltantes %
Estación La Pampilla	1981 - 2023	43	5.3
Estación Chiguata	1981 - 2021	41	5.7

*Nota.* La figura muestra el registro de las estaciones de estudio.

Para la estación la Pampilla, los datos de precipitación acumulada se ordenaron de menor a mayor con 996 días con lluvia ( $RR > 0.1\text{mm}$ ) y se calcularon los percentiles de la serie de 995 días con lluvia, excluyendo el mayor valor registrado (**124.5 mm**) debido a una lluvia excepcional (Cacya et al., 2013), y a la estadística de los valores extremos. Hubo 833 datos faltantes en la serie (Figura 34).

**Figura 34**  
*Caracterización de Umbrales de Precipitación Máxima - Estación La Pampilla*



*Nota.* La figura muestra los umbrales de precipitación máxima de la estación La Pampilla.

**Tabla 17**

*Umbral de Precipitación Máxima – Estación La Pampilla*

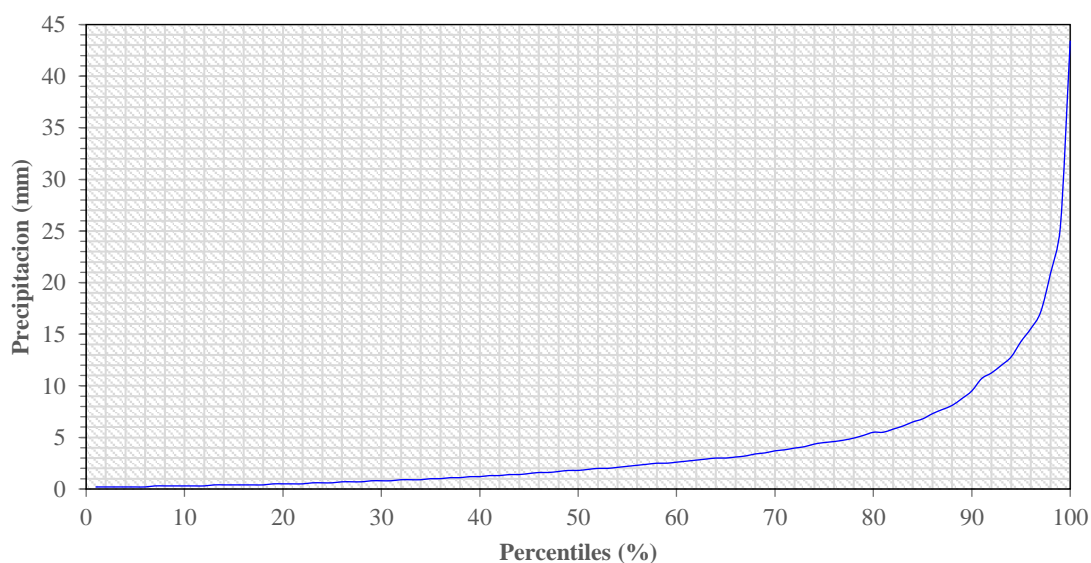
Umbral de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
RR/día > 99p	RR > 25.4 mm
95p < RR/día ≤ 99p	14.3 mm < RR ≤ 25.4 mm
90p < RR/día ≤ 95p	9.5 mm < RR ≤ 14.3 mm
75p < RR/día ≤ 90p	4.5 mm < RR ≤ 9.5 mm

*Nota.* La figura muestra los umbrales de precipitación máxima de la estación La Pampilla.

El tratamiento de datos de precipitación máxima de 24 horas responde bien al comportamiento esperado de la precipitación en la estación La Pampilla mediante el uso de percentiles (Figura 35).

**Figura 35**

*Estación La Pampilla (1981-2023) - Precipitación (mm) vs Percentiles (%)*

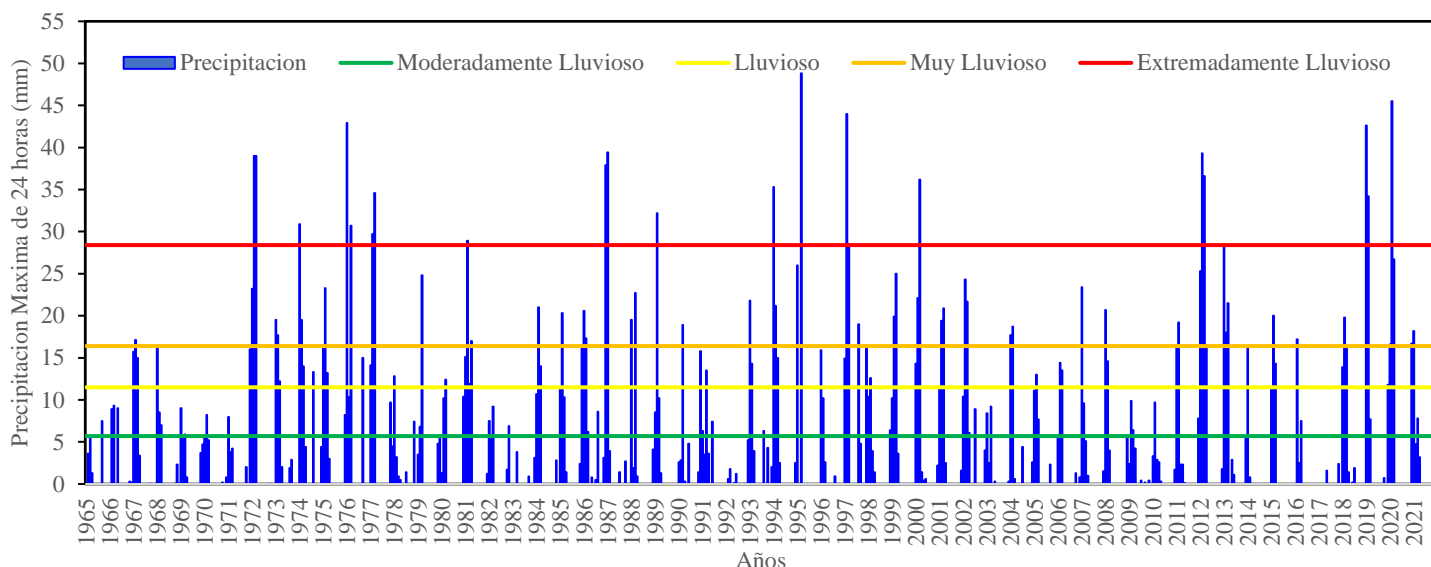


*Nota.* La figura muestra la precipitación (mm) vs los percentiles (%) de la estación La Pampilla.

Para la estación Chiguata, los datos de precipitación acumulada se ordenaron de menor a mayor con 1510 días con lluvia (**RR>0.1mm**) y se calcularon los percentiles de la serie de 1509 días con lluvia, excluyendo el mayor valor registrado (**48.8 mm**), y a la estadística de los valores extremos. Hubo 850 datos faltantes en la serie (Figura 36).

**Figura 36**

*Caracterización de Umbrales de Precipitación Máxima - Estación Chiguata*



*Nota.* La figura muestra los umbrales de precipitación máxima de la estación Chiguata.

**Tabla 18**

*Umbrales de Precipitación Máxima – Estación Chiguata*

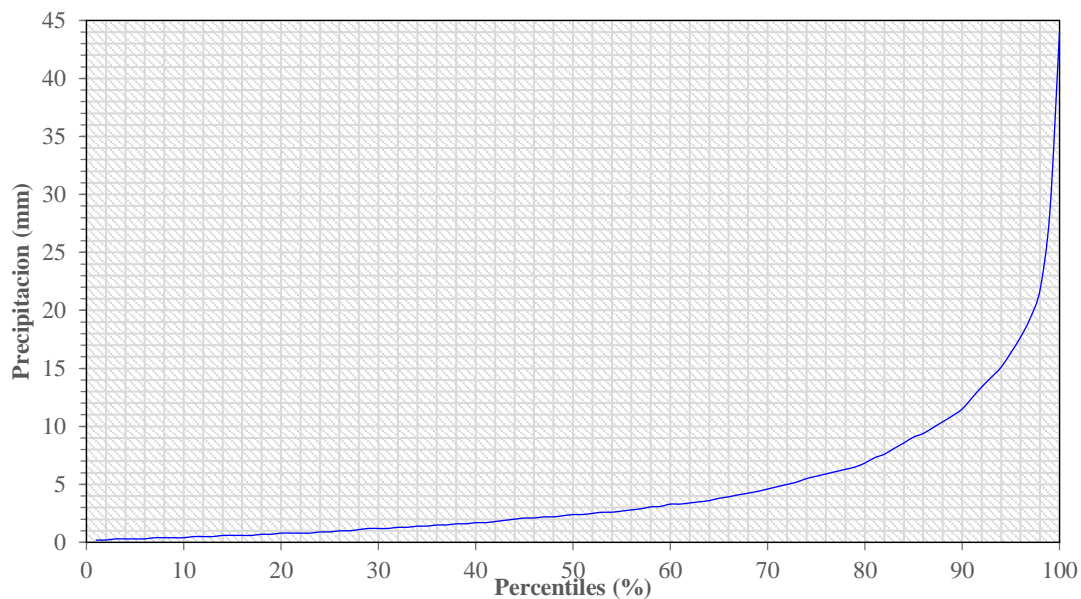
Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
RR/día > 99p	RR > 28.4 mm
95p < RR/día ≤ 99p	16.4 mm < RR ≤ 28.4 mm
90p < RR/día ≤ 95p	11.5 mm < RR ≤ 16.4 mm
75p < RR/día ≤ 90p	5.7 mm < RR ≤ 11.5 mm

*Nota.* La figura muestra los umbrales de precipitación máxima de la estación Chiguata.

El tratamiento de datos de precipitación máxima de 24 horas responde bien al comportamiento esperado de la precipitación en la estación Chiguata mediante el uso de percentiles (Figura 37).

**Figura 37**

*Estación Chiguata (1981-2021) - Precipitación (mm) vs Percentiles (%)*



*Nota.* La figura muestra la precipitación (mm) vs los percentiles (%) de la estación Chiguata

En cuanto al uso del percentil 75, Alfaro (2014) afirma que valores de precipitación debajo de este umbral, deben considerados como usuales.

### 3.2 Torrentera Del Pato

Rivera y Cueva (2017) identificaron y evaluaron peligros geológicos que se encuentran en la margen izquierda del río Chili, del sector Parque Ecológico, Distrito de Alto Selva Alegre (Arequipa), concluyendo que se pueden generar flujo de lodo, detonados por lluvias excepcionales como los años 2013 y 2016. Por su parte, Rivera (2017) menciona también el gran número de depósitos de lahares, que son fenómenos muy recurrentes.

Macedo et al. (2017) concluyen que se pueden generar flujos de lodo o lahares, en caso de erupciones volcánicas o durante fuertes precipitaciones, como en los últimos años en la ciudad de Arequipa.

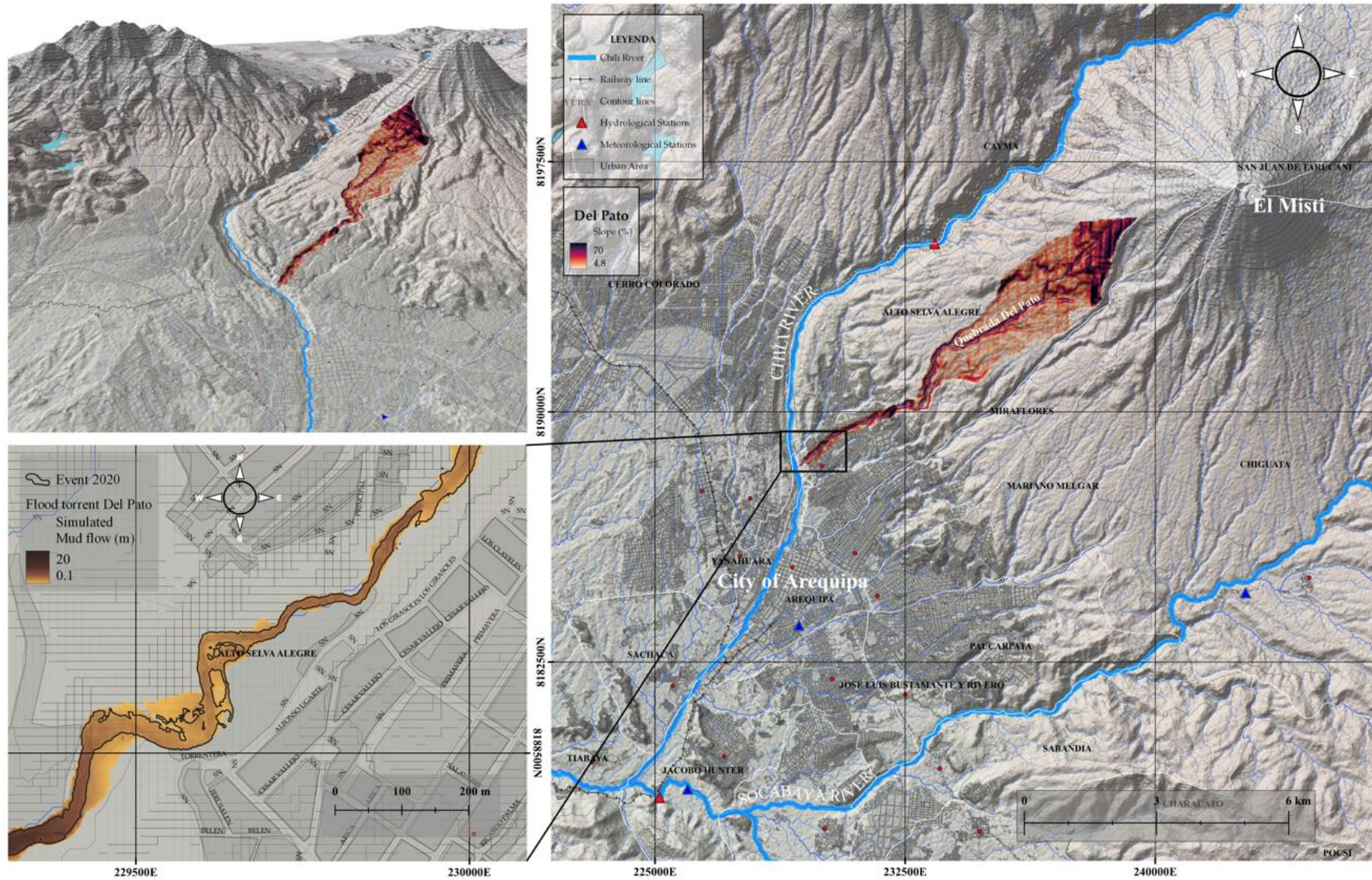
El informe técnico Nro. A6912 elaborado por el INGEMMET (2019), menciona que los cauces de la quebrada Del Pato en el sector Villa Confraternidad Zonas A, B, C, y D del Distrito de Selva Alegre han sido modificadas, porque han sido rellenadas con material sólido con piedra y tierra, ocupados con viviendas en su mayoría de material noble, y se ven afectadas por un peligro de movimientos de masa como lahares, huacos, flujo de lodo y escombros.

El informe técnico Nro. A7011 elaborado por el INGEMMET (2020), refiere que las viviendas del distrito de Alto Selva Alegre se encuentran en zona de alto peligro, debido a son severamente afectadas por flujos de barro (lahares) y escombros.

De esta manera, a través de eventos históricos ocurridos y de simulaciones bidimensionales en HEC - RAS con la parametrización de “Suelo Típico” y el modelo reológico O’Brien Equation (**Quadratic**) para flujos de lodo y escombros (**Cv>60%**) se elaboró el mapa de niveles de agua (**tirantes**) en la torrentera Del pato para un periodo de retorno de 100 años (Figura 38).

**Figura 38**

*Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Del Pato*



*Nota.* Mapa de inundación, para un periodo de retorno de 100 años, utilizando el modelo numérico HEC-RAS. Fuente: Elaboración Propia.

La quebrada Del Pato se delimito hasta la confluencia del rio Chili, presentando un área de drenaje (**A**) de 15.0 Km<sup>2</sup>, un perímetro (**P**) de 36.8 Km y una diferencia altitudinal (**DA**) de 1931.5 m, respecto a sus parámetros de forma la quebrada presenta un índice de compacidad o Gravelius (**C<sub>g</sub>**) de 2.7 y longitudes de rectángulo equivalente de 17.6 y 0.9 Km (**lado mayor y menor**) (Tabla 5), lo que sugiere una cuenca alargada (**probabilidad baja de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta**), se espera una respuesta hidrológica inmediata. En cuanto a los parámetros de relieve, se halló que la longitud del cauce principal (**L**) es de 15 Km, una pendiente media de cuenca (**j**) y de cauce principal (**J**) de 24.1 % (Tabla 6) y 13.0 % (Figura 24) respectivamente, estas características corresponden a relieves fuertemente accidentados o empinados, lo que sugiere peligro extremo de erosión de suelos (CENEPRED, 2014) y gran capacidad de transporte de sedimentos en época de avenidas.

La curva hipsométrica de la cuenca representa el área de drenaje con relación a su altitud (Figura 18), se encontró que más del 60 % del área de drenaje se encuentra por encima de los 3285.9 m.s.n.m. y su altitud media de 3199.6 m.s.n.m. Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su curva hipsométrica (Figura 18) sugiere una cuenca en estado de equilibrio (**Curva B**) (Tabla 6).

El estudio realizado de mecánica de suelos en la cuenca media de la quebrada Del Pato donde se realizó las calicatas con una profundidad de 1.5 m (Tabla 10), muestran que la matriz está constituida en un mayor porcentaje de arenas con finos (**65.4 %**) sobre las gravas (**34.6 %**), a nivel de cimentación de suelos con SUCS=SM (**arenas limosas**).

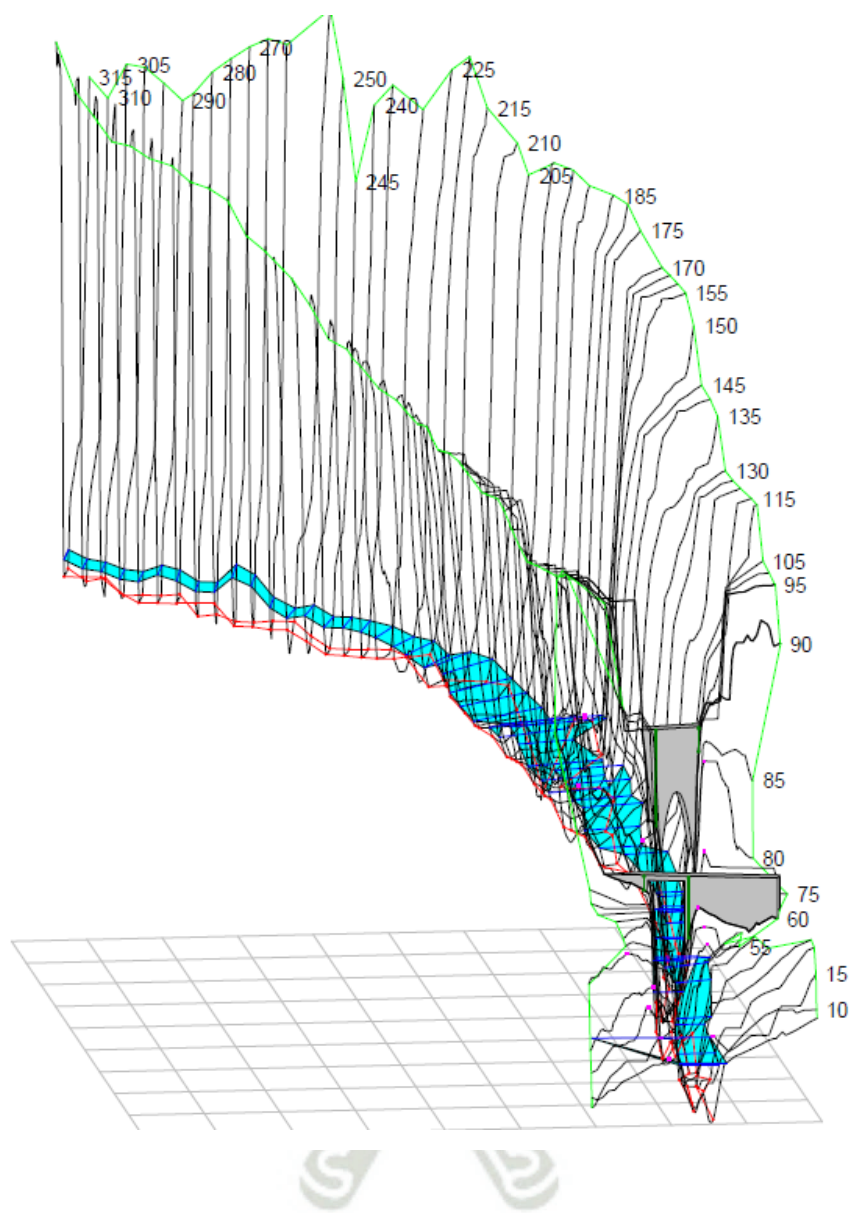
La simulación de flujos de lodo y escombros para la quebrada Del Pato con el software HEC-RAS, muestra que la altura máxima de flujos será de 20 metros (Figura 38) y es consecuencia de las depresiones existentes en la quebrada media-alta, lo que provoca un represamiento.

### 3.1.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Del Pato

Para la evaluación técnica de obras viales existentes en la torrentera Del Pato se realizó el modelamiento unidimensional (1D) con HEC – RAS, para determinar parámetros hidráulicos como: niveles de agua (**tirante**) (Figura 39) y velocidades máximas.

**Figura 39**

*Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Del Pato*



*Nota.* Simulación hidráulica en HEC-RAS de obras viales existentes en la torrentera Del Pato. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.2 Torrentera San Lázaro

El informe técnico Nro. A6886 elaborado por el INGEMMET (2019), menciona que la zona se encuentra en una zona de alta a muy alta susceptibilidad a movimientos en masa, como caídas de rocas, proceso de erosión en cárcavas y flujo de lodo (huaicos).

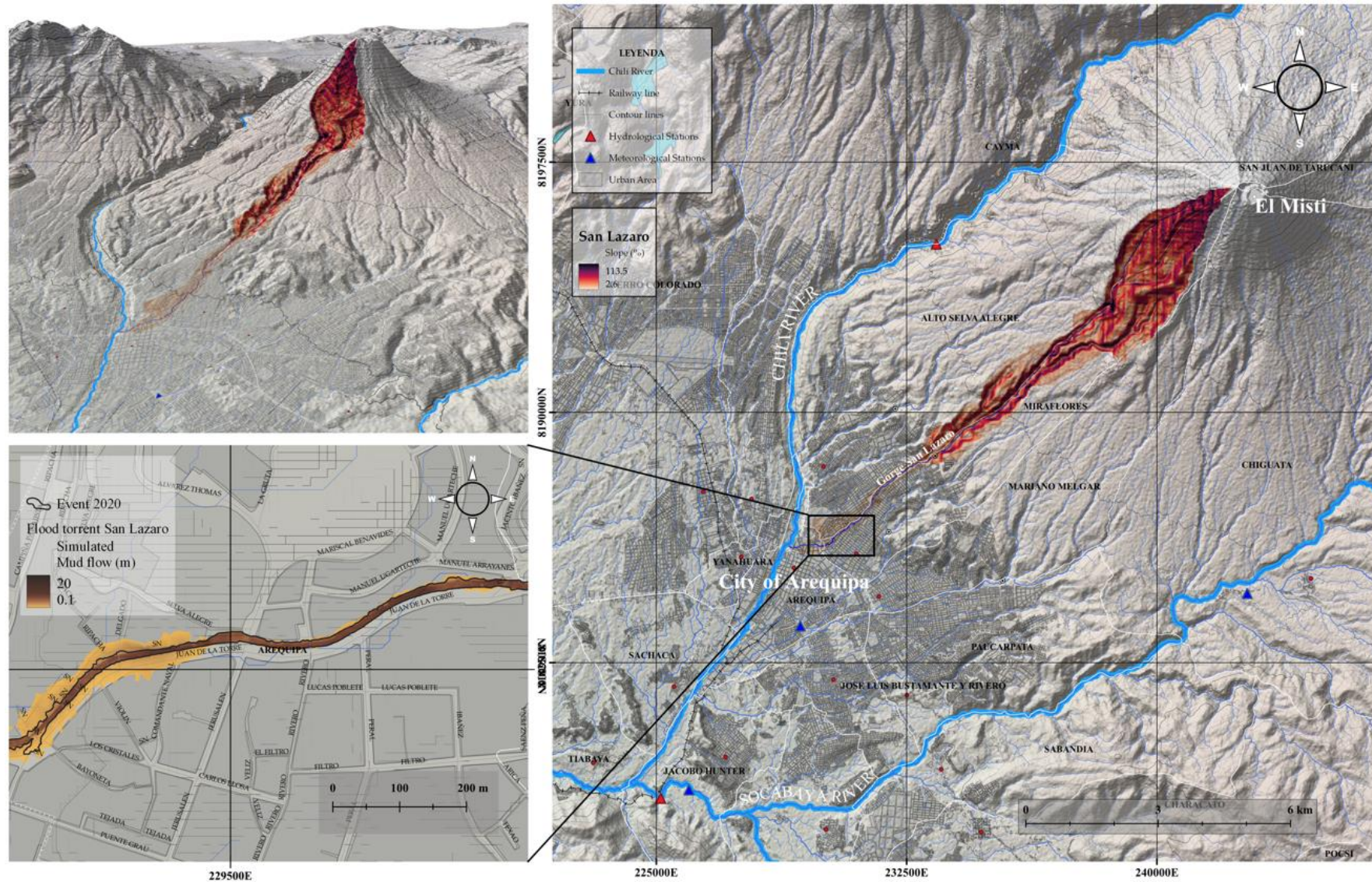
El informe técnico Nro. A7071 elaborado por el INGEMMET (2020), refiere que en periodos de lluvia en los meses de enero, febrero y marzo la ciudad de Arequipa por lluvias excepcionales como el año 2020, activaron la quebrada San Lázaro y generaron flujos de lodo y lahares.

El plan de Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del Distrito de Miraflores (2021), presenta un análisis de gestión de riesgo de desastre por componentes, a través de una gestión prospectiva, correctiva y reactiva. No obstante, el estudio realizado a través de un enfoque cualitativo menciona que el peligro por lahares o flujo de lodo (huaicos) y desbordes por la ocurrencia de lluvias intensas es muy alto.

De esta manera, a través de eventos históricos ocurridos y de simulaciones bidimensionales en HEC - RAS con la parametrización de “Suelo Típico” y el modelo reológico de Bingham para flujos hiperconcentrados ( $C_v < 60\%$ ). De esta manera, se elaboró el mapa de niveles de agua (**tirantes**) en la torrentera San Lázaro para un periodo de retorno de 100 años (Figura 40).

**Figura 40**

*Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera San Lázaro*



*Nota.* Mapa de inundación, para un periodo de retorno de 100 años, utilizando el modelo numérico HEC-RAS. Fuente: Elaboración Propia.

La quebrada San Lázaro se delimito hasta la confluencia del río Chili, presentando un área de drenaje (**A**) de 20.2 Km<sup>2</sup>, un perímetro (**P**) de 50.1 Km y una diferencia altitudinal (**DA**) de 3446.5 m, respecto a sus parámetros de forma la quebrada presenta un índice de compacidad o Gravelius (**C<sub>g</sub>**) de 3.1 y longitudes de rectángulo equivalente de 24.2 y 0.8 Km (**lado mayor y menor**) (Tabla 5), lo que sugiere una cuenca alargada (**probabilidad baja de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta**), se espera una respuesta hidrológica inmediata. En cuanto a los parámetros de relieve, se halló que la longitud del cauce principal (**L**) es de 19.1 Km, una pendiente media de cuenca (**j**) y de cauce principal (**J**) de 37.7 % (Tabla 6) y 18.0 % (Figura 24) respectivamente, estas características corresponden a relieves muy fuertemente accidentados o muy empinados, lo que sugiere peligro extremo de erosión de suelos (CENEPRED, 2014) y gran capacidad de transporte de sedimentos en época de avenidas.

La curva hipsométrica de la cuenca representa el área de drenaje con relación a su altitud (Figura 18), se encontró que más del 30 % del área de drenaje se encuentra por encima de los 3430.0 m.s.n.m. y su altitud media de 3456.8 m.s.n.m. Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su curva hipsométrica (Figura 18) sugiere una cuenca en estado de equilibrio (**Curva B**) (Tabla 6).

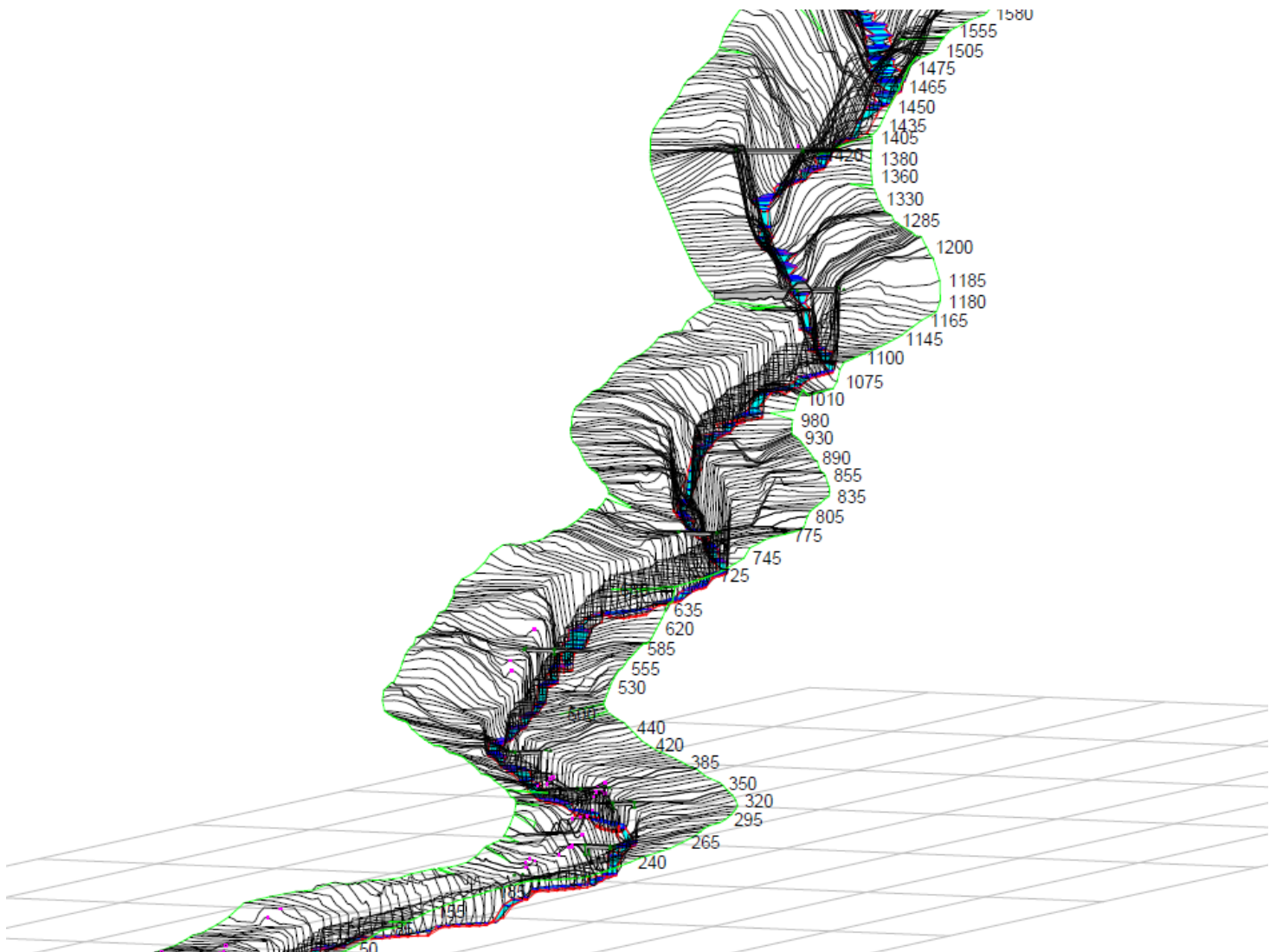
El estudio realizado de mecánica de suelos en la cuenca media de la quebrada San Lázaro donde se realizó las calicatas con una profundidad de 1.5 m (Tabla 10), muestran que la matriz está constituida en un mayor porcentaje de arenas con finos (**56.2 %**) sobre las gravas (**43.8 %**), a nivel de cimentación de suelos con SUCS=GP (**gravas con mala gradación**). La simulación de flujos de lodo y escombros para la quebrada Del Pato con el software HEC-RAS, muestra que la altura máxima de flujos será de 20 metros (Figura 40) y es consecuencia de las depresiones existentes en la quebrada media-alta, lo que provoca un represamiento.

### 3.2.1 Evaluación de obras viales - Torrentera San Lázaro

Para la evaluación técnica de obras viales existentes en la torrentera San Lázaro se realizó el modelamiento unidimensional (1D) con HEC – RAS, para determinar parámetros hidráulicos como: niveles de agua (**tirante**) (Figura 41) y velocidades máximas.

**Figura 41**

*Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera San Lázaro*



*Nota.* Simulación hidráulica en HEC-RAS de obras viales existentes en la torrentera San Lázaro. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.3 Torrentera Venezuela

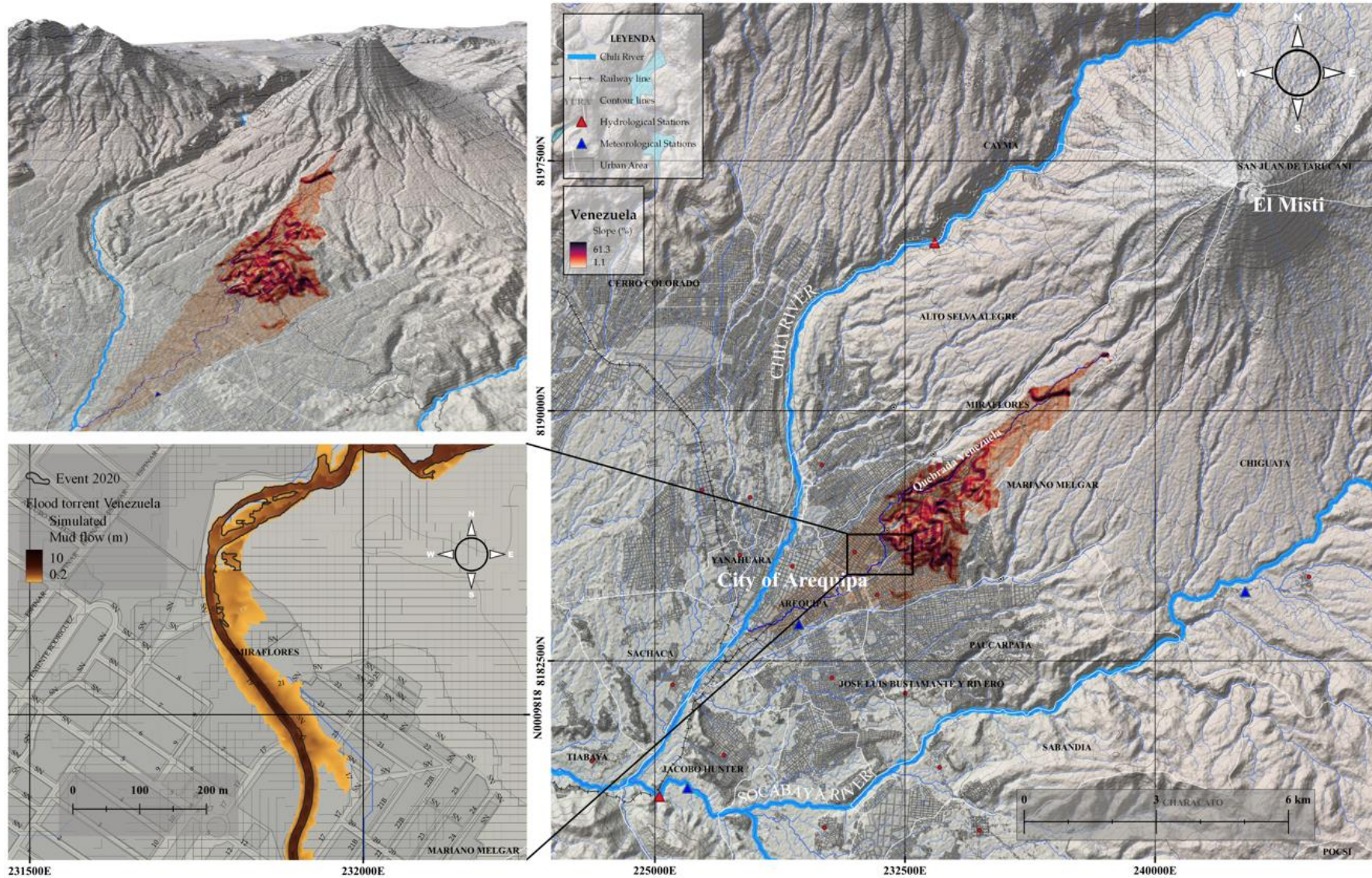
Ancco (2020) analizó la correlación entre la calidad en la gestión y la sostenibilidad de proyectos de inversión de adaptación y mitigación frente al cambio climático de la periferia de Arequipa, encontrando una alta influencia. También menciona que, para la reducción de la vulnerabilidad frente al cambio climático e incremento de la resiliencia con un enfoque crítico, reflexivo y más allá de la mejora continua, se deben formular componentes estratégicos.

Gonzales (2022) contribuyó a la gestión ambiental de las torrenteras Miraflores y Venezuela con una mirada holística sobre el problema del riesgo de las torrenteras desde el aspecto físico, socioeconómico, cultural e institucional. De esta manera, propone un modelo de gestión de riesgos por inundación, priorizando el tratamiento de la parte alta de las cuencas, ya que el problema siempre persistiría, basado en una Autoridad Autónoma para la planificación urbana desde la cabecera hasta la confluencia del río Chili como un gran espacio público urbano ambiental.

De esta manera, a través de eventos históricos ocurridos y de simulaciones bidimensionales en HEC - RAS con la parametrización de “Suelo Típico” y el modelo reológico de Bingham para flujos hiperconcentrados ( $C_v < 60\%$ ). De esta manera, se elaboró el mapa de niveles de agua (tirantes) en la torrentera Venezuela para un periodo de retorno de 100 años (Figura 42).

**Figura 42**

*Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Venezuela*



*Nota.* Mapa de inundación, para un periodo de retorno de 100 años, utilizando el modelo numérico HEC-RAS. Fuente: Elaboración Propia.

La quebrada Venezuela se delimito hasta la confluencia del río Chili, presentando un área de drenaje (**A**) de 21.5 Km<sup>2</sup>, un perímetro (**P**) de 43.4 Km y una diferencia altitudinal (**DA**) de 1281.0 m, respecto a sus parámetros de forma la quebrada presenta un índice de compacidad o Gravelius (**C<sub>g</sub>**) de 2.6 y longitudes de rectángulo equivalente de 20.7 y 1.0 Km (**lado mayor y menor**) (Tabla 5), lo que sugiere una cuenca alargada (**probabilidad baja de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta**), se espera una respuesta hidrológica inmediata. En cuanto a los parámetros de relieve, se halló que la longitud del cauce principal (**L**) es de 17.6 Km, una pendiente media de cuenca (**j**) y de cauce principal (**J**) de 13.6 % (Tabla 6) y 7.0 % (Figura 24) respectivamente, estas características corresponden a relieves accidentados o fuertemente inclinados, lo que sugiere peligro extremo de erosión de suelos (CENEPRED, 2014) y gran capacidad de transporte de sedimentos en época de avenidas.

La curva hipsométrica de la cuenca representa el área de drenaje con relación a su altitud (Figura 18), se encontró que más del 12 % del área de drenaje se encuentra por encima de los 2462.4 m.s.n.m. y su altitud media de 2633.6 m.s.n.m. Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su curva hipsométrica (Figura 18) sugiere una cuenca en estado de equilibrio (**Curva B**) (Tabla 6).

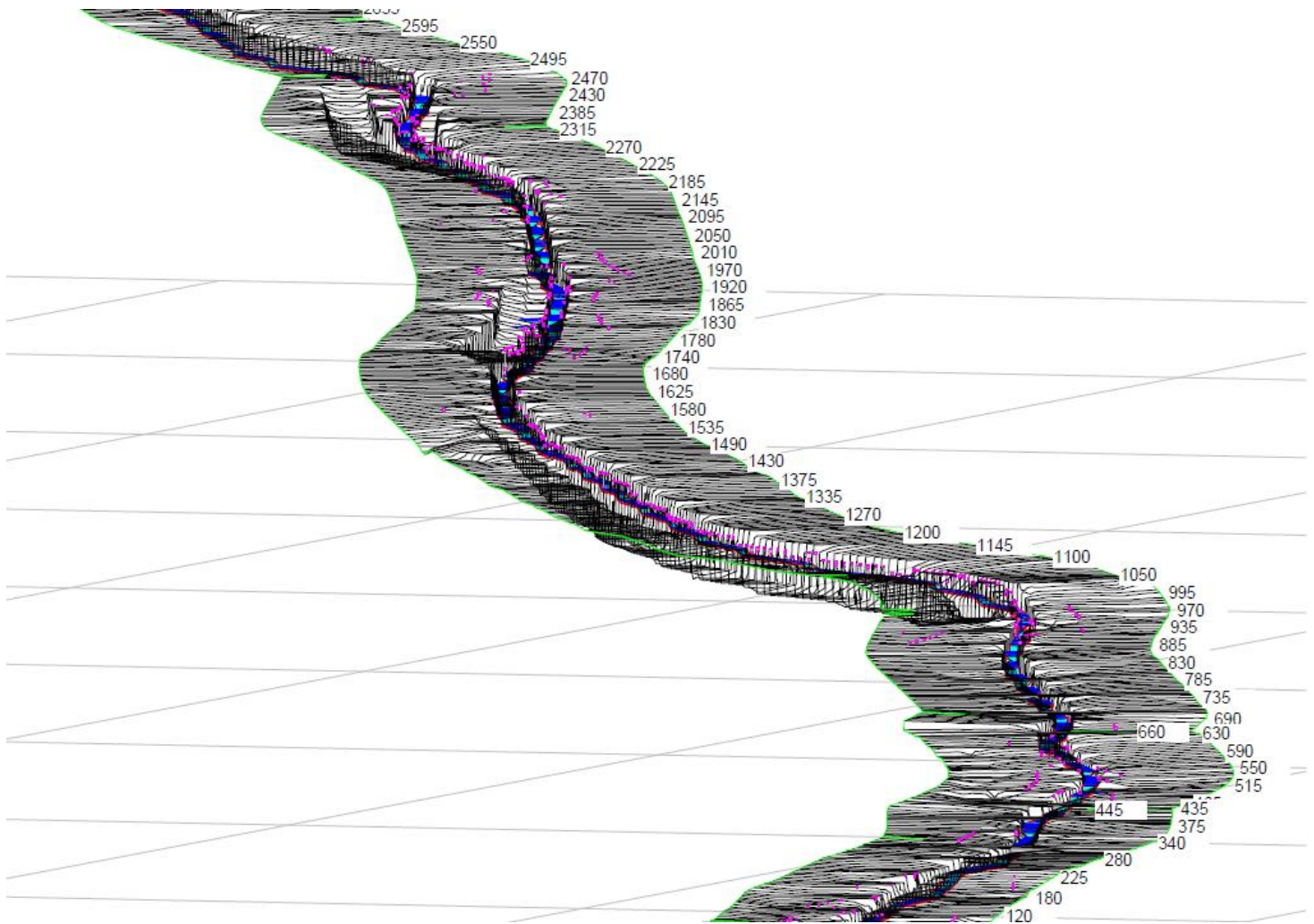
El estudio realizado de mecánica de suelos en la cuenca media de la quebrada Venezuela donde se realizó las calicatas con una profundidad de 1.5 m (Tabla 10), muestran que la matriz está constituida en un mayor porcentaje de arenas con finos (**66.3 %**) sobre las gravas (**33.7 %**), a nivel de cimentación de suelos con SUCS=GP (**gravas con mala gradación**).

### 3.3.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Venezuela

Para la evaluación técnica de obras viales existentes en la torrentera Venezuela se realizó el modelamiento unidimensional (1D) con HEC – RAS, para determinar parámetros hidráulicos como: niveles de agua (**tirante**) (Figura 43) y velocidades máximas.

**Figura 43**

*Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Venezuela*



*Nota.* Simulación hidráulica en HEC-RAS de obras viales existentes en la torrentera Venezuela. Fuente: Elaboración Propia.

### 3.4 Torrentera Los Incas

Manrique et al. (2014) identificaron peligros por lahares o flujos de lodo (huaicos) y desbordes en caso de ocurrencia de lluvias intensas que podrían descender en las quebradas o torrenteras aguas abajo, afectando seriamente de flujo de lodo a viviendas ubicadas en el cauce de la quebrada Huarangal.

El informe técnico Nro. A7012 elaborado por el INGEMMET (2020), el distrito de Paucarpata se encuentra en zona de alto peligro por flujos de barro o lodo, avalanchas de escombros y/o flujo de lava (**volcán Misti**).

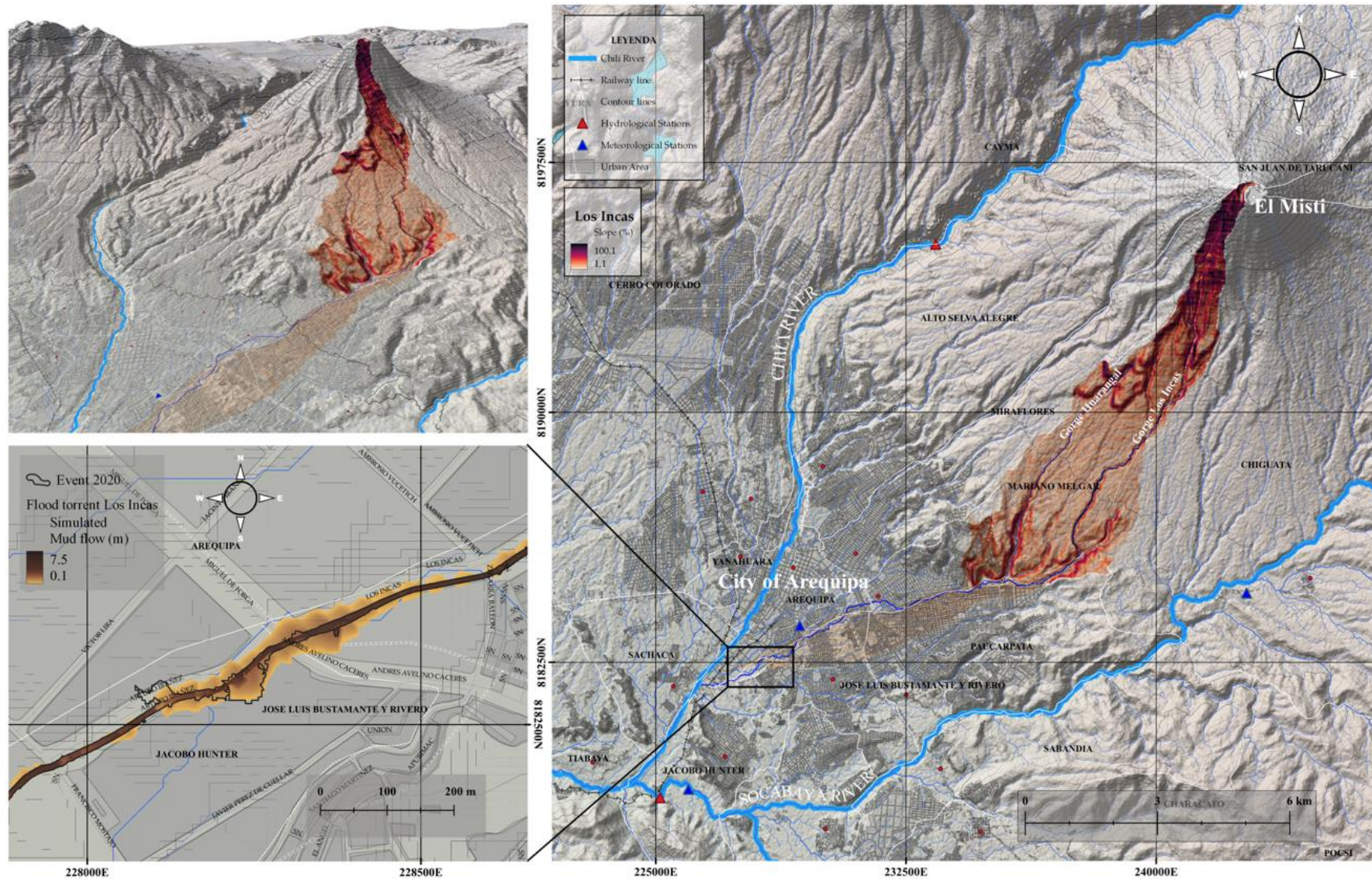
El informe técnico Nro. A7012 elaborado por el INGEMMET (2021), indica que la quebrada Buena Vista, del distrito de Paucarpata, es considerada de peligro muy alto por presentar reactivaciones de movimientos de masa, entre flujo de detritos (huaicos y/o lahares) por intensas lluvias.

De esta manera, a través de eventos históricos ocurridos y de simulaciones bidimensionales en HEC - RAS con la parametrización de “Suelo Típico” y el modelo reológico O’Brien Equation (**Quadratic**) para flujos de lodo y escombros ( $C_v > 60\%$ ) se elaboró el mapa de niveles de agua (**tirantes**) en la torrentera Los Incas para un periodo de retorno de 100 años (Figura 44).



**Figura 44**

*Simulación Bidimensional de Flujo no Newtoniano - Torrentera Los Incas*



*Nota.* Mapa de inundación, para un periodo de retorno de 100 años, utilizando el modelo numérico HEC-RAS. Fuente: Elaboración Propia.

La quebrada Los Incas se delimito hasta la confluencia del rio Chili, presentando un área de drenaje (**A**) de 41.3 Km<sup>2</sup>, un perímetro (**P**) de 39.1 Km y una diferencia altitudinal (**DA**) de 3576.4 m, respecto a sus parámetros de forma la quebrada presenta un índice de compacidad o Gravelius (**C<sub>g</sub>**) de 2.9 y longitudes de rectángulo equivalente de 31.5 y 1.4 Km (**lado mayor y menor**) (Tabla 5), lo que sugiere una cuenca alargada (**probabilidad baja de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta**), se espera una respuesta hidrológica inmediata. En cuanto a los parámetros de relieve, se halló que la longitud del cauce principal (**L**) es de 27.1 Km, una pendiente media de cuenca (**j**) y de cauce principal (**J**) de 19.4 % (Tabla 6) y 13.0 % (Figura 24) respectivamente, estas características corresponden a relieves fuertemente accidentados o empinados, lo que sugiere peligro extremo de erosión de suelos (CENEPRED, 2014) y gran capacidad de transporte de sedimentos en época de avenidas.

La curva hipsométrica de la cuenca representa el área de drenaje con relación a su altitud (Figura 18), se encontró que más del 60 % del área de drenaje se encuentra por encima de los 2882.6 m.s.n.m. y su altitud media de 3046.3 m.s.n.m. Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su curva hipsométrica (Figura 18) sugiere una cuenca en estado de equilibrio (**Curva B**) (Tabla 6).

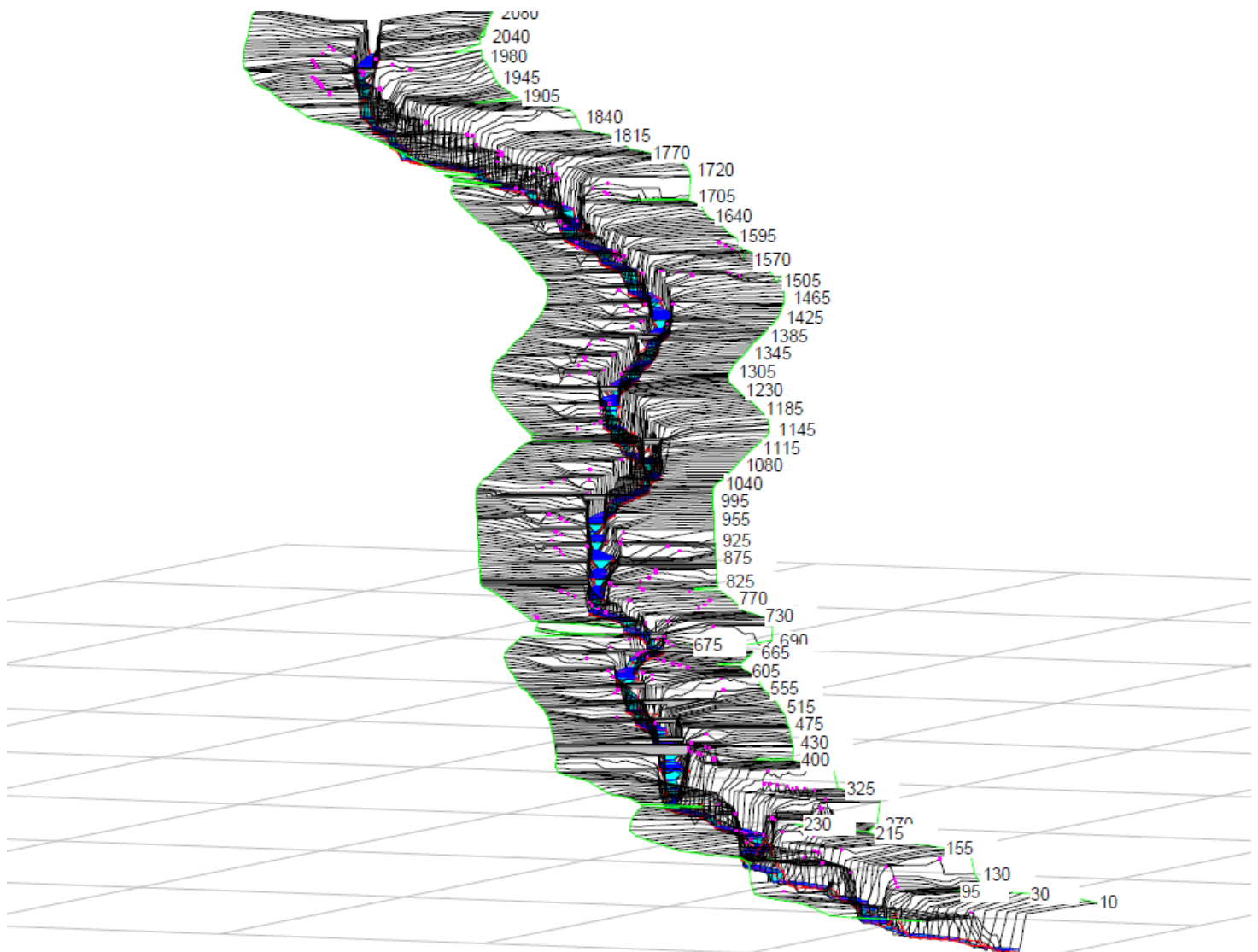
El estudio realizado de mecánica de suelos en la cuenca media de la quebrada Los Incas donde se realizó las calicatas con una profundidad de 1.5 m (Tabla 10), muestran que la matriz está constituida en un mayor porcentaje de arenas con finos (**78.0 %**) sobre las gravas (**22.0 %**), a nivel de cimentación de suelos con SUCS=GP (**gravas con mala gradación**).

#### 3.4.1 Evaluación de obras viales - Torrentera Los Incas

Para la evaluación técnica de obras viales existentes en la torrentera Los Incas se realizó el modelamiento unidimensional (1D) con HEC – RAS, para determinar parámetros hidráulicos como: niveles de agua (**tirante**) (Figura 45) y velocidades máximas.

**Figura 45**

*Modelo Hidráulico Unidimensional (1D) - Vista 3D - Torrentera Los Incas*



*Nota.* Simulación hidráulica en HEC-RAS de obras viales existentes en la torrentera Los Incas. Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 19**

*Puntuación de Evaluación de Vulnerabilidad de los Puentes Viales y Peatonales de las Torrenteras Del Pato, San Lázaro y Venezuela*

ID	Pdp-02	Pdp-03	PsL-01	PsL-02	PsL-03	PsL-04	PsL-05	PsL-06	PsL-07	PsL-08	PsL-09	PsL-10	Pve-01	Pve-02	Pve-03	Pve-04	Pve-05	Pve-06	Pve-07	Pve-08	Pve-09	Pve-10	Pve-11	Pve-12	Pve-13	Pve-14	Pve-15	Pve-16	Pve-17	Pve-18	Pve-19	Pve-20	Pve-21	Pve-22	Pve-23	Pve-24	Pve-25	Pve-26	
A1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
A2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A3	5	5	2	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
T1	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
T2	4	4	2	2	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	3	2	2	2	3	2	2	3	2	2	2	3	4	2	2	2	2	3	3	3	3	
T3	5	5	3	3	3	5	4	4	4	3	3	3	3	3	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	
T4	4	5	4	4	4	5	1	1	1	1	2	2	5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3
T5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
T6	4	4	3	4	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	4	4	
S1	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	1	1	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
S2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S4	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E1	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
E2	2	2	3	4	4	4	4	5	4	4	4	4	3	3	3	3	1	4	1	1	1	4	1	1	4	1	1	1	3	3	1	1	1	3	4	1	1	1	
E3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
E4	3	3	1	2	1	5	1	1	1	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1

*Nota.* La tabla muestra la puntuación de los puentes viales y peatonales de las torrenteras Del Pato, San Lázaro y Los Incas.

**Tabla 20**  
*Puntuación de Evaluación de Vulnerabilidad de los Puentes Viales y Peatonales de la Torrentera Los Incas*

ID	Pli-01	Pli-02	Pli-03	Pli-04	Pli-05	Pli-06	Pli-07	Pli-08	Pli-09	Pli-10	Pli-11	Pli-12	Pli-13	Pli-14	Pli-15	Pli-16	Pli-17	Pli-18	Pli-19	Pli-20	Pli-21
A1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
A3	3	3	3	3	1	1	1	1	3	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
T1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T2	3	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4	4
T5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
T6	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5
S1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
S2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
S4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
E2	4	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	3	5	1	1	1	1	1	1	5	5
E3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E4	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	2	1

Nota. La tabla muestra la puntuación de los puentes viales y peatonales de la torrentera Los Incas.

### 3.5 Mitigación

#### 3.5.1 Planteamiento de alternativas técnicas

Según Shen et al. (2018) la relación entre los procesos de erosión, transporte y deposición de flujos de escombros es la base de la evaluación del peligro a través de la variabilidad espacial de las propiedades mecánicas de los depósitos de sedimentos en zonas afectadas. Los resultados en la torrentera (**simulaciones**) para la parametrización de “*Suelo Típico*” con los modelos de Bingham y O’Brien Equation (**Quadratic**) para flujos hiperconcentrados ( $C_v > 30$ ), lodo y escombros ( $C_v > 60\%$ ) por medio de eventos históricos suscitados como fue el año 2020, sobreestimaron la llanura aluvial. Sin embargo, dada la incertidumbre y la sensibilidad de los parámetros de calibración (Gibson et al., 2022), muestran resultados acordes a zonas de peligro por inundación en la ciudad de Arequipa (Figuras 2-8) con el modelo numérico HEC - RAS.

Se evaluaron 03 puntos críticos en la quebrada Del Pato, presentando velocidades altas ( $> 3$  m/s) en el punto Pdp-01 (**Baden existente**), indicando erosión y comprometiendo la estructura. Se plantea una caída escalonada para la disipación de energía, reduciendo de esta manera las velocidades. Los puntos Pdp-02 y Pdp-03 (**puentes de mampostería**) presentan altas velocidades ( $> 3$  m/s) y tirantes máximos debido a la contracción del cauce, evidenciando una **ALTA** vulnerabilidad hidrológica e hidráulica debido a flujo de lodo y escombros (**huaicos**), se recomienda la descolmatación del cauce tanto aguas arriba como aguas debajo de los puntos de estudio.

Se evaluaron 10 puntos críticos en la quebrada San Lázaro, presentando velocidades erosivas ( $> 3$  m/s) por tránsitos de avenidas, para diferentes escenarios. También, se presenta desbordes e inundaciones con una **ALTA** vulnerabilidad en los puntos Psl-02 (**puente Cahuide**), Psl-03, Psl-04, Psl-05, Psl-06 y desbordes por tirantes máximos en la Av. Juan de la Torre. Se propone calzaduras como medidas de protección ante erosión y socavación.

Se evaluaron 26 puntos críticos en la quebrada Venezuela, presentando desbordes e inundaciones por la margen derecha e izquierda del cauce de la torrentera. Los puntos críticos presentan una **ALTA** vulnerabilidad hidrológica e hidráulica como el punto Pve-01 de la Av. C18/Puente Santa Rita, además la presencia de erosión y socavación del punto Pve-24 (**puente ferrocarril**).

Se evaluaron 21 puntos críticos en la quebrada Los Incas, presentando zonas de potencial erosión y socavación, además por desbordes en las márgenes derecha e izquierda de la torrentera. Se evidencio puntos de **ALTA** vulnerabilidad hidrológica e hidráulica en los puntos Pli-13 (**ovalo Av. Los Incas**), Pli-14 (**Terminal Terrestre**), Pli-15 (**Terrapuerto**). Además, altas velocidades ( $> 3 \text{ m/s}$ ) en el punto Pli-21 (**punto de la Av. Alfonso Ugarte**). Se recomienda tomar medidas estructurales de protección tanto en la margen derecha e izquierda.

Las medidas de gestión de riesgos que se propone como resultado del estudio son la construcción de infraestructuras, con diseños adecuados y acorde a las características de la ciudad de Arequipa. La integración institucional y la sensibilización de la población es fundamental por la ocurrencia eventos hidrometeorológicos extremos. De esta manera, es inexorable la implementación de planes de contingencia, sistemas de comunicación y sistemas de alerta temprana.

## DISCUSIÓN

El río Chili hace su ingreso a la ciudad de Arequipa por medio de un sistema regulado de represas desde las nacientes denominado cuenca hidrográfica Quilca – Chili, regulando el caudal. No obstante, en época de lluvia (**enero, febrero y marzo**) el caudal se incrementa por la activación de las principales quebradas efímeras en la margen izquierda de la ciudad y que confluyen hacia el afluente (**rio Chili**).

Los modelos digitales de elevación (**DEM**) son fundamentales para diversas aplicaciones, especialmente para estudios respecto a geociencias. Los datos de elevación global contienen aspectos forestales y de construcción que limitan su aplicación (Hawker et al., 2022). Para la obtención de parámetros morfométricos de las quebradas de estudio se ha utilizado FAB-DEM (**30 m**), porque se requieren alturas precisas del terreno, sin edificios y/o bosques del modelo digital de elevación, para la delimitación de cuencas urbanas (Figura 15) de la ciudad de Arequipa.

Se determino que las estaciones más representativas para el estudio de las quebradas fueron La Pampilla y Chiguata por el método de los polígonos de Voronoi, con la finalidad de determinar una precipitación máxima probable con una baja probabilidad, normalmente relacionados a un periodo de retorno de  $T=100$  años (Mazer et al., 2020). La longitud del registro de precipitación máxima de 24 horas para el análisis de frecuencia fue de 43 años (**1981 – 2023**) (Figuras 16-17) y la determinación de mejor ajuste con una

prueba no paramétrica de bondad de ajuste Smirnov – Kolmogorov con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ , resultando que la función empírica California, Weibull y la teórica Pearson III, Gumbel son las de mejor ajuste (Figuras 22-23). Se utilizó la distribución de tormentas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos [NRCS]. Balbastre-Soldevila et al. (2019) compararon tormentas de diseño como entrada a un modelo calibrado de lluvia – escorrentía en la ciudad de Valencia (**España**), para el diseño de infraestructuras urbanas, encontrando que los hietogramas obtenidos de la curva de 6 horas del NRCS no serían adecuados. No obstante, Quijada (2020) caracterizó eventos de tormenta pluviométricas para el diseño hidráulico a nivel nacional (**Perú**), encontrando que la duración de tormenta en la ciudad de Arequipa varía de 8.0 a 12.0 horas. De esta manera, para el presente estudio se utilizó la distribución de tormenta SCS-II para duraciones de tormenta de 6 y 24 horas. Los parámetros de ingreso al modelo numérico HEC – HMS (Tabla 7) permitieron encontrar hidrogramas líquidos producto de la precipitación (Tabla 8) para diferentes periodos de retorno y luego realizar las simulaciones unidimensionales (**1D**) y bidimensionales (**2D**) de flujos no newtonianos en los cauces de las torrenteras con el modelo numérico HEC – RAS (Figuras 38, 40, 42, 44).

La calibración se realizó teniendo en cuenta las precipitaciones máximas registradas (**1981 - 2023**) que desencadenaron en eventos históricos en la ciudad de Arequipa: 1995, 1997, 2001, 2002, 2008, 2012, 2015, 2016 y 2020, como un fenómeno meteorológico adverso, entendido en términos estadísticos como menos probable. Cruz (2009) analizó el evento del 25 de febrero de 1997 de la torrentera Huarangal que generó inundación, una de las más dramáticas en mucho tiempo. Martelli (2011) resumió nueve eventos que causaron daños a la ciudad de Arequipa en función de escenarios de inundación recurrentes de 5 a 10 años. No obstante, la calibración del modelo hidráulico se realizó para un periodo de retorno de  $TR=5$  años, según el análisis de umbrales de precipitación con el indicador de “*extremadamente lluvioso*” a través de eventos históricos que se han producido en la ciudad de Arequipa, afectando a las infraestructuras presentes en los cauces desde un punto de vista ingenieril (Ccanccapa et al., 2024).

Las quebradas estudiadas se caracterizan por ser secas durante casi todo el año, ya que solo se activan en periodos de lluvia de alta intensidad u ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, como fue el año 2020, denominador común en el nivel de cota de

agua debajo de la losa del tablero de las infraestructuras presentes (Figura 46) en los cauces canalizados y revestidos.

### Figura 46

*Infraestructuras presentes en los cauces de las diferentes Torrenteras*



*Nota.* La figura muestra infraestructuras presentes en el cauce de las diferentes torrenteras A) Torrentera El Pato (Puente s/n). B) Torrentera San Lázaro (Av. Juan de la Torre). C) Torrentera Venezuela (El Palomar). D) Torrentera los Incas (Terminal Terrestre).

El desarrolló del modelo hidráulico unidimensional (**1D**) en HEC – RAS (Figuras 39, 41, 43, 45) ha demostrado generar resultados representativos respecto a las amenazas de inundación en entornos urbanos con cauces definidos y rectos (Lamb et al., 2017; Martínez et al., 2023). La simulación hidráulica consideró las condiciones de contorno o frontera, coeficientes de contracción (**0.3**) y expansión (**0.5**) y coeficientes de Manning por el método de Cowan (Chow, 1994). Se tuvo en cuenta dos criterios hidráulicos para realizar la simulación (Figuras 39, 41, 43, 45). Primero para el flujo bajo, se utilizaron los métodos de ecuación de energía, ecuación de cantidad de movimiento o momentum con coeficiente de dragado (**Cd=1.33**) por ser pilares alargados con extremos semicirculares y la ecuación de Yarnell por ser pilares de forma semicircular (**K=0.9**). Segundo, para flujo alto el método presión y/o vertedero con un coeficiente sumergido de ingreso y salida de 0.8.

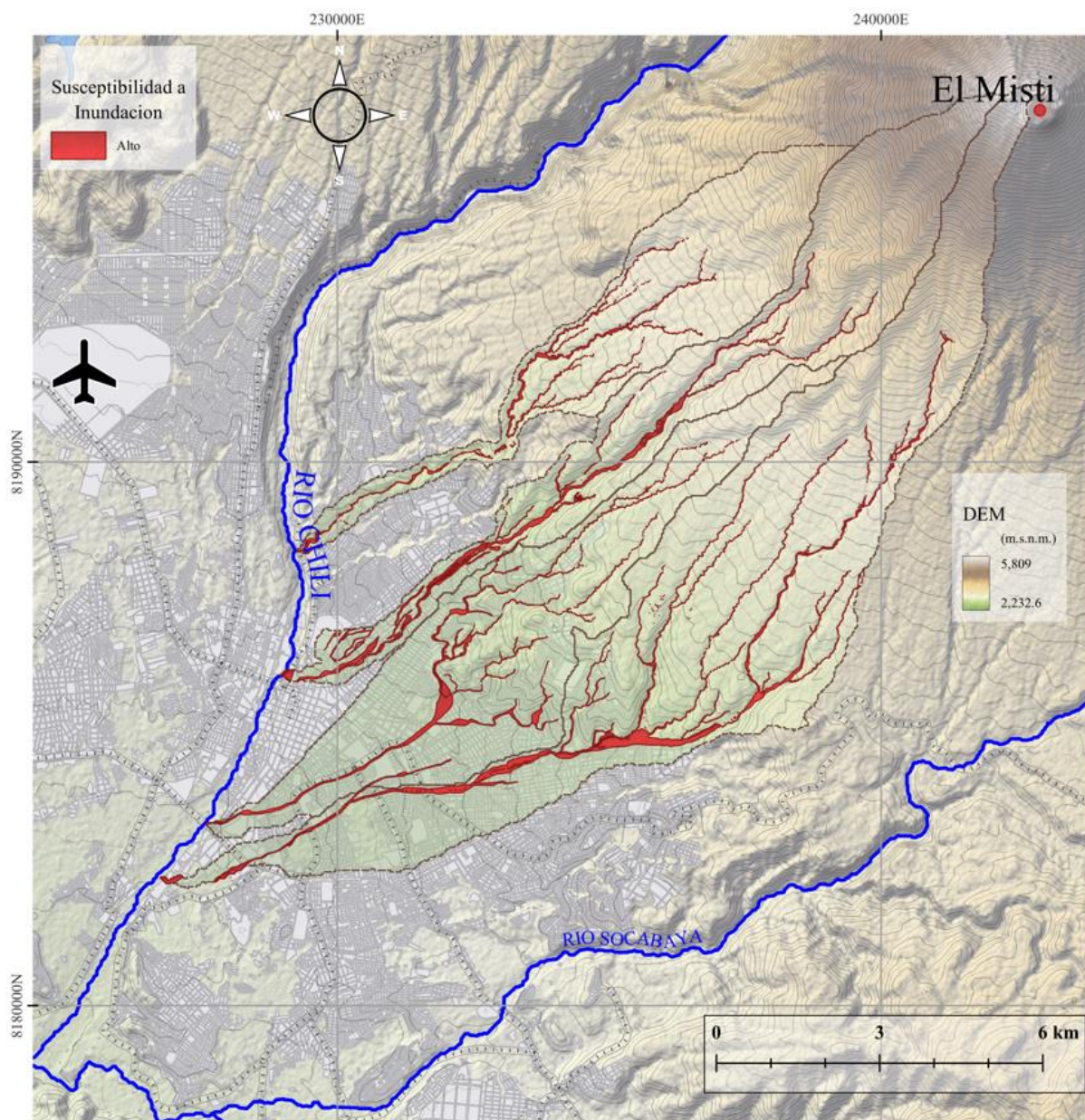
El Manual para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales (2014), se elaboró con la finalidad de contribuir a prevenir y/o a reducir los impactos

negativos que puedan ocasionar los desastres en lo concerniente a lo social, económico y ambiental, como una herramienta básica para la Gestión de Riesgo de Desastre. El manual menciona también que, para la identificación de peligros generados por fenómenos de origen hidrometeorológico como las inundaciones, su evaluación requiere de parámetros en geología (Figura 25), geomorfología (Figura 27), meteorología (Figura 14), hidrología (Tabla 8) e hidrografía (Figura 15) para generar un mapa de peligrosidad a través de un flujograma: **(a)** recopilación de información, **(b)** identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio, **(c)** parámetros de evaluación del fenómeno, **(d)** análisis de la susceptibilidad, **(e)** análisis de elementos expuestos en zonas susceptibles, **(f)** definición de escenarios **(g)** estratificación del nivel de peligrosidad de acuerdo a umbrales, **(h)** niveles de peligrosidad, **(i)** elaboración del mapa del nivel de peligrosidad.

La Organización de las Naciones Unidas [ONU] (2014), define el “*peligro*” como el grado de amenaza para lugares o asentamientos humanos por los fenómenos desfavorables en un periodo de tiempo dado. De tal manera, el estudio elaborado por el INGEMMET (2021), denominado “*Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa*” muestra la susceptibilidad a inundaciones y erosión fluvial (Figura 47).

**Figura 47**

*Susceptibilidad a Inundaciones y Erosión Fluvial en Quebradas de Estudio*



*Nota.* La figura muestra el peligro alto que afecta a la ciudad de Arequipa como las inundaciones. Fuente: Elaboración Propia.

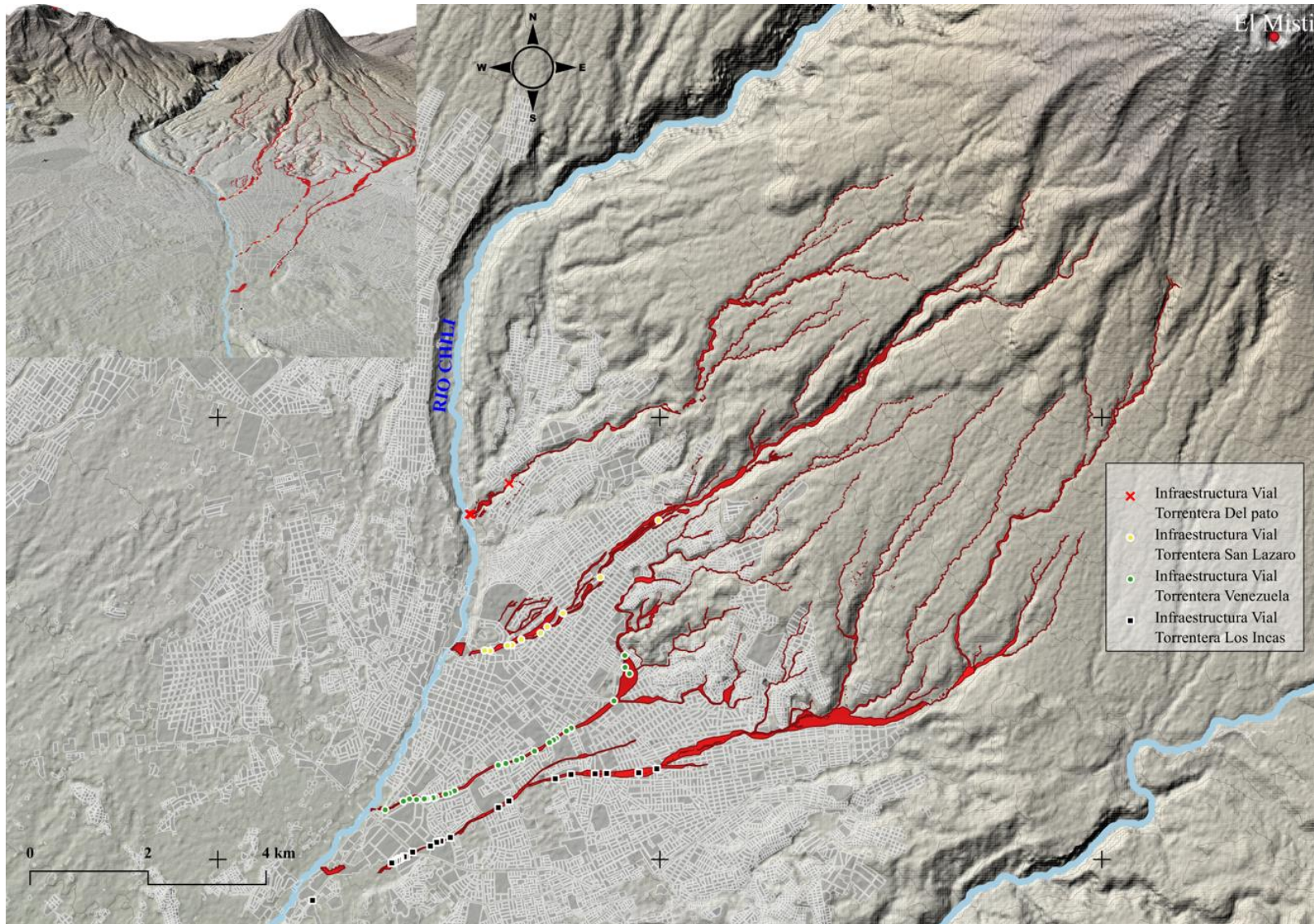
No obstante, se puede observar (Figura 47) que el análisis realizado por el INGEMMET muestra áreas de inundación que sobreestiman la llanura aluvial de las torrenteras de la ciudad, propios de la metodología utilizada de manera cualitativa debido a la inexistencia de información de registros históricos, estadísticos, estudios técnicos, etc., sobre el fenómeno de origen natural de las cuencas. En consecuencia, este estudio

propone una metodología de evaluación del peligro en función de los niveles de agua (**tirantes**) y velocidades máximas para determinar el peligro con una matriz de riesgo en el cual se combinó altura/velocidad del flujo, representando la hidrostática y la fuerza hidrodinámica como la acción erosiva del agua (**ANEXOS**) frente a una máxima avenida, se utilizó el software QGIS como herramienta SIG (**Sistema de información Geográfica**).

Los mapas de peligro (**ANEXOS**) permiten establecer el nivel de intensidad de peligro, en términos del producto de la altura máxima de flujo  $h$  (**m**) y la velocidad máxima  $v$  (**m/s**), con la finalidad contribuir, prevenir y reducir los impactos negativos por eventos hidrometeorológicos para la gestión de riesgo de desastres de la ciudad de Arequipa.

Estudios recientes plantean métodos de evaluación de puentes (**obras viales**) en cauces de río que incluyen enfoques multidimensionales con parámetros de evaluación. Sin embargo, existe una brecha del conocimiento respecto a la evaluación hidrológica de puentes que incluyan modelos más representativos, como los modelos 2D. Esta investigación contribuye a cerrar dicha brecha mediante un análisis exhaustivo de las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas. Primero, en base a una exhaustiva revisión de literatura, y la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos para diferentes escenarios.

El análisis de vulnerabilidad multicriterio de 60 obras viales existentes (**puntos críticos**) (Figura 48) en base a la literatura revisada encontró que las infraestructuras presentan una **ALTA** vulnerabilidad frente a eventos extremos (**inundaciones**).

**Figura 48***Identificación de Obras Viales Existentes en las Torrenteras de Estudio*

*Nota.* La figura muestra la identificación de puntos críticos (Puentes viales y/o peatonales) de la ciudad de Arequipa. Fuente: Elaboración Propia.

Maidier (2021) realizó simulaciones para evaluar el peligro que afecta a las poblaciones que se encuentran en la vertiente de la laguna 513 (**Cordillera Blanca, Perú**) con RAMMS y HEC – RAS. De igual manera, Martínez et al (2023a); Asencios (2020) y Asencios et al. (2020) evidencian la importancia de realizar simulaciones numéricas en quebradas de alto riesgo por inundaciones y sobre todo el análisis de sensibilidad de los resultados a través de huellas hídricas dejadas por eventos históricos. En consecuencia, los resultados muestran tirantes y velocidades críticas (**ANEXOS**), produciendo socavación y erosión en los cauces bajo análisis, además de zonas de desborde e inundación provocadas por precipitaciones máximas o extremas que se hacen cada vez más frecuentes.

El análisis de vulnerabilidad multicriterio en la dimensión ambiental evidencia una **ALTA** vulnerabilidad de las torrenteras de estudio, por el incremento de las temperaturas y concentraciones de metales (**B, Cu, Fe, Mn y Zn**) superiores a los estándares peruanos (Martínez et al., 2023b) a través de análisis químicos que se analizaron en aguas pluviales de la ciudad de Arequipa.

El análisis de vulnerabilidad multicriterio en la dimensión técnica evidencia una **ALTA** vulnerabilidad de las torrenteras de estudio, principalmente por el nivel de agua (**tirante**) que alcanzan o superan las cotas mínimas de los tableros de los puentes viales y/o peatonales de la ciudad, como también velocidades superiores a los 3 m/s provocando erosión y socavación.

El análisis de vulnerabilidad multicriterio en la dimensión social evidencia una **ALTA** vulnerabilidad de las torrenteras de estudio, por la inexistencia de programas de capacitación y prevención de riesgos de desastre por parte de entidades locales y regionales sobre eventos extremos.

## CONCLUSIONES

La guía del PMBOK bajo estándares del “*Project Management Institute*” (PMI), permitió gestionar los riesgos asociados a peligros hidrometeorológicos de las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas de la ciudad de Arequipa, para el análisis de obras viales existentes como los puentes viales y/o peatonales a través de áreas del conocimiento e identificar los daños, para definir medidas viables en los proyectos de inversión pública (PIP).

Se determinó el peligro de inundaciones a través de la caracterización de las precipitaciones máximas de 24 horas (**lluvias extremas**) de la estación La Pampilla entre 1981 – 2023 (**15,705 datos**), permitiendo determinar un umbral de “*extremadamente lluvioso*” (**percentil 99**) que se presenta aproximadamente cada 5 años en la ciudad de Arequipa, como eventos desencadenantes a movimientos rápidos de masa (**flujos no newtonianos**) como fueron los años 1995, 1997, 2001, 2008, 2012, 2013, 2015, 2016 y 2020.

Se determinó la vulnerabilidad frente a inundaciones de las infraestructuras presentes en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas, bajo simulaciones hidráulicas bidimensionales (**2D**) con la parametrización de “*Suelo Típico*” y “*modelos reológicos*” de Bingham y O’Brien Equation (**Quadratic**) mediante 05 escenarios que se plantearon con periodos de retorno de  $T=5, 25, 50, 100$  y  $200$  años, que evidenciaron una **ALTA** vulnerabilidad (**puntuación promedio entre 3 y 4 de 5**) en las dimensiones ambiental, técnica y social a través del análisis multicriterio realizado.

El análisis cualitativo de riesgos implica el conocimiento de los peligros basado en la experiencia y observaciones de campo. No obstante, se requiere de registros históricos, estadísticos y técnicos sobre eventos extremos de origen natural como las inundaciones, para la evaluación de riesgos (**análisis cuantitativo**), en áreas del conocimiento de manera técnico científicas. De esta manera, se identificó un peligro **MUY ALTO** en los cauces de las torrenteras por movimientos rápidos de masa (**flujo de lodo y escombros**).

## RECOMENDACIONES

La evaluación de frecuencia de caudales máximos en la ciudad de Arequipa, a través de umbrales de precipitación extrema, muestran que es necesario intervenir las infraestructuras existentes con inspecciones rutinarias, constantes estudios técnicos, mantenimiento y un esfuerzo de mitigación frente a la amenaza más crítica al que está expuesta (**erosión y socavación**) como medidas estructurales.

La concentración volumétrica (**Cv**) tiene un gran impacto entre el esfuerzo de cedencia ( $\tau_v$ ) y la viscosidad dinámica ( $\mu_r$ ), tal como se evidencia en el análisis de sensibilidad realizado en el presente estudio por medio de la taxonomía en HEC - RAS. De esta manera es crucial estimar la producción de sedimentos de las quebradas cuando se presentan lluvias extremas. No obstante, las quebradas de estudio no cuentan con mediciones de agua ni sedimentos. Sin embargo, se calibro el modelo hidráulico por huella hídrica dejada por eventos históricos como fue el año 2020, a través de simulaciones hidráulicas bidimensionales (**2D**) con la parametrización de “*Suelo Típico*” y modelos reológicos de “*Bingham*” y “*O'Brien Equation (Quadratic)*” para flujos hiperconcentrados, de lodo y escombros. De esta manera, se recomienda la utilización de datos LiDAR, antes y después del evento, como método de teledetección o análisis SIG (**Sistemas de Información Geográfica**).

La vulnerabilidad en los puentes viales y/o peatonales de las diferentes torrenteras de estudio, se determinaron como **ALTA**. De esta manera, se plantearon recomendaciones estratégicas de conservación (**mitigación**), entre las cuales están implementar un sistema de gestión de riesgos de desastres hidrológicos, utilizando Sistemas de Alerta Temprana (**SAT**) como los umbrales de precipitación máxima, la implementación de capacitaciones técnicas y manejo de residuos sólidos como medidas no estructurales.

De acuerdo con los análisis efectuados y la revisión de literatura, Arequipa es susceptible a la ocurrencia de flujos de lodo y escombros por depósitos sueltos de flancos del volcán Misti que drenan hacia las quebradas. Se recomienda realizar la monumentación de los hitos por parte de la Autoridad Nacional del Agua (**ANA**) en las partes altas de las quebradas a través de fajas marginales, para fomentar una herramienta de educación a la población, sobre los peligros de asentarse en zonas límites de ribera de

cauces ante eventos extremos y los diferentes entes gubernamentales (**Municipios y Gobierno Regional**) para una adecuada planificación territorial.

Finalmente, se puede decir que este estudio contribuye a una mejor comprensión y gestión de las infraestructuras, como los puentes viales y/o peatonales de la ciudad de Arequipa. Además, la metodología planteada se puede adaptar para el estudio de ciudades con similares características.



## REFERENCIAS

- Alfaro, L. (2014). Estimación de umbrales de precipitación extremas para la emisión de avisos meteorológicos. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/345>
- Arenas, J. (2019). Plan de Gestión para Mitigación de Riesgo por Inundación en el Sector Torrentera de Chullo (Urb. Mirasol de Cayma – Puente Concordia) Distrito de Cayma 2006 – 2017. [Tesis de postgrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Almeida, A., Quisca, S., Castillo, L. (2019). Numerical Simulation of Debris Flows of the Catastrophic Event of February 2019 in Mirave – Peru. *Revista Ambiente & Agua*. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2437>
- Ancco, K. (2020). Gestión y Sostenibilidad en Proyectos de Inversión de Adaptación y mitigación frente al Cambio Climático en la Periferia de Arequipa. [Tesis de postgrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Asencios, H. (2020). Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/478>
- Asencios, H., Millan, C., Rojas, E., Breña, J.C. (2020). Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebradas Santo Domingo y Cantuta. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/476>
- [ANA] Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Plan de gestión de los recursos hídricos de la cuenca Quilca – Chili*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/86>
- [ANA] Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>
- [ANA] Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Uso y Gestión de Fajas Marginales*. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4636>
- Balbastre, R., Garcia, R., Domenech, I.A. (2019). A Comparison of Design Storms for Urban Drainage System Applications. *Water*, 11(4), 757. <https://doi.org/10.3390/w11040757>
- Cacya, L., Meza, P., Carlotto, V., Mamani, L. (2013). Aluvión del 8 de febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. *Internacional Peligros Geológicos*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1132>
- Ccancapa, J., Hidalgo, V.A., Noriega, G.Y., Chávez, A.E. (2023). Flood risk management in the torrent of Los Incas in the city of Arequipa – Perú. *21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.376>
- Ccancapa, J., Hidalgo, V.A., Noriega, G.Y., Chávez, A.E., Marques M. (2024). Analysis and risk prevention due to floods in high-risk gorges in the city of Arequipa – Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 15(6). <https://doi.org/10.24850/j-tyca-15-6-4>

- Castillo, L. (2006). Aplicación de un modelo numérico de flujo de escombros y lodo en una quebrada en el Perú [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [CENEPRED] Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2014). *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales*.02 versión.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*.
- Clarke, B., Otto, F., Jones, R. (2023). When don't we need a new extreme event attribution study?. *Climatic Change*, 176(60). <https://doi.org/10.1007/s10584-023-03521-4>
- Cruz, R. (2009). Gestión del riesgo por inundación en asentamientos populares, distrito de Mariano Melgar, Arequipa.
- Cruz, R. (2021). Fomento de la residencia o reducción de la vulnerabilidad. Un estudio de la correlación entre estos dos conceptos en los asentamientos populares en riesgo de inundación de Arequipa. Caso de estudio: Torrentera El Guarangal. [Tesis de postgrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Cueva, K., Arias, C., Cuno, J., Mariño, J., Manrique, N. (2021). Informe de Evaluación de Riesgos en el Ámbito de Influencia del Volcán Misti en las Partes Altas del Distrito de Alto Selva Alegre, Arequipa. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3127>
- Daga, J., Chamorro, A., de Solminihac, H., Echaveguren, T. (2018). Development of fragility curves for road bridges exposed to volcanic lahars. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 18(8), 2111-2125. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2111-2018>
- El Búho (2021, marzo 28). Hace 20 años El problema de las torrenteras y alcantarillado pluvial en Arequipa. El Búho. <https://elbuho.pe/2021/03/hace20anos-el-problema-de-las-torrenteras-y-alcantarillado-pluvial-en-arequipa/>
- Endara, S. (2017). Determinación de extremos a precipitación a partir de PISCO diario. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/955>
- Espinoza, A.J., Booker, J. (2023a). Building national disaster resilience: assessment of ENSO-driven disasters in Peru. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 14(4), 423-433. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-10-2022-0102>
- Espinoza, A.J., Booker, J. (2023b). Hydrological Vulnerability Assessment of Riverine Bridges: The Bajo Grau Bridge Case Study. *Water*, 15(5), 846. <https://doi.org/10.3390/w15050846>
- Ettinger, S., Mounaudb, L., Magill, C., Lafourcade, A.F., Thouret J.C., Manville, V., Negulescu C., Zuccaro G., De Gregorio, D., Nardone, S., Uchuchoque, J.A., Arguedas, A., Macedo, L. and Manrique, N. (2015). Building vulnerability to

- hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*. (541) 563-581. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>
- Gibson, S., Floyd, I., Sánchez, A., Heath, R. (2020). Comparing single- phase, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flows in HEC-RAS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15(3), 540-553. <https://doi.org/10.1002/esp.5044>
- Gibson, S., Sánchez, A. (2021). HEC-RAS Mud and Debris Flow: User and Technical Reference Manual v6.1.
- Gibson, S., Zandonadi, L., Ackerman, C., Ortman, N., Amorim, R., Floyd, I., Eom, M., Creech, C., Sánchez A. (2022). Prototype Scale Evaluation of Non-Newtonian Algorithms in HEC-RAS: Mud and Debris Flow Case Studies of Santa Barbara and Brumadinho. *Geosciences*, 12(3), 134. <https://doi.org/10.3390/geosciences12030134>
- Gonzales, R. (2022). Modelo de Recuperación de la Torrentera Miraflores -Venezuela, como Espacio Público Urbano - Ambiental, Arequipa [Tesis de postgrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- How climate change alters the water cycle. *Nature Water* 1, 485 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00104-6>
- Huarca, A., Espinoza A.J., Booker, J. (2023). Prioritizing Riverine Bridge Interventions: A Hydrological and Multidimensional Approach. *Designs*, 7(5), 117. <https://doi.org/10.3390/designs7050117>
- [INDECI] Instituto Nacional de Defensa Civil. (2017). *Compendio Estadístico del INDECI 2017 Gestión Reactiva*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1048401/20180227171454120200726-15599-1ptpifw.pdf>
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2019). *Identificación de peligros geológicos en la Urbanización La Galaxia Zona B. Región y provincia de Arequipa, Distrito Miraflores*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2062>
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2021). *Flujo de Detritos (Huaicos) en la Quebrada Buena Vista en el paraje Pozo Negro, del distrito Paucarpata, provincia y departamento de Arequipa*.
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2019). *Inspección por Impactos de Lahares en la Quebrada de San lázaro Arequipa*.
- [INEI] Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Arequipa alberga a 1 millón 301 mil habitantes a los 476 años de su creación política*.

<https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-301-mil-habitantes-a-los-476-anos-de-su-creacion-politica-9246/>

- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2019). *Informe sobre la Existencia de Fallas Geológicas activas en el Distrito de Selva Alegre, Provincia y Región de Arequipa*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2160>
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2019). *Evaluación de Peligro Geológicos en la Quebrada El Pato, Tramo Villa Confraternidad (Zonas A, B, C y D). Región Arequipa, provincia Arequipa, Distrito Alto Selva Alegre*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2233>
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2020). *Evaluación de Peligros Geológicos en el Distrito de Paucarpata. Región Arequipa*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2584>
- [INGEMMET] Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2020). *Evaluación de Peligros Geológicos en el Distrito de Alto Selva Alegre*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2583>
- Lamb, R., Aspinall, W., Odbert, H., Wagener, T. (2017). Vulnerability of bridges to scour: insights from an international expert elicitation workshop. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1393-1409. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1393-2017>
- Lousada, S., Alves, R., Fernandes, M., Gonsaves, L. (2023). Hydraulic Planning in Insular Urban Territories: The Case of Madeira Island—São João Stream, Funchal, Portugal. *Water*, 15(11), 2075. <https://doi.org/10.3390/w15112075>
- Macedo, L., Cueva, K., Cuno, J. (2017). Inspección Geológica Asociación de Vivienda Nuevo Amanecer. Distrito Selva Alegre, Provincia Arequipa, Región Arequipa INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/805>
- Maidier, A. (2021). Ensayo de simulaciones numéricas para la prevención de desastres en la laguna 513 (Cordillera Blanca, Perú) [Tesis de postgrado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Manrique, N., Rivera, M., Macedo, L. (2014). Evaluación de los Peligros Geológicos en Sector Paucarpata. INGEMMET.
- Martinez, R.A., Alvarez, M., Rodriguez, Y., Lazaro, C., Jimenez, J., da Silva, L.d.D.J., Gonzalez, L. (2023a). Simulating the Flood Limits of Urban Rivers Embedded in the Populated City of Santa Clara, Cuba. *Water*, 15(10), 1805. <https://doi.org/10.3390/w15101805>
- Martinez, G., Garcia-Chevesich, P., Guillen, M., Tejada-Purizcana, T., Martinez, K., Ticona, S., Novoa, H., Crespo, J., Holley, E., McCray, J. (2023b). Urban Stormwater Quality in Arequipa, Southern Peru: An Initial Assessment. *Water*, 16 (1) 108. <https://doi.org/10.3390/w16010108>

- Martelli, K. (2011). The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and flash floods: application to the case study of Arequipa, Peru [Tesis de doctorado, Université Blaise Pascal].
- Mazer, K.E., Tomasek, A.A., Daneshvar, F., Bocardo Delgado, E.F., Bowling, L.C., Frankenberger, J.R., McMillan, S.K., Novoa, H.M., Zaballo-Velarde, C.R. (2021). Integrated Hydrologic and Hydraulic Analysis of Torrential Flood Hazard in Arequipa, Peru. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 171, 93–110. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2020.3347.x>
- Méndez, R. (2015, 27 de noviembre). Realizan simulacro de inundación en Arequipa por colapso de represa. *Andina*.  
<https://andina.pe/agencia/noticia-realizan-simulacro-inundacion-arequipa-colapso-represa-586825.aspx>
- [MINAM] Ministerio del Ambiente. (2018). *Mapa de Geología a nivel Meso de la Zonificación Ecológica Económica, Región Arequipa*.  
<https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/arequipa/>
- Municipalidad Distrital de Miraflores. (2021). *Plan de prevención y Reducción del Riesgo de Desastres en el Distrito de Miraflores, Arequipa*.
- Núñez, H., Peñalva, J. (2016). Identificación de vulnerabilidades, gestión de riesgos de inundación y adaptación al cambio climático en el Cono Norte de Arequipa.
- [ONU] Organización de Naciones Unidas. (2014). *Manual para la Evaluación de Desastres*.
- Pregolato, M., Winter, A.O., Mascarenas, D., Sen, A.D., Bates, P., Motley, M.R. (2022). Assessing flooding impact to riverine bridges: an integrated analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1559-1576  
<https://doi.org/10.5194/nhess-22-1559-2022>
- [PMI] Project Management Institute. (2021). *Guía de los fundamentos para la Dirección de Proyectos*. PMBOK – 7ma edición.
- Redacción Gestión. (2013, 14 de febrero). *Arequipa: Las pérdidas por inundaciones podrían superar los S/. 350 millones*. *Gestión*.  
<https://gestion.pe/economia/arequipa-perdidas-inundaciones-superar-s-350-millones-31633-noticia/>
- Quijada, N.V. (2020). Caracterización de eventos de tormenta pluviométricas de utilidad para el diseño hidráulico en el Perú. [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola].
- Rivera, M., Vélchez, M., Vela, J. (2018). Peligros por huaicos en la ciudad de Arequipa. Taller Internacional Fortalecimiento de capacidades para mitigar los impactos de huaicos en Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2589>
- Rivera, M., Cueva, K. (2017). Inspección Geológica de la Margen Izquierda del Río Chili Sector Parque Ecológico. Distrito Alto Selva Alegre, provincia Arequipa, Región Arequipa. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/812>

- Rivera, M. (2017). Evaluación de peligros volcánicos del Asentamiento Humano Las Canteras. Distrito Alto Selva Alegre, Provincia Arequipa, Región Arequipa. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/820>
- Roldan, F., Salazar I., Gonzalez, G., Roldan, W., Toro, N. (2022). Flow-Type Landslides Analysis in Arid Zones: Application in La Chimba Basin in Antofagasta, Atacama Desert (Chile). *Water*, 14(14), 2225. <https://doi.org/10.3390/w14142225>
- Sánchez, R., Mayorga, R., Urrego, L., Vargas, G. (2002). Modelo para el pronóstico de la amenaza por deslizamientos en tiempo real. *Simposio Latinoamericano de Control de Erosión*. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/18821>
- [SENAMHI] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2014). *El fenómeno El Niño en el Perú*. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/874>
- [SENAMHI] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Climas del Perú: Mapa de Clasificación Climática Nacional*. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1336>
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate In Climate Change 2021 the physical science basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 1513–1766.
- Siman-Tov, S., Marra, F. (2023). Antecedent rainfall as a critical factor for the triggering of debris flows in arid regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(3), 1079-1093. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1079-2023>
- Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Shen, P., Zhang, L., Chen, H., and Fan, R. (2018). EDDA 2.0: integrated simulation of debris flow initiation and dynamics considering two initiation mechanisms. Geoscientific Model Development. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(7), 2841–2856. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2841-2018>
- The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Working group II contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Fact sheet – Central and South America.
- 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*, 13 339-360, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-339-2013>
- Thouret, J.C., Arapa, E., Charbonnier, S., Guerrero, A., Kelfoun, K., Cordoba, G., Rodriguez, D., Santoni, O. (2022). Modeling Tephra Fall and Sediment-Water Flows to Assess Their Impacts on a Vulnerable Building Stock in the City of

Arequipa, Peru. *Frontiers in Earth Science*. 10.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.865989>

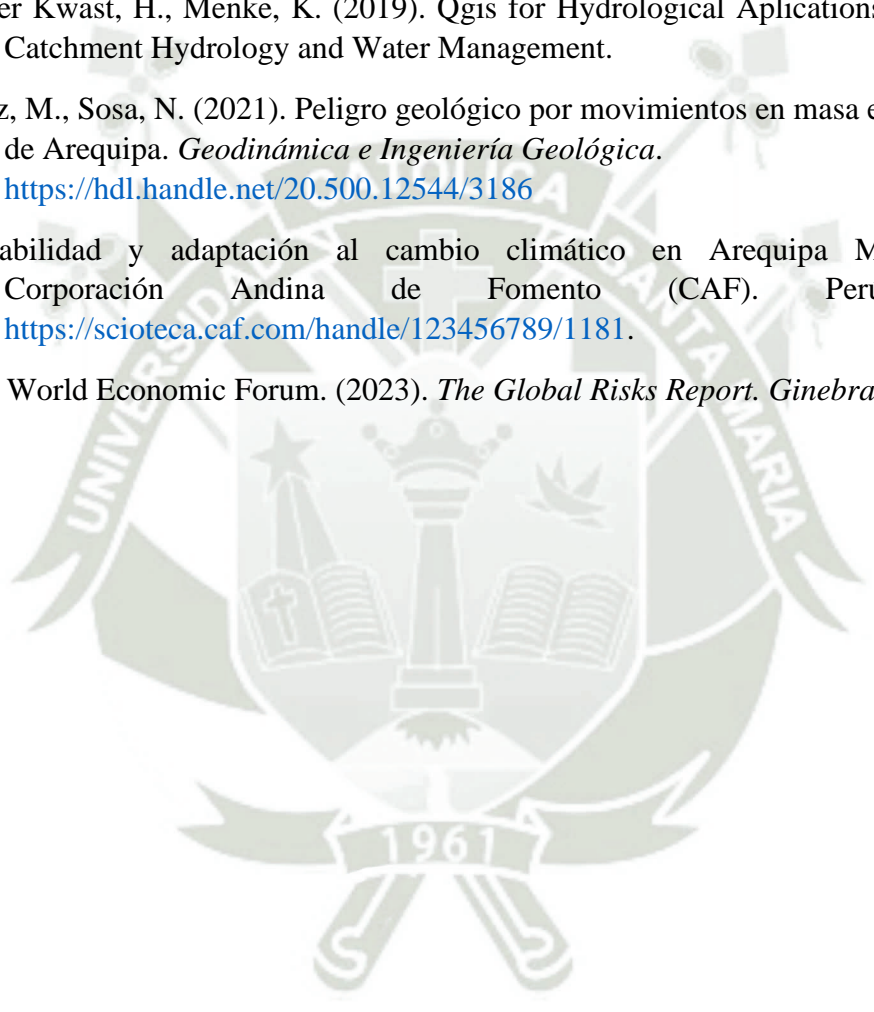
Tubaldi, E., White, C.J., Patelli, E., Aristoteles, S., de Almeida, G., Brown, J. Cranston, M., Hardman, M., Koursari, E., Lamb, R., McDonald, H., Mathews, R., Newell, R., Pizarro, A. Roca, M., Zonta, D. (2022). Invited perspectives: Challenges and future directions in improving bridge flood resilience. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3), 795-812. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-795-2022>

Van Der Kwast, H., Menke, K. (2019). Qgis for Hydrological Aplications Recipes for Catchment Hydrology and Water Management.

Vílchez, M., Sosa, N. (2021). Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. *Geodinámica e Ingeniería Geológica*.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/3186>

Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en Arequipa Metropolitana. Corporación Andina de Fomento (CAF). Perú (2018).  
<https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1181>.

[WEF] World Economic Forum. (2023). *The Global Risks Report*. Ginebra. Suiza.





**ANEXOS**

