

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-06-04

Artículos

Análisis y prevención del peligro por inundaciones en quebradas de alto riesgo en la ciudad de Arequipa, Perú

Analysis and risk prevention of flooding in high-risk gorges in the city of Arequipa, Peru

Joel Ccancapa-Puma¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4439-0711>

Alejandro Víctor Hidalgo-Valdivia², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7598-9074>

Guillermo Yorel Noriega-Aquise³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2354-6391>

Alex Eduardo Aguilar-Chávez⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4982-5671>

Marcelo Marques⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5451-5323>

¹Universidad Católica de Santa María (UCSM), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú, joel.ccancapa@ucsm.edu.pe

²Universidad Católica de Santa María (UCSM), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú, ahidalgo@ucsm.edu.pe

³Universidad Católica de Santa María (UCSM), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú, gnoriega@ucsm.edu.pe



⁴Universidad Católica de Santa María (UCSM), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Arequipa, Perú, aaguilarch@ucsm.edu.pe

⁵Universidad Estadual de Maringá (UEM), Umuarama, Brasil, mmarques@uem.br

Autor para correspondencia: Joel Ccancapa-Puma,
joel.ccancapa@ucsm.edu.pe

Resumen

La ciudad de Arequipa, la segunda ciudad más importante del Perú, enfrenta eventos extremos, como lluvias de alta intensidad, pero de corta duración, que generan inundaciones y crecidas del río Chili (avenidas de lodo y huaycos). Esta situación agrava la vulnerabilidad de la población asentada en las márgenes de las quebradas, posteriormente torrenteras, debido a la poca o nula planificación territorial por parte de las entidades gubernamentales, que se refleja cada año en pérdidas humanas y de infraestructura. La frecuencia de estos eventos va en aumento con el tiempo y es por esta razón que se generan umbrales de precipitaciones extremas para su correspondiente caracterización, con un registro de 41 años (1981-2021), a fin de informar sobre la peligrosidad de un fenómeno meteorológico adverso, previsto o en desarrollo. Se utilizaron datos de precipitación máxima de 24 horas de las estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) para obtener el hidrograma líquido para diferentes periodos de retorno con el modelo hidrológico HEC-HMS. También se realizaron estudios de

mecánica de suelos para determinar los parámetros reológicos del flujo no newtoniano y luego calibrar a través de eventos históricos con el modelo hidráulico HEC-RAS. Finalmente se elaboraron mapas cartográficos en QGIS para evaluar las zonas de peligro por inundaciones en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas.

Palabras clave: eventos extremos, umbrales de precipitación, flujos hiperconcentrados, inundaciones, peligro, Arequipa.

Abstract

The city of Arequipa, the second most important city in Perú, faces numerous daunting challenges, including high-intensity but short-duration rainfalls that leads to floods and the swelling of the Chili River (mud and landslides). This situation aggravates the vulnerability of the population settled on the margins of the gorges and gullies, due to little or no territorial planning from public institutions. The local news evidence negligence every year, both in terms of human lives and infrastructure loss. The frequency of these events has increased with time and that is the reason for prompting the establishment of rainfall thresholds and the compilation of a 41-year record (1981-2021), with the aim of informing about the dangerousness of an adverse meteorological phenomenon, either predicted or in progress. For the hydrological model, the authors used the highest 24-hour precipitation data from the SENAMHI's stations (National Service of Meteorology and Hydrology of Peru) to generate the liquid hydrograph for different return periods with the Hydrologic model of HEC-HMS. Soil mechanics studies were also carried out to determine the rheological parameters of the non-Newtonian flow and then calibrate

through historical events in a hydraulic model of HEC-RAS. Finally, cartographic maps in QGIS were prepared to evaluate the hazard zones flooding in the Del Pato, San Lázaro, Venezuela and Los Incas gullies.

Keywords: Extreme events, rainfall thresholds, hyper-concentrated flows, floods, hazard, Arequipa.

Recibido: 29/03/2023

Aceptado: 07/07/2023

Publicado Online: 21/07/2023

Introducción

El Perú está altamente expuesto frente al cambio climático, que repercute en la severidad y ocurrencia de fenómenos meteorológicos como El Niño (Espinoza-Vigil & Booker, 2023a), una situación que se ve agravada con las condiciones de desigualdad, pobreza y crecimiento demográfico (IPCC, 2022).

Arequipa alberga más de 1 millón 316 mil habitantes, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (INEI, 2017).

Cada año, la ciudad de Arequipa sufre desbordes e inundaciones en zonas aledañas a los cauces de las torrenteras que hacen su ingreso y que confluyen en el río Chili, colapsando alcantarillas y zonas de área de cultivo asentadas en las zonas bajas del volcán Misti, pues 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 más críticos hacia las torrenceras existentes. Estas lluvias extremas han evidenciado el mal dimensionamiento y destrucción de los puentes sobre las torrenceras y cauces de río (Espinoza-Vigil & Booker, 2023b), como también una planificación urbana inadecuada (El Búho, 2021).

Un indicador básico para una adecuada planificación y programación de actividades económicas, socioeconómicas, socioambientales y de intervención territorial es conocer los diferentes regímenes climáticos presentes. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) elaboró en 2020 el estudio *Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional*, que fue actualizado en 2021 por el método de Thornthwaite, como una herramienta para conocer los diferentes tipos de clima en el Perú, para la toma de decisiones y reducción de riesgos de desastres, predominando en la ciudad de Arequipa un clima árido y templado **E(d)B'**, con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año (SENAMHI, 2021).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), como ente rector del sistema nacional de gestión de recursos hídricos, elaboró un estudio denominado *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos* (ANA, 2016), con el objetivo de asegurar la continuidad a través de un desarrollo sostenible y responsable del recurso hídrico con base en criterios e indicadores; uno de estos indicadores establece la cuenca Quilca-Chili como la de mayor vulnerabilidad, considerada de alta prioridad (en el primer nivel) y donde predomina el aspecto hidrológico (estrés hídrico), al igual que la presencia de puntos críticos ante eventos extremos (inundaciones) (ANA, 2015).

Los eventos extremos en la ciudad de Arequipa desencadenan en inundaciones asociadas con procesos de erosión fluvial, donde su fuerza erosiva es originada muchas veces por la carga de sedimentos (flujos de lodo o detritos). Según Vílchez & Sosa (2021), 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 1) de acuerdo con el análisis heurístico-cualitativo.

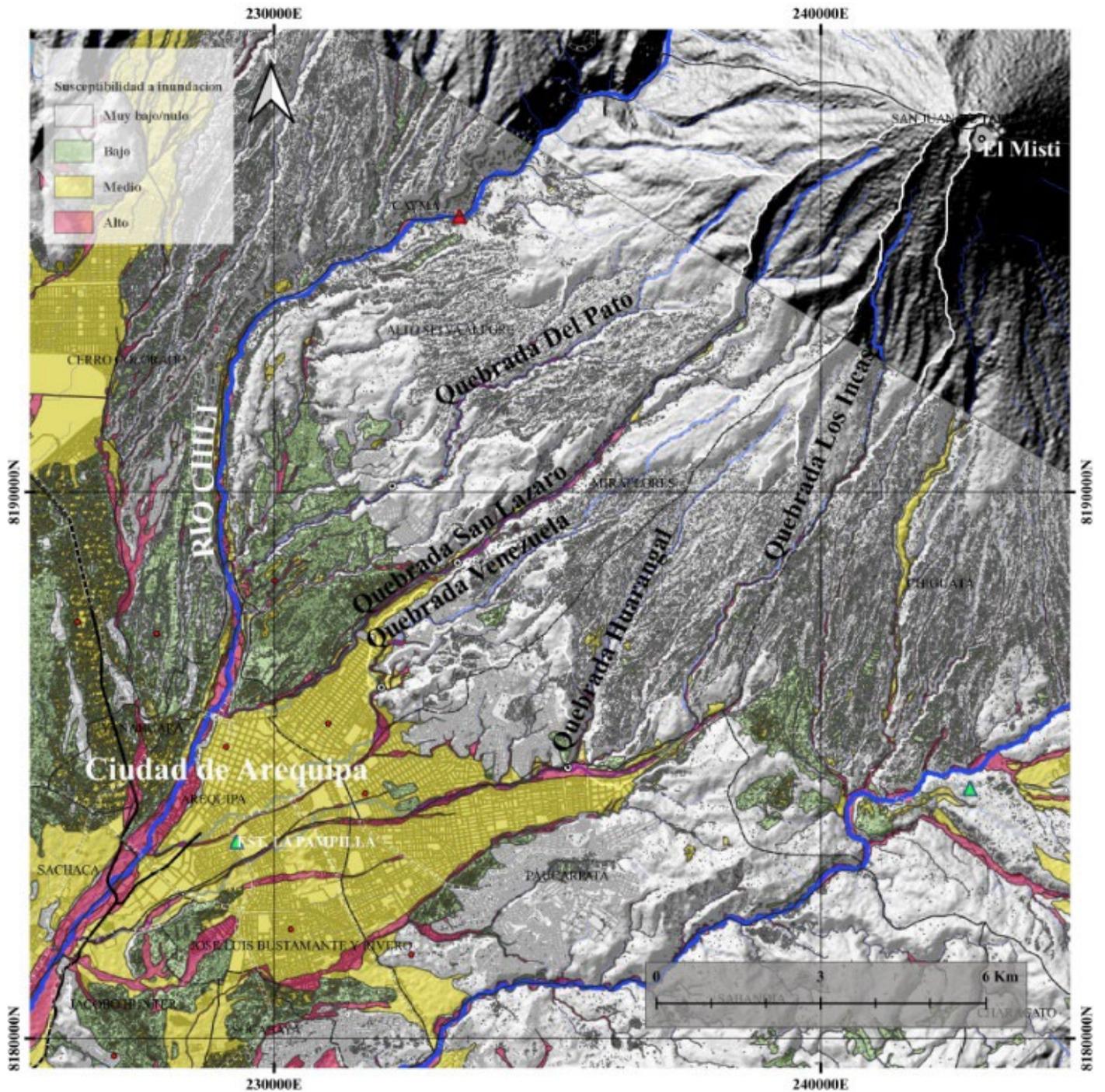


Figura 1. Adaptación propia de la base de datos “Susceptibilidad a Inundación y Erosión Fluvial”. Fuente: Vílchez y Sosa (2021).

Naciones Unidas (2014) define el “peligro” como el grado de amenaza para lugares o asentamientos humanos por los fenómenos desfavorables en un periodo de tiempo dado.

El último informe del World Economic Forum (2023) sobre riesgos globales ha identificado por gravedad a corto y largo plazo que los desastres provocados por los fenómenos meteorológicos extremos son los más críticos, y que cada vez estamos menos preparados por los impactos del cambio climático.

Debido a eventos históricos suscitados en época de lluvia (enero, febrero y marzo) que se presentan cada año en la ciudad de Arequipa, este estudio tiene como objetivo general caracterizar las lluvias extremas registradas por la estación La Pampilla a través de umbrales de precipitación máxima, con el fin de informar sobre la peligrosidad de un fenómeno meteorológico adverso, previsto o en desarrollo, lo cual constituye un índice climático de lluvias extremas a partir de un método práctico y reconocido internacionalmente.

La ocurrencia de inundaciones en magnitud y frecuencia para una gestión de recursos hídricos es de vital importancia; por ello, como objetivos específicos, se realizaron estudios topográficos, geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos en las torrenteras de estudio para conocer el comportamiento de las cuencas y mitigar el impacto.

Materiales y métodos

La ciudad de Arequipa (Figura 2) es severamente afectada con inundaciones en una periodicidad irregular por la activación de las torrenceras por la parte derecha e izquierda de la ribera del río Chili. Según el diagnóstico que presenta la ANA (2015), denominado Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Quilca-Chili, la ciudad es el punto de mayor riesgo por huaycos debido principalmente al crecimiento indiscriminado de la ciudad por falta de planificación, deficiente sistema de alcantarillado e invasión de los cauces naturales. La ciudad de Arequipa, con un área de 676.6 km², se encuentra dentro de la cuenca Quilca-Chili de 13 457 km² y está ubicada en la vertiente occidental de la cordillera de Los Andes, por lo que pertenece a la vertiente del océano Pacífico. Abarca prácticamente toda la provincia de Arequipa, al suroeste del territorio peruano, entre la latitud sur 15° 37' 50" y 16° 47' 10" y la longitud oeste 70° 49' 15" y 72° 26' 35".

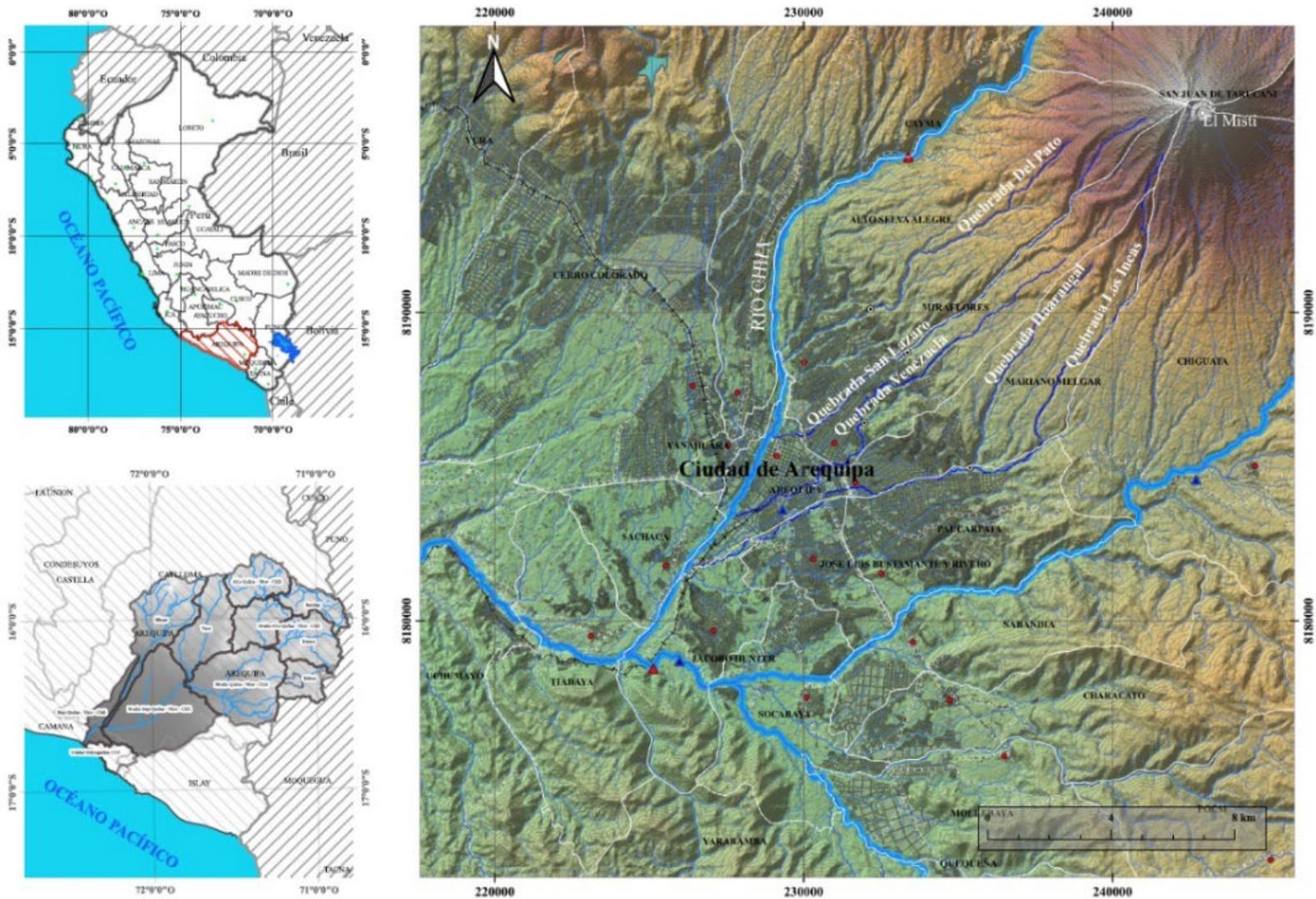


Figura 2. Ubicación de la ciudad de Arequipa y torrenceras bajo el volcán Misti.

A continuación se recopiló información de eventos históricos suscitados en la ciudad de Arequipa (1989-2021) a través de artículos, periódicos e instituciones, como la ANA, SENAMHI e INGEMMET (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico).

- **1989:** 8 de febrero, lluvia intensa (37.7 mm/h) que ocasionó que todas las torrenceras hicieran su ingreso, causando que el caudal del río Chili se incrementara.
- **1997:** 25 de febrero, debido a las intensas lluvias se produjo el desborde de las torrenceras San Lázaro, Miraflores, Paucarpata y Mariano Melgar, que afectaron Alto Selva Alegre, P.J. Ciudad Blanca-Comité y Cercado de Arequipa. Dejó cinco muertos y muchos daños.
- **2000:** 18 de enero, lluvias intensas causaron inundación de los 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, lluvias intensas causaron inundaciones en Cayma, Paucarpata, Socabaya, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero; 20 de marzo, inundaciones en Alto Selva Alegre y Arequipa.
- **2008:** 9 de enero, lluvias intensas en los distritos de Alto Selva Alegre, Cayma, Hunter y Mariano Melgar.
- **2012:** 1 de enero, lluvias fuertes en el distrito Alto Selva Alegre.
- **2013:** 8 de febrero, lluvias intensas (124.5 mm), que se concentraron en las cabeceras de las torrenceras San Lázaro, Venezuela y Los Incas; material arrastrado aguas abajo a manera de flujos de detritos tras cuatro horas intensas de precipitación. Estos flujos afectaron pistas, viviendas, infraestructura pública y privada, y ocasionaron la muerte de personas.

- **2015:** 1 de enero, inundación de Arequipa después de seis horas de lluvia.
- **2016:** 26 de enero, inundaciones en los distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, Alto Selva Alegre.
- **2017:** 13 de enero, en Alto Selva Alegre fueron afectados los sectores de Villa Ecológica Independencia y las Gardenias; 150 viviendas dañadas por los huaycos.
- **2020:** 26 de febrero, lluvias intensas afectaron más de 250 viviendas por desborde de inundaciones en seis distritos; flujo de lodo en la terminal terrestre y terrapuerto (Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9).

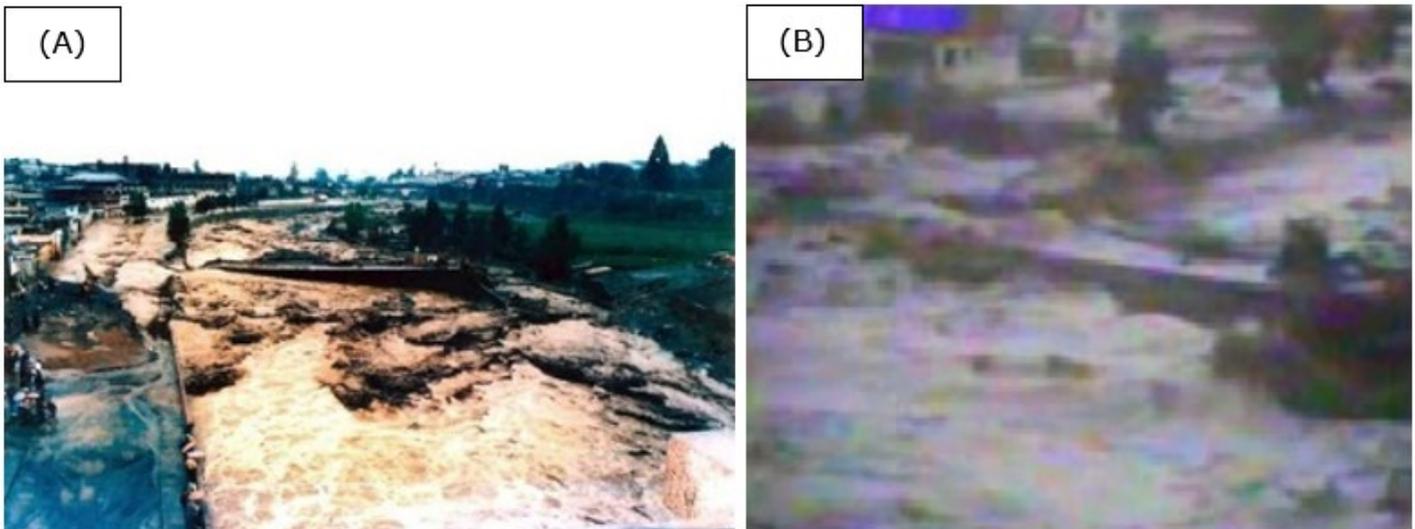


Figura 3. Registro del 8 de febrero de 1989: A) y B) desborde registrado del río Chili por consecuencia de la construcción del puente Bajo Grau que sirvió como dique, desviando el flujo de agua por el barrio obrero. Fuente: Clima y Ecología de Arequipa (2013).



Figura 4. Registro del 8 de febrero del 2012: A) y B) crecida del río Chili evidencia la vulnerabilidad del Puente Bajo Grau; C) y D) lluvias intensas se observan en las principales calles Puente Grau y Bolívar.

Fuente: Villalobos (2012).



Figura 5. Aluvión registrado el 8 de febrero de 2013 en la ciudad de Arequipa: A) y B) calles invadidas de lodo por activación de quebradas posteriormente torreteras; C) y D) vías destruidas como consecuencias de las inundaciones por acción de la intensa lluvia registrada. Fuente: Diario Correo (2014).



Figura 6. Registro del 2 y 29 de febrero de 2015: A) viviendas dañadas por las lluvias torrenciales; B) inundación del intercambio vial de la variante de Uchumayo; C) lluvias intensas ponen al descubierto la precariedad de obras viales. Fuente: El Búho (2015a; 2015 b, 2015c).



Figura 7. Registros del 23 y 24 de febrero de 2016: A) lluvia de 10 horas afectaron a la ciudad de Arequipa y colapsaron varios transformadores que dejaron sin energía eléctrica varios distritos; B) las intensas lluvias ocurridas dañaron infraestructuras y vías urbanas, y provocaron el ingreso de flujo de lodo a viviendas asentadas en márgenes de quebradas. Fuente: El Búho (2016a; 2016b).



Figura 8. Registro del 8 de marzo y 30 de enero de 2017: A) colapso del Puente Concordia en la torrentera del Chulo debido a las fuertes lluvias que afectaron a la ciudad de Arequipa; B) fuertes lluvias desencadenaron la activación de la quebrada Paucarpata, produciéndose huaycos. Fuente: El Búho (2017a; 2018b).



Figura 9. Registro del 25 y 26 de febrero de 2020: A) y B) precipitaciones de fuerte intensidad provocaron la activación de quebradas y huaycos que arrastraron vehículos e inundaron viviendas; C) y D) daños significativos en seis distritos; más de 350 viviendas han sido afectadas producto de las inundaciones y desborde de las torrenceras e ingreso de lodo a la terminal terrestre y terrapuerto de la ciudad de Arequipa. Fuente: El Búho (2020a; 2020 b; 2020 c; 2020 d).

Estudios básicos

Para conocer la ocurrencia de inundaciones, este estudio propone una metodología con base en investigaciones básicas de topografía, hidrología mecánica de suelos e hidráulica en las quebradas —posteriormente torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas— de la ciudad de Arequipa, para caracterizar el comportamiento de las intensas lluvias y que agravan la situación cuando alcanzan valores significativos (percentil 99), llegando a ocasionar pérdidas económicas que superan los S/350 millones y más de 80 mil personas afectadas por lluvias torrenciales (Gestión, 2013).

Geología

El desplazamiento o remoción de masas rocosas (fracturadas y/o meteorizadas), depósitos inconsolidados o ambos por efecto de la gravedad están estrechamente vinculados con las intensas lluvias, sismos y modificaciones antrópicas (factores detonantes), que responden también a causas condicionantes o intrínsecas, como la pendiente, morfología, cobertura vegetal, etcétera (Vílchez & Sosa, 2021). La caracterización litológica realizada identificó unidades y subunidades de depósitos inconsolidados fluviales (**I-2**), aluviales (**I-3**), proluviales (**I-4**), coluviales (**I-6**), lacustrinos (**I-7**), glaciar (**I-8**) y volcanoclásticos (**I-9**) como factores condicionantes a movimiento de masas. Ettinger *et al.* (2015) mencionan también que las inundaciones repentinas son comunes en zonas semiáridas, como Arequipa, donde se presentan lluvias fuertes

cada año entre los meses de enero, febrero y marzo, teniendo efectos devastadores en términos geomorfológicos y de vidas humanas.

Según 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 10).

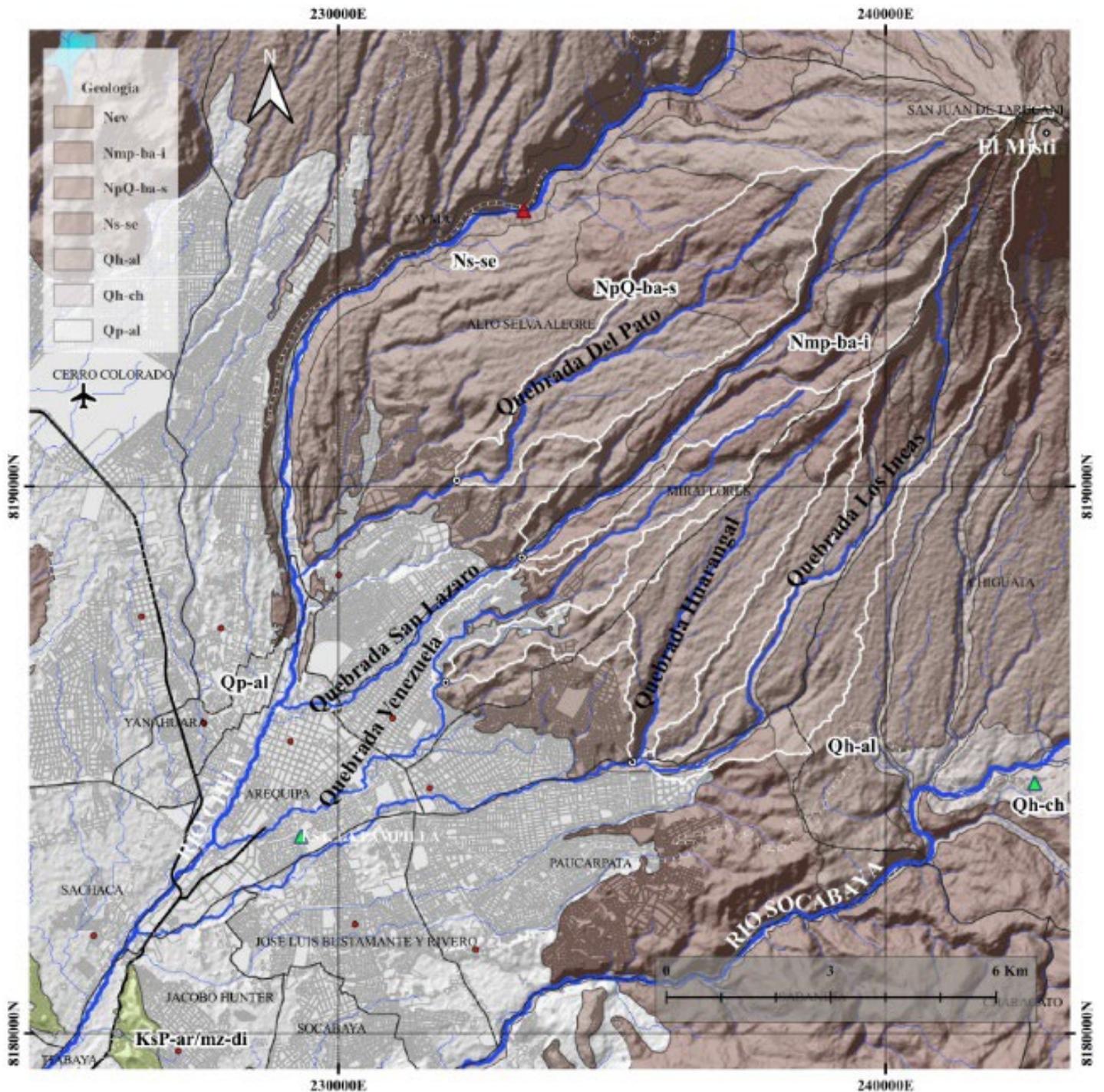


Figura 10. Adaptación propia de la base de datos Geología (MINAM, 2018).

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. Obtiene curvas de nivel cada metro, georreferenciado desde un punto de control proporcionado por el Instituto Geofísico del Perú (IGN) en el Sistema Geodésico Mundial WGS84/UTM Zona 19S.

Hidrología

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 1), un criterio común es establecer umbrales de precipitación, como índices climáticos. La determinación de umbrales de precipitación máxima para este estudio se siguió de acuerdo con el procedimiento descrito por Alfaro (2014), el cual se utiliza 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 empleó la estación La Pampilla; también se menciona que el uso de estos índices se justifica porque hay más información disponible de acumulados de precipitación (lluvia diaria) en 24 horas que intensidades de precipitación.

Tabla 1. Caracterización de extremos de precipitación.

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

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

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

Para el cálculo de los percentiles, el procedimiento que se debe tener en cuenta es lo siguiente: 1) excluir del cálculo el valor más alto de la serie; 2) cuando en la serie histórica se observan "outliers" es necesario verificar su impacto en los parámetros estadísticos de la serie debido a su presencia; 3) excluir del cálculo todos los días con trazas; 4) considerar como día con precipitación cuando $RR > 0.1$ mm; 5) si se trabaja con Excel, usar la función PERCENTIL.INC; 6) 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; 7) 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; 8) 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 sino umbrales

deducidos de la muestra utilizada (se sugiere muestras no menores a 10 años); 9) los resultados obtenidos deben ser cuidadosamente utilizados si se pretende hacer extrapolaciones especiales, dada la alta variabilidad espacial de la lluvia; 10) para el uso de los datos se debe evaluar la calidad de los datos de las estaciones.

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 con base en la morfología de los cauces; sin embargo, se requiere de un análisis precipitación-escorrentía para determinar los caudales máximos a través de un modelo hidrológico a partir de datos observados (estación La Pampilla). La delimitación de las cuencas (Figura 11) se hizo siguiendo las buenas prácticas desarrolladas en QGIS por Van Der Kwast & Menke (2019), determinando las características fisiográficas y geomorfológicas por cada quebrada de estudio con base en el modelo digital de elevación (DEM) ALOS-PALSAR a resolución de 12.5 m.

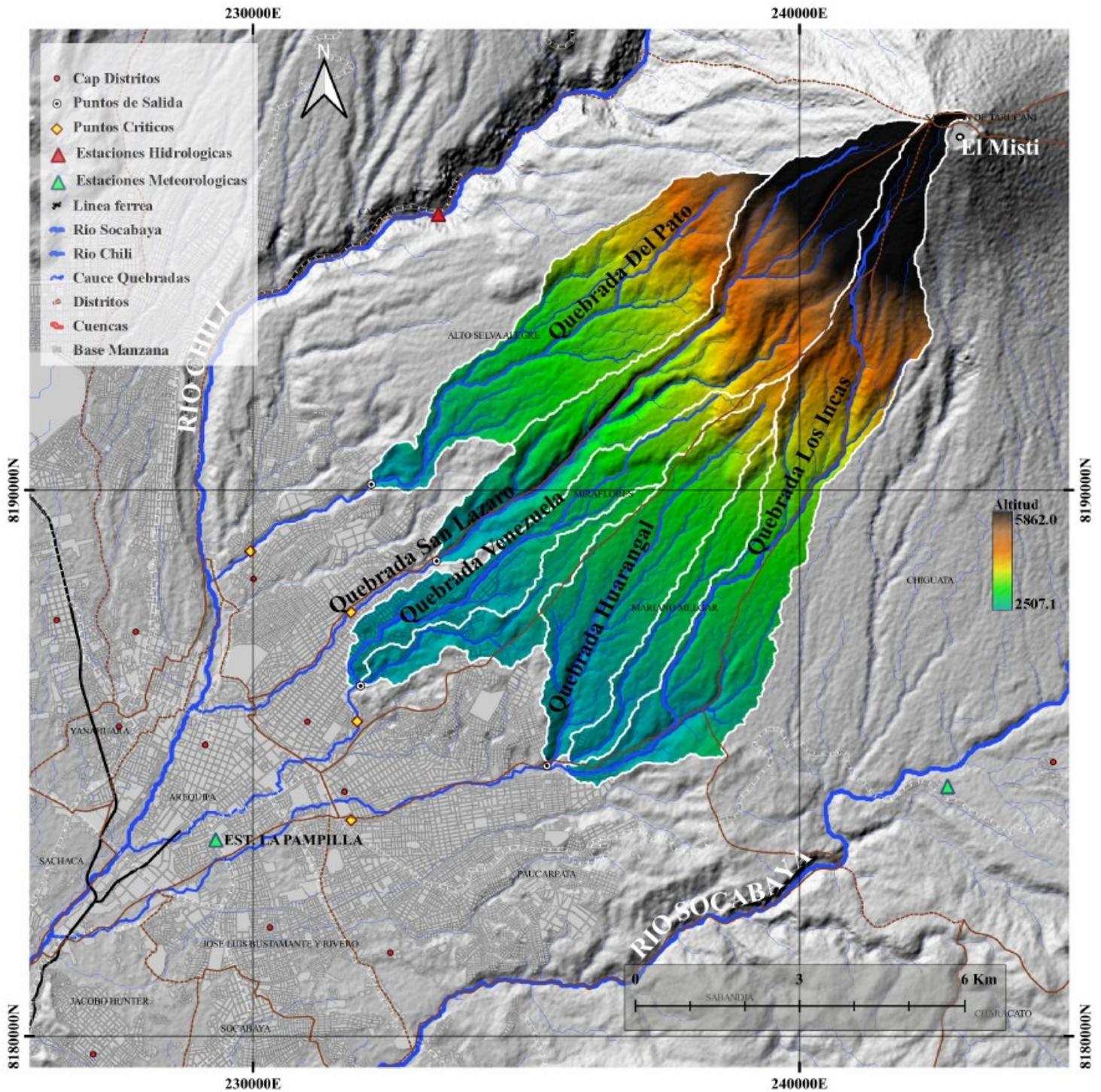


Figura 11. Delimitación de las cuencas en estudio.

El hidrograma líquido se obtuvo a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas de las estaciones La Pampilla y Chiguata (Tabla 2), con un registro de 41 años (1981-2021), descartando la estación Huasacache por el área de influencia sobre las torrenteras por el método de los polígonos de Thiessen.

Tabla 2. Estaciones meteorológicas.

Estaciones Meteorológicas	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (msnm)
Estación La Pampilla	-71.534	-16.413	2 326
Estación Chiguata	-71.409	-16.406	2 902

Se llevó a cabo el análisis de frecuencia sobre los datos a través de la prueba no paramétrica de bondad y ajuste Smirnov-Kolmogorov, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ con el *software* Hydrognomon para diferentes funciones de distribución de probabilidad y conocer cuál se ajusta mejor a la serie de datos máximos; se tuvo en cuenta la teoría de valores extremos para caracterizar los eventos de precipitación extrema, como lo menciona Endara (2017), y distribución de valor extremo generalizado (GEV). Luego, para determinar el hidrograma, 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). 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 3.

Tabla 3. Parámetros de las quebradas de estudio.

Cuenca	Área de la cuenca (km ²)	Pendiente media (%)	Numero de curva (CN)	Tiempo de concentración (Tc)
Del Pato	13.8	24.6	81.8	53.8
San Lázaro	17.0	42.8	84.4	52.0
Venezuela (i)	6.5	18.9	82.2	62.8
Venezuela (ii)	3.6	17.7	81.7	52.6
Los Incas (i)	9.8	18.4	81.7	53.5
Los Incas (ii)	4.0	16.5	81.7	49.2
Los Incas (iii)	17.8	30.1	83.5	67.3

*Tiempo de concentración en minutos.

Las torrenteras que se encuentran a la margen izquierda del río Chili y que confluyen hacia él presentan una pendiente del cauce principal entre 7 y 18 % (Figura 12).

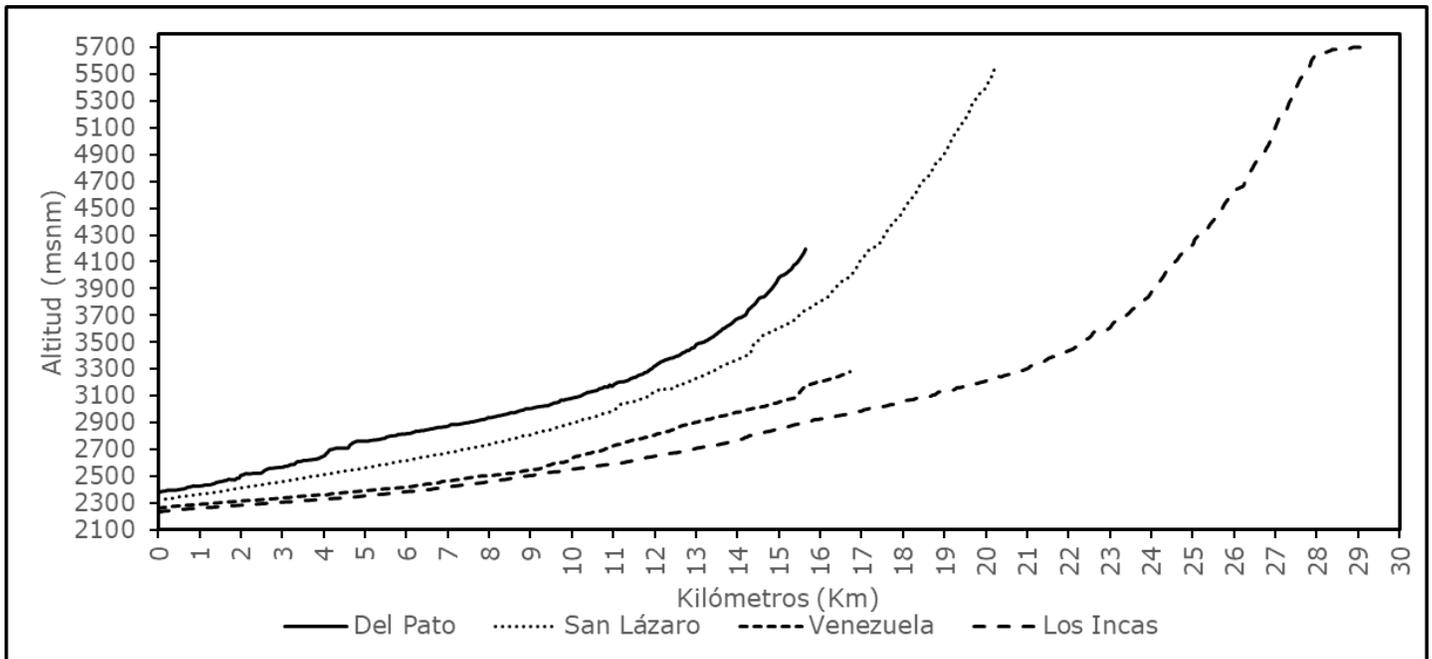


Figura 12. Perfil longitudinal de las quebradas hasta la confluencia del río Chili.

La Tabla 4 muestra los caudales líquidos estimados con el modelo HEC-HMS para cada cuenca de estudio.

Tabla 4. Caudales máximos líquidos estimados.

Cuenca	Caudal (m^3/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

*TR: periodo de retorno.

Mecánica de suelos

Se realizaron muestras a través de calicatas en puntos críticos a la entrada de la ciudad de Arequipa (Figura 11) para las diferentes torrenteras de estudio según la Norma técnica Peruana (NTP), de esta manera se determinaron las características geotécnicas mediante ensayos en laboratorio, como 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 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 5). 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 y suelos erosionables ante flujos hiperconcentrados. También se encontró presencia de flancos constituidos por flujos de barro, lahares y residuos sólidos.

Tabla 5. Resumen de ensayos de mecánica de suelos realizados.

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 (g/cm ³)	1.67	1.67	1.92	1.67
Gravedad específica (G)	2.62	2.55	2.53	2.58
Ángulo de fricción interna (°)	33	35	33	33

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

Flujos hiperconcentrados

La mezcla de sedimentos y agua que discurren en un cauce son conocidos en el Perú como “huaycos” (Castillo, 2006). El registro de inundaciones y flujos de detritos (huaycos) es común en zonas semiáridas, como es Arequipa, generalmente asociados con lluvias intensas que discurren por las quebradas, posteriormente torrenteras, que nacen en el volcán Misti (Rivera, Vílchez, & Vela, 2018). Suárez (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 cada evento dado. De acuerdo con el tipo de flujo y las características de la pendiente de las torrenteras de estudio (Figura 12), se caracterizó el tipo de flujo por la presencia de lodo durante el evento en las diferentes torrenteras: San Lázaro (Fredysimplemente, 2012), Venezuela (El informativo AQP, 2020), Los Incas (El Búho pe, 2020) y de huayco en la quebrada Del Pato (INGEMMET, 2019) a través de reportes audiovisuales e informes técnicos. La obtención del hidrograma (Figura 13) representa la parte líquida (precipitación); la parte sólida es representada por altas concentraciones de piedras, gravas, arenas y finos que transporta el flujo aluvial. Para conocer esta parte sólida, ya sea en volumen o en peso, O'Brien, Julien y Fullerton (1993) procedieron a determinar la concentración volumétrica de los sólidos con parámetros reológicos, estimados con valores empíricos dados por Rickenmann (1999), de 1 600 a 2 000 kg/m³ para flujos de barro o lodos (*mud flow*), y de 1 900 a 2 300 kg/m³ para flujos de huaycos (*debris flow*). Así, para determinar estas concentraciones volumétricas de sólidos, se aplicaron las fórmulas propuestas por Takahashi (1991) (Ecuación (1)), asumiendo un flujo estable en movimiento (Almeida, Quisca, & Castillo, 2019):

$$C_v = \frac{\gamma_b S}{(\gamma_s - \gamma_b)(tg\phi - S)} \quad (1)$$

Donde:

γ_b = peso específico del barro (1.0-1.6 ton/m³)

γ_s = peso específico del material sólido (2.6 ton/m³)

S = pendiente media del cauce de la quebrada

ϕ = ángulo de fricción interna del material sólido (30°-35°)

El caudal máximo de flujo de barro respecto al caudal de agua y material en suspensión es la Ecuación (2):

$$Q_b = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s - \gamma_b} Q_1 \quad (2)$$

Donde:

γ = peso específico del agua (1.0 ton/m³)

Q_1 = caudal máximo del agua (m³/s)

Q_b = caudal máximo de barro (m³/s)

El caudal máximo de flujo de huayco en condición saturada resulta con la Ecuación (3):

$$Q_h = \frac{c^*}{c^* - c_v} Q_1 \quad (3)$$

Donde:

C^* = concentración máxima de material sólido en reposo (0.6)

La Figura 13 muestra el hidrograma de flujo de huayco para la quebrada Del Pato, construida a partir del hidrograma del caudal líquido o agua.

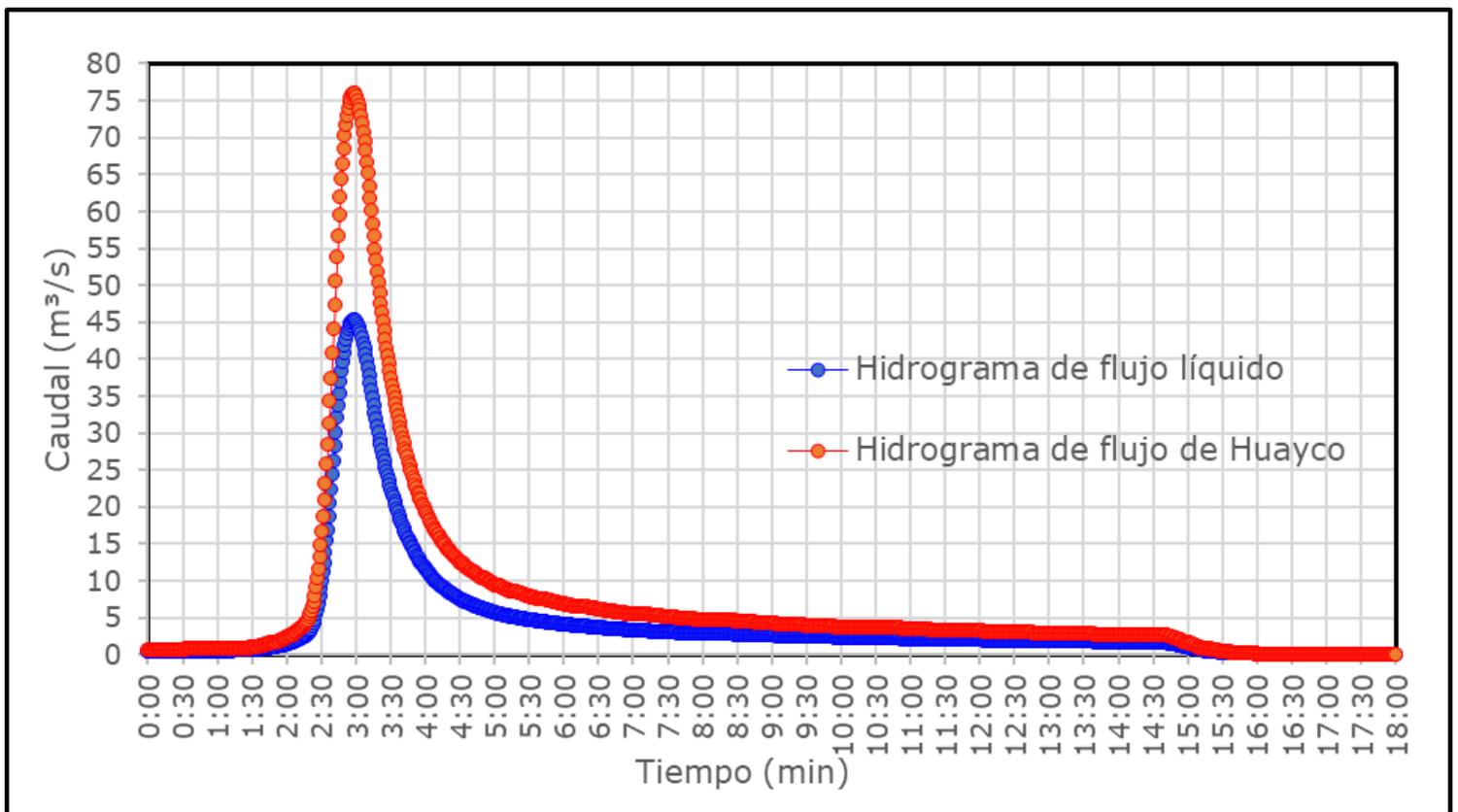


Figura 13. Hidrograma de flujo líquido y lodo de la quebrada Del Pato, TR = 100 años.

Simulación de inundación

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 para estimar la profundidad del flujo según Mazer *et al.* (2021). En el Perú, el 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, a fin de garantizar la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, etcétera, con la finalidad de establecer un límite superior de la ribera, una faja marginal, donde se señalan terrenos aledaños a los cauces naturales o artificiales de las fuentes de agua colindantes a asentamientos poblacionales con un periodo de retorno de 100 años, según el uso y gestión de fajas marginales (ANA, 2020).

El análisis de inundaciones por cada torrentera se realizó con la ayuda del *software* HEC-RAS (Hydrological Engineering Center-River Analysis System), teniendo en cuenta las condiciones contorno o frontera de entrada (Flow Hydrograph), salida (Normal Depth) y la rugosidad de Manning (Figura 14), tomando valores recomendados por libro hidráulica de canales abiertos de Ven Te Chow (1994).



Figura 14. Coeficiente de Manning en las diferentes torrenteras de estudio: A) Del Pato, B) San Lázaro, C) Venezuela y D) Los Incas.

Se realizó la simulación de inundación bajo el análisis de flujo no permanente o no estacionario que resuelve de forma diferencial bidimensional del flujo en lámina libre (Ecuación (4)) para el cálculo del tirante y la velocidad de agua en los ejes "x" y "y". Esta ecuación representa la expresión del principio físico de conservación de la masa líquida en un fluido, en su forma conservativa (volumen de control fijo) y diferencial (Anderson, 1995):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Donde:

h = tirante de agua

u = velocidad en el eje "x"

v = velocidad en el eje "y"

t = tiempo

De la Ecuación (4), que es la ecuación general de flujo bidimensional de lámina libre, el modelo numérico HEC-RAS adiciona una variable "q" (infiltración) (Ecuación (5)), que en este estudio no se tendrá en cuenta por tratarse de máximas avenidas.

Ecuación de continuidad de flujo bidimensional en lámina libre:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + h \frac{\partial(u)}{\partial x} + h \frac{\partial(v)}{\partial y} + q = 0 \quad (5)$$

Ecuación de cantidad de movimiento de flujo bidimensional en lámina libre en el eje "x" y "y" (ecuaciones (6) y (7)):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + u_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + u_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (7)$$

Donde:

H = cota de la superficie de lámina libre de agua

u = velocidad en el eje "x"

v = velocidad en el eje "y"

t = tiempo

c_f = coeficiente de resistencia

f = parámetro de Coriolis

Calibración del modelo

La calibración se realizó teniendo en cuenta las precipitaciones máximas registradas (1981-2021) que desencadenaron en eventos históricos en la ciudad de Arequipa: 1995, 1997, 2001, 2002, 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 torrencera Huarangal que generó la 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 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. 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 bajo las infraestructuras presentes (Figura 15) en los cauces canalizados revestidos.



Figura 15. Infraestructuras presentes en el cauce de las diferentes torrenteras: A) torrentera Del Pato (puente s/n); B) torrentera San Lázaro (Av. Juan de la Torre); C) torrentera Venezuela (El Palomar); D) torrentera Los Incas (terminal terrestre).

Resultados

Para la estación La Pampilla, los datos de precipitación acumulada se ordenaron de menor a mayor 932 días con lluvia ($RR > 0.1$ mm) y se calcularon los percentiles de la serie de 931 días con lluvia, excluyendo el mayor valor registrado (124.5 mm) debido a una lluvia excepcional (Cacya, Meza, Carlotto, & Mamani, 2013), y a la estadística de los valores extremos (Tabla 6 y Tabla 7). Hubo 273 datos faltantes en la serie (Figura 16).

Tabla 6. Registro histórico.

Estaciones meteorológicas	Periodo	Núm. de años	Datos faltantes %
Estación La Pampilla	1981-2021	41	5.4
Estación Chiguata	1981-2021	41	5.7

*Se recabó información de precipitación máxima diaria del SENAMHI.

Tabla 7. Umbrales de precipitación máxima para la estación La Pampilla.

Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
$RR/día > 99$ p	$RR > 25.5$ mm
95 p $< RR/día \leq 99$ p	14.6 mm $< RR \leq 25.5$ mm
90 p $< RR/día \leq 95$ p	10.2 mm $< RR \leq 14.6$ mm
75 p $< RR/día \leq 90$ p	4.5 mm $< RR \leq 10.2$ mm

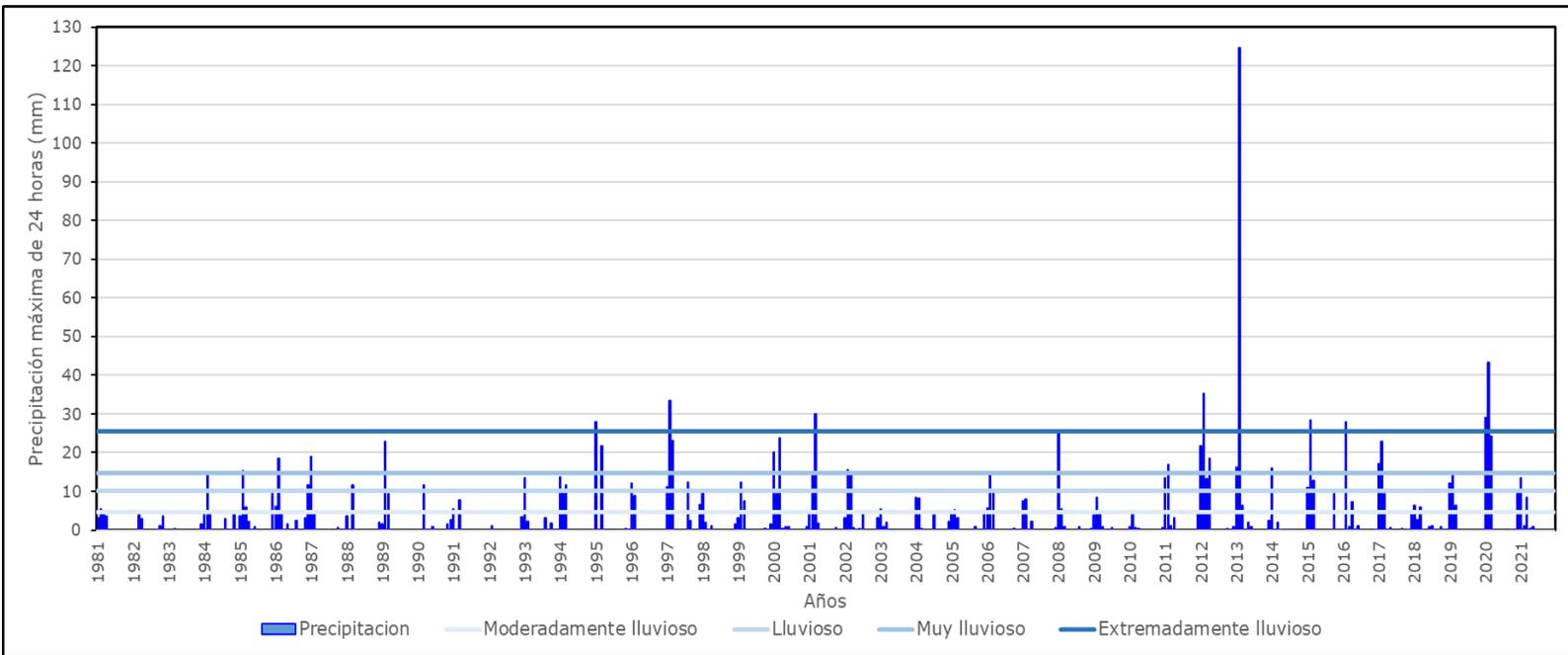


Figura 16. Estación La Pampilla (1981-2021). Datos diarios de precipitación máxima.

El tratamiento de datos de precipitación máxima de 24 horas responde bien al comportamiento esperado de la precipitación de la estación La Pampilla mediante el uso de percentiles (Figura 17).

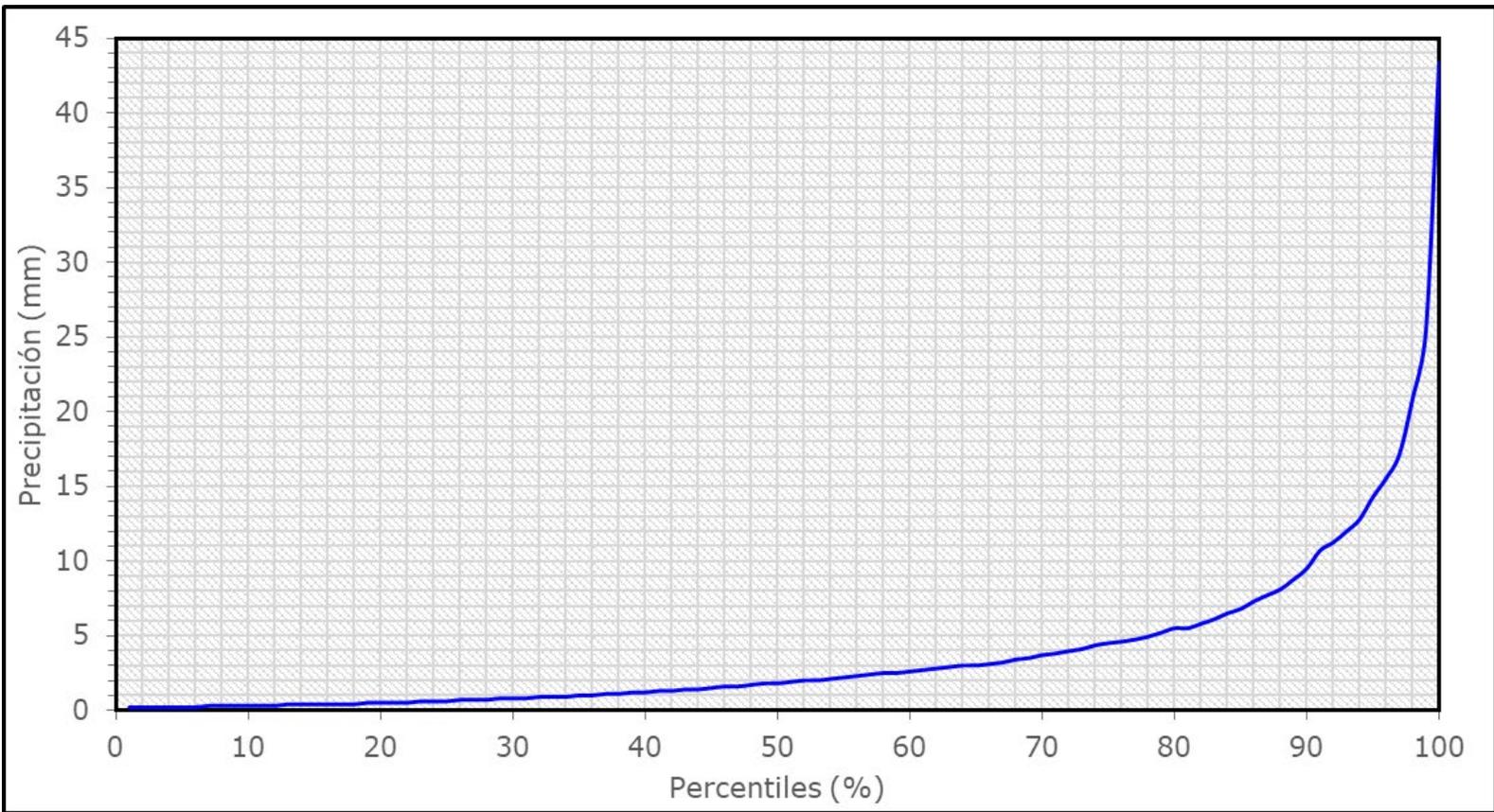


Figura 17. Estación La Pampilla (1981-2021), precipitación en (mm) vs. percentiles (%).

La Tabla 8 muestra los caudales determinados según el tipo de flujo bajo análisis.

Tabla 8. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno (TR).

Quebrada	Caudal máximo (m ³ /s)	C _d	Caudal (m ³ /s) para diferentes periodos de retorno (años)				
			TR = 5	TR = 25	TR = 50	TR = 100	TR = 200
Del Pato	Flujo de agua	-	7.0	24.9	34.7	45.3	56.4
	Caudal de lodo	1.23	8.6	30.6	42.7	55.7	69.4
	Flujo de escombros (fórmula de Takahashi)	1.68	11.7	41.8	58.2	76.0	94.6
San Lázaro	Flujo de agua	-	15.9	46.8	61.8	77.4	93.5
	Caudal de lodo	1.14	18.2	53.5	70.6	88.5	106.9
	Flujo de escombros (fórmula de Takahashi)	2.44	38.7	114.0	150.5	188.5	227.8
Venezuela	Flujo de agua	-	10.0	23.9	31.0	38.6	46.5
	Caudal de lodo	1.14	11.4	27.3	35.4	44.1	53.1
	Flujo de escombros (fórmula de Takahashi)	1.21	12.1	28.9	37.5	46.7	56.2
Los Incas	Flujo de agua	-	22.2	69.6	93.1	117.7	143.1
	Caudal de lodo	1.14	25.4	79.6	106.4	134.5	163.6
	Flujo de escombros (fórmula de Takahashi)	1.52	33.8	106.1	141.9	179.4	218.1

*C_d: factor de engrosamiento.

En la Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21 se tienen mapas por peligro de inundación.

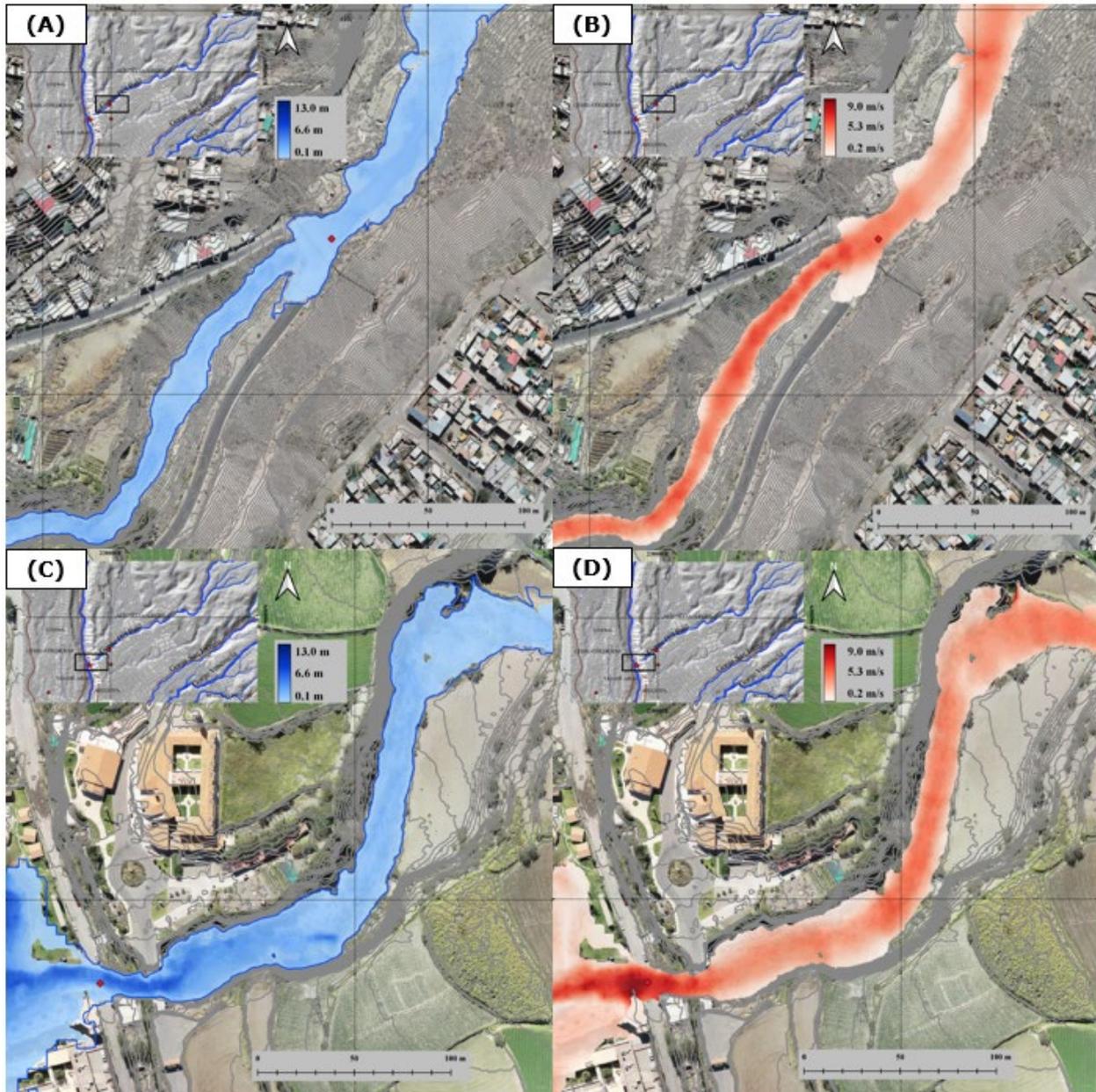


Figura 18. Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años: A) y B) profundidad de agua y velocidades en el badén existente; C) y D) profundidad de agua y velocidades en el puente sin nombre de la torrentera Del Pato, utilizando el modelo numérico HEC-RAS.



Figura 19. Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años: A) y B) profundidad de agua y velocidades en el puente Cahuide; C) y D) profundidad de agua y velocidades en la Av. Juan de la Torre de la torrentera San Lázaro, utilizando el modelo numérico HEC-RAS.



Figura 20. Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años: A) y B) profundidad de agua y velocidades en la Av. C18/Puente Santa Rita; C) y D) profundidad de agua y velocidades en el puente ferrocarril de la torrentera Venezuela, utilizando el modelo numérico HEC-RAS.

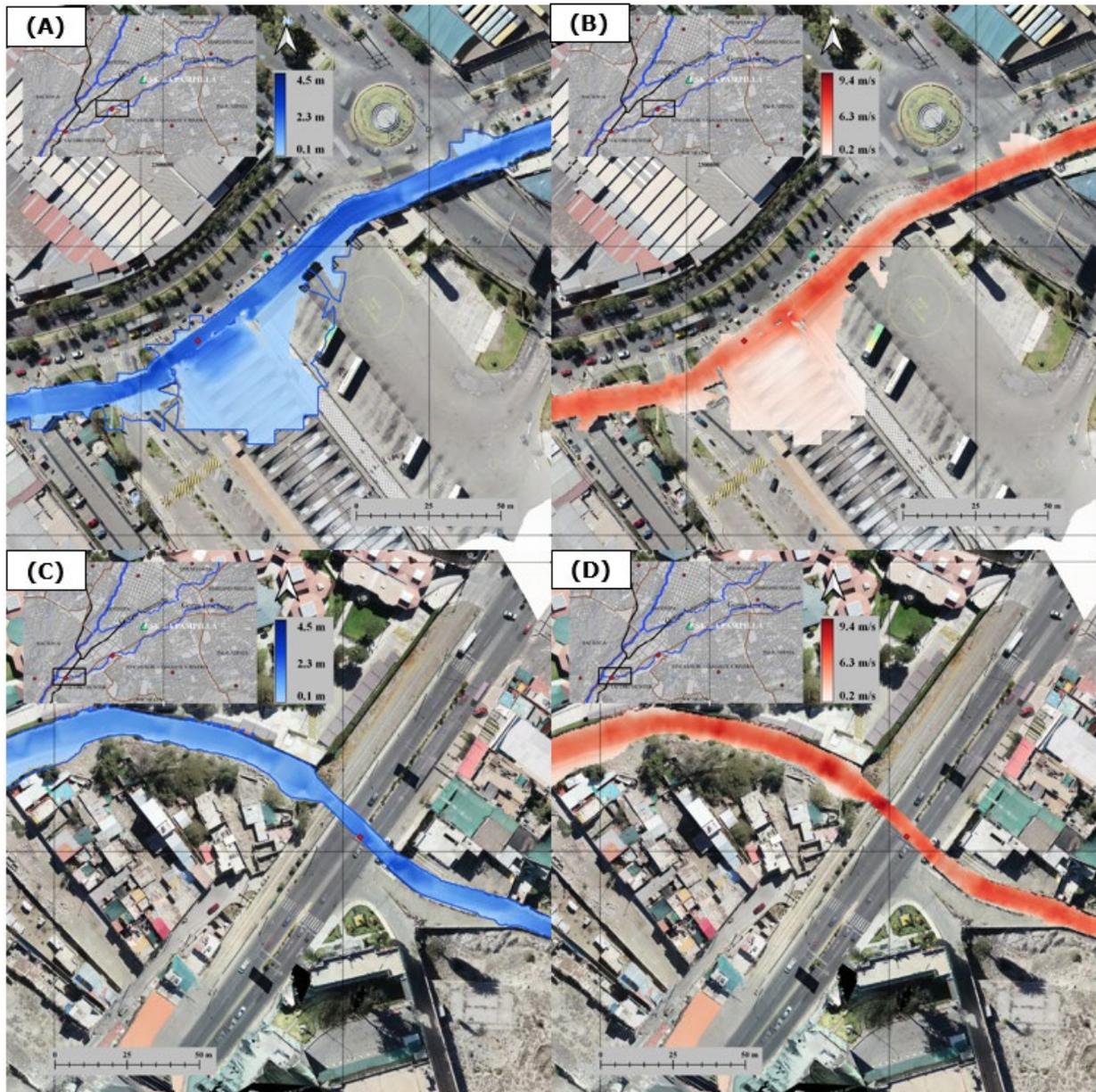


Figura 21. Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años: A) y B) profundidad de agua y velocidades de la terminal terrestre y terrapuerto; C) y D) profundidad de agua y velocidades en el puente de la Av. Alfonso Ugarte de la torrentera Los Incas, utilizando el modelo numérico HEC-RAS.

La evaluación en campo y los principales parámetros hidráulicos a través de las simulaciones numéricas (Tabla 9) evidencian eventos históricos, puntos de peligro y zonas de riesgo frente a máximas avenidas.

Tabla 9. Evaluación de resultados para una gestión de riesgos de desastres.

Torrenteras de estudio	Zona de peligro/infraestructura	Frecuencia de eventos (Años)	Periodo de retorno (TR)	Profundidad de agua máxima (m)	Velocidad de flujo máxima (m/s)	Área inundada total (ha)
Torrentera Del Pato (9.3 km)	Badén existente	Alta (cada 3 a 5 años)	100	0.9	5.4	20.3
	Puente sin nombre		100	5.8	5.1	
Torrentera San Lázaro (8.5 km)	Puente Cahuide	Alta (cada 3 a 5 años)	100	4.8	6.3	23.4
	Av. Juan de la Torre		100	5.1	6.2	
Torrentera Venezuela (6.7 km)	Av. C18, Puente Santa Rita	Alta (cada 3 a 5 años)	100	3.6	2.2	7.7
	Puente del Ferrocarril		100	1.7	3.0	
Torrentera Los Incas (6.9 km)	Terminal terrestre y terrapuerto	Alta (cada 3 a 5 años)	100	2.9	4.8	8.6
	Puente de la Av. Alfonso Ugarte		100	2.4	6.0	

Discusión

Este estudio propone como un sistema de alerta temprana los umbrales de precipitación máxima (lluvia extrema) (Figura 16), que en vez de deducir la función de densidad de probabilidad, estima los umbrales de eventos extremos de precipitación mediante una función empírica de probabilidad, caracterizado con “extremadamente lluvioso” precipitaciones mayores a 25.5 mm, que desencadenan en deslizamientos de tierra y desprendimientos de rocas (Figura 22) en los cauces canalizados revestidos y naturales de las diferentes torrenteras de estudio (Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas) de la ciudad de Arequipa.



Figura 22. Fuertes lluvias desencadenan en erosión y socavación en la torrentera San Lázaro.

Las torrenteras son canales rectos y empinados, dominados por un flujo unidimensional (1D) (Bricker *et al.*, 2017). Se configuraron bajo estos criterios las infraestructuras presentes como puentes y pontones dentro de las torrenteras de la ciudad de Arequipa, a través de secciones transversales, teniendo en cuenta los coeficientes de expansión (0.5), contracción (0.3), y las condiciones de contorno o de frontera (Normal Depth) para un modelo 1D; de esta manera, se conoce la altura de tirante/caudal en la cota inferior del tablero de las infraestructuras presentes por huella hídrica (Figura 13), para posteriormente modelar

bajo un enfoque de flujo bidimensional (2D) con HEC-RAS, que resuelven las ecuaciones diferenciales bidimensionales de Saint-Venant con el método de volúmenes finitos, siendo el tamaño de celda de 5 x 5 metros y un intervalo de tiempo computacional de tres segundos.

La ocurrencia de lluvias se da en la parte alta (quebrada), media y baja (torrentera) o en simultáneo; el flujo de agua en el punto de salida (Figura 11) llega con alta carga de sedimentos, que reológicamente constituyen flujos hiperconcentrados, flujo de lodo o barro, y flujo de huaycos, presencia de sólidos de granulometría extendida (piedras y/o rocas), como muestra el estudio de mecánica de suelos (Tabla 5), y que según los perfiles longitudinales de las quebradas estudiadas (Figura 12), con un máximo de 18 %, se ve la relación directa entre la pendiente del cauce principal con la taxonomía de flujos no newtonianos a través de un factor de engrosamiento del hidrograma líquido por la formulación descrita por Takahashi (1991).

Los resultados (caudales máximos) valores obtenidos con la formulación empírica de Takahashi son razonables y congruentes por huellas dejadas en eventos históricos suscitados en las torrenteras de estudio, como fue el año 2020, desde un punto de vista ingenieril, para la toma de decisiones frente al peligro por inundaciones. No obstante, se recomienda hacer el análisis para flujos de lodo y escombros (huaycos) con la taxonomía propuesta por Gibson, Floyd, Sánchez & Heath (2020) mediante modelos reológicos de Bingham y la O'Brien Equation (Quadratic) para una mejor comprensión respecto a flujos no newtonianos.

Se recomienda realizar la monumentación de los hitos por parte de la ANA en las partes altas de las quebradas a través de fajas marginales, a fin de fomentar una herramienta de educación tanto para la población sobre los peligros de asentarse en zonas límites de ribera de cauces ante eventos extremos como para los diferentes entes gubernamentales (municipios y gobierno regional) en pro de una adecuada planificación territorial.

La presente investigación permitió, de manera inédita, cuantificar las áreas de peligro por inundaciones en la ciudad de Arequipa. La metodología aplicada puede servir de base para solucionar problemas similares en otras urbes a través de la importancia en la gestión de riesgos de desastre frente al cambio climático.

Conclusiones

La caracterización de las precipitaciones máximas de 24 horas (lluvias extremas) de la estación La Pampilla entre 1981 y 2021 (14 975 datos) permitieron determinar un umbral de "extremadamente lluvioso" (percentil 99) que se presenta aproximadamente cada cinco años en la ciudad de Arequipa como eventos desencadenantes a movimientos rápidos de masa, como fueron los años 1995, 1997, 2001, 2008, 2012, 2013, 2015, 2016 y 2020.

Las quebradas de estudio (Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas) están constituidas principalmente por depósitos aluviales, conformadas por arena, grava y finos; presenta también flancos de flujo

de barro y lahares que son altamente erosionables por flujos hiperconcentrados.

Se realizó el análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas de 24 horas de la estación La Pampilla; se ha elegido los resultados del modelo probabilístico, valor extremo generalizado (GEV), dado que según la prueba de bondad y ajuste Smirnov-Kolmogorov, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, dicha distribución de probabilidad se ajusta satisfactoriamente a los datos de la muestra, con un registro de 41 años (1981-2021).

Se estimaron los hidrogramas de avenidas de las quebradas de estudio con el modelo numérico HEC-HMS, teniendo en cuenta un modelo meteorológico de tormenta hipotética por el método de SCS Tipo II desarrollada por el U.S. Soil Conservation Service (US-SCS) para precipitaciones de 24 horas aplicables a cuencas altoandinas. La calibración del modelo se realizó teniendo en cuenta los registros de eventos históricos suscitados en la ciudad de Arequipa (1981-2021) por medio del análisis de umbrales de precipitación máxima.

Se hizo el tránsito de flujo (simulación de inundación) con el modelo numérico HEC-RAS para un periodo de retorno de 100 años, por tratarse de zonas colindantes a asentamientos poblaciones, según el uso y gestión de fajas marginales dictadas por la Autoridad Nacional del Agua.

Los resultados muestran tirantes y velocidades críticas, que producen socavación y erosión en los cauces bajo análisis, además de zonas de desborde e inundación provocadas por precipitaciones extremas que se hacen cada vez más frecuentes. De esta manera, se tienen respuestas frente al alto riesgo para la ciudad de Arequipa, como caídas

escalonadas (disipación de energía), trabajos de calzadura en estribos de puentes y muros de contención.

Agradecimientos

A la Universidad Católica de Santa María por el financiamiento, en cuyo marco se desarrolló el presente proyecto de investigación aplicada.

Referencias

Anderson, J. (1995). *Computational fluid dynamics: The basics with applications*. New York, USA: McGraw-Hill.

Alfaro, L. (2014). *Estimación de umbrales de precipitación extremas para la emisión de avisos meteorológicos* (Nota Técnica 001). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/345>

Almeida, A., Quisca, S., & Castillo, L. (2019). *Numerical simulation of debris flows of the catastrophic event of February 2019 in Mirave-Peru*. DOI: 10.4136/ambi-agua.2437

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Plan de gestión de los recursos hídricos de la cuenca Quilca-Chili*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/86>

ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2016). *Priorización de cuencas para la gestión de los recursos hídricos*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>

- ANA, Autoridad Nacional del Agua. (2020). *Uso y gestión de fajas marginales*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4636>
- Bricker, J. D., Schwanghart, W., Adhikari, B. R., Moriguchi, S., Roeber, V., & Giri, S. (2017). Performance of models for flash flood warning and hazard assessment: The 2015 Kali Gandaki landslide dam breach in Nepal. *Mountain Research and Development*, 37(1), 5-15. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00043.1
- Cacya, L., Meza, P., Carlotto, V., & Mamani, L. (2013). Aluvión del 8 de febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. En: *Foro Internacional Peligros Geológicos* (pp. 195-200). Arequipa, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1132>
- Castillo, L. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujo de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa Fe de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Clima y Ecología de Arequipa. (22 de febrero, 2013). Los desastres de 1989 y 2013: una sola fecha, 8 de febrero. *Clima y Ecología de Arequipa*. Recuperado de <http://ecoclimaqp.blogspot.com/2013/02/los-desastres-de-1989-y-2013-una-sola.html>

- Cruz, R. (2009). *Gestión del riesgo por inundación en asentamientos populares, distrito de Mariano Melgar, Arequipa*. Arequipa, Perú: Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Diario Correo. (8 de febrero, 2014). El aluvión del 8 de febrero. *Diario Correo*. Recuperado de <https://diariocorreo.pe/peru/el-aluvion-del-8-de-febrero-fotos-51126/>
- Endara, S. (diciembre, 2017). *Determinación de extremos de precipitación a partir del PISCO diario*. Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Dirección de Hidrología. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/955>
- El Búho. (29 de febrero, 2015a). Represas al 70% de su capacidad de almacenamiento tras recientes lluvias. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2016/02/represas-al-70-de-su-capacidad-de-almacenamiento-tras-recientes-lluvias/>
- El Búho. (2 de febrero, 2015b, c). Lluvias ponen al descubierto precariedad de "obras" viales. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/archivo/2015/02/02/lluvias-ponen-al-descubierto-precariedad-de-obras-viales/index.html>
- El Búho. (23 de febrero, 2016a). Lluvia de 10 horas y apagón afectaron la ciudad de Arequipa. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2016/02/fotos-lluvia-de-10-horas-y-apagon-afectaron-la-ciudad-de-arequipa/>

El Búho. (24 de febrero, 2016b). Más de 3,500 familias y 10 mil metros de vías afectadas por las lluvias de dos días. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2016/02/mariano-melgar-yura-y-alto-selva-alegre-fueron-los-distritos-mas-afectados-por-lluvias/>

El Búho. (8 de marzo, 2017a). Disminuyen caudal que vierte a torrentera Chullo para reparar puente La Concordia. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/archivo/2017/03/08/disminuyen-caudal-que-vierte-a-torrentera-chullo-para-reparar-puente-la-concordia/index.html>

El Búho. (30 de enero, 2017b). Otra víctima mortal cobró el huaico que ingresó por torrentera de Paucarpata. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/archivo/2017/01/30/otra-victima-mortal-cobro-el-huaico-que-ingreso-por-torrentera-de-paucarpata/index.html>

El Búho. (26 de febrero, 2020a). Pronóstico: lluvias fuertes continuarán en Arequipa, advierte Senamhi. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2020/02/hoy-continuaran-las-lluvias-fuertes-en-arequipa/>

El Búho. (26 de febrero, 2020b). Lluvias en Arequipa: más de 250 viviendas afectadas por desbordes e inundaciones. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2020/02/lluvias-en-arequipa-mas-de-250-viviendas-afectadas-por-desbordes-e-inundaciones/>

El Búho. (25 de febrero, 2020c). Lluvias en Arequipa: desborde de torrenteras en La Isla, Terminal Terrestre y Paucarpata. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2020/02/lluvias-en-arequipa-desborde-de-torrenteras-en-la-isla-terminal-terrestre-y-paucarpata/>

El Búho. (25 de febrero, 2020d). Terminales terrestres de Arequipa vuelven a reabrir después del ingreso de huaico. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2020/02/suspenden-salida-de-buses-de-arequipa-por-inundacion-de-terminales-terrestres/>

El Búho pe. (25 de febrero, 2020). *Desborde de torrenteras en Arequipa*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=0XAtMwZnPtM&t=18s>

El Búho. (28 de marzo, 2021). Hace 20 años el problema de las torrenteras y alcantarillado pluvial en Arequipa. *El Búho*. Recuperado de <https://elbuho.pe/2021/03/hace20anos-el-problema-de-las-torrenteras-y-alcantarillado-pluvial-en-arequipa/>

El Informativo AQP. (29 de enero, 2020). *Ingreso de la torrentera de la av. Venezuela en el Cercado de Arequipa*. Recuperado de https://www.youtube.com/shorts/FHsQLvO_HNo

Espinoza-Vigil, A. J., & Booker, J. D. (2023a). Building national disaster resilience: Assessment of ENSO-driven disasters in Peru. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*. DOI: 10.1108/IJDRBE-10-2022-0102

Espinoza-Vigil, A. J., & Booker, J. D. (2023b). Hydrological vulnerability assessment of riverine bridges: The Bajo Grau bridge case study. *Water*, 15(5), 846. DOI: 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., & Manrique, N. (2015). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. *Journal of Hydrology*, 541(2016), 563-581. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.017
- Fredysimplemente. (Marzo, 2012). *Huayco en torrentera San Lázaro Arequipa*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=GAfRMaXJNdA>
- Gestión. (14 de febrero, 2013). *Arequipa: las pérdidas por inundaciones podrían superar los S/.350 millones*. Recuperado de <https://gestion.pe/economia/arequipa-perdidas-inundaciones-superar-s-350-millones-31633-noticia/?ref=gesr>
- Gibson, S., Floyd, I., Sánchez, A., & Heath, R. (2020). Comparing single-pahse, non-Newtonian approaches with experimental results: Validating flume-scale mud and debris flows in HEC-RAS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46, 540-553. DOI: 10.1002/esp.5044
- INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. (2019). *Evaluación de peligros geológicos en la quebrada El Pato, tramo Villa Confraternidad (zonas A, B, C y D). Región Arequipa, provincia Arequipa, distrito Alto Selva Alegre*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2233>.

INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Arequipa alberga a 1 millón 301 mil habitantes a los 476 años de su creación. Nota de prensa.* Recuperado de <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-301-mil-habitantes-a-los-476-anos-de-su-creacion-politica-9246/>

IPCC, 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.* Geneva, Switzerland: The Intergovernmental Panel on Climate Change.

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.* Recuperado de https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=46537&query_desc=an%3A1062%20and%20su-geo%3APERU

Mazer, K., Tomasek, A., Daneshvar, F., Bowling, L., Frankenberger, J., McMillan, S., Novoa, H., & Zaballos, C. (2021). *Integrated hydrologic and hydraulic analysis of torrential flood hazard in Arequipa, Peru.* DOI: 10.1111/j.1936-704X.2020.3347.x

MINAM, Ministerio del Ambiente. (2018). *Mapa de geología a nivel meso de la zonificación ecológica económica, región Arequipa.* Recuperado de <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/arequipa/>

- Naciones Unidas. (2014). *Manual para la evaluación de desastres*. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/35894-manual-la-evaluacion-desastres>
- O'Brien, J., Julien, P., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244).1993
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19, 47-77. DOI: 10.1023/A:1008064220727
- Rivera, M., Vílchez, M., & Vela, J. (2018). Peligros por huaycos en la ciudad de Arequipa. En: *Taller Internacional Fortalecimiento de Capacidades para Mitigar los Impactos de Huaycos en Perú, Lima y Arequipa, Perú*, 15-19 de octubre 2018. Libro de Resúmenes (pp. 45-49). Arequipa, Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2589>
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1336>
- SCS, Soil Conservation Service. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release No. 55 (TR-55). Washington, DC, USA: Department of Agriculture.
- SCS, Soil Conservation Service. (1972). *National engineering handbook*. Section 4. Hydrology. Washington, DC, USA: U.S. Department of Agriculture.

- Suárez, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Takahashi, T. (1991). *Debris Flow-IAHR Monograph Series*. Rotterdam, The Netherlands: Balkema Publishers.
- 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. DOI: 10.5194/nhess-13-339-2013
- Van Der Kwast, H., & Menke, K. (2019). *QGIS for hydrological applications recipes for catchment hydrology and water management*. Recuperado de <https://www.amazon.com.mx/QGIS-Hydrological-Applications-Catchment-Management/dp/0998547786>
- Vílchez, M., & Sosa, N. (2021). *Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa*. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3186>
- Villalobos. (9 de febrero, 2012). Puente Grau. *Villalobos*. Recuperado de <https://www.flickr.com/photos/dannyvf/6849722249/in/photostream/>
- World Economic Forum. (2023). *The global risks report*. Geneva, Switzerland: World Economic Forum.