

Evaluación de riesgos geológicos al suroeste del volcán Misti,

distrito Alto Selva Alegre, Arequipa, Perú

Avaliação de riscos geológicos a sudoeste do vulcão Misti,
distrito de Alto Selva Alegre, Arequipa, Peru

Geological risk assessment Southwest of the Misti Volcano,
Alto Selva Alegre District, Arequipa, Peru

**Bruno Ramos Mardini, Edgard Gutiérrez Salinas, Madeleine Guillén Gómez,
Mauro Valdivia Bustamante y Armando Minaya Lizarraga**

Universidad Nacional de San Agustín
Facultad de Geología, Geofísica y Minas
Arequipa, Perú

bramosm@unsa.edu.pe; egutierrezs@unsa.edu.pe; mguillen@unsa.edu.pe; pvaldiviab@unsa.edu.pe;
aminayal@unsa.edu.pe

Ramos: <https://orcid.org/0009-0005-7551-0720>
Gutiérrez: <https://orcid.org/0000-0003-2092-1459>
Guillén: <https://orcid.org/0000-0001-8181-8581>
Valdivia: <https://orcid.org/0000-0003-2345-2619>
Minaya: <https://orcid.org/0000-0001-5739-6315>

Resumen

El crecimiento poblacional de los asentamientos humanos en la ciudad de Arequipa, Perú no ha tenido una planificación urbanística adecuada, ya que gran parte de la población se estableció en laderas y suelos volcánicos no consolidados, exponiéndose a diversos peligros geológicos. El objetivo de esta investigación va en dos sentidos: estimar el crecimiento poblacional desde el año 2000 al 2019; y calcular el nivel de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de los asentamientos humanos ante la ocurrencia de flujos de detritos y sismos. Para ello, se emplearon imágenes satelitales ASTER y PeruSAT-1, y se aplicó el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), integrando datos geológicos, hidrometeorológicos y demográficos en un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados muestran un incremento poblacional significativo en zonas de alto peligro, identificándose áreas críticas con riesgo muy alto, lo cual evidencia la necesidad de incorporar criterios geológicos en la planificación urbana.

PALABRAS CLAVE: riesgos geológicos; flujo de detritos; análisis jerárquico; crecimiento poblacional.

Resumo

O crescimento populacional dos assentamentos humanos na cidade de Arequipa, Peru, não seguiu um processo adequado de planejamento urbano, uma vez que grande parte da população se estabeleceu em encostas e em solos vulcânicos não consolidados, expondo-se a diversos perigos geológicos. O objetivo desta pesquisa é duplo: estimar o crescimento populacional no período de 2000 a 2019; e calcular os níveis de perigosidade, vulnerabilidade e risco dos assentamentos humanos diante da ocorrência de fluxos de detritos e sismos. Para isso, utilizaram-se imagens de satélite ASTER e PeruSAT-1, e aplicou-se o Processo de Análise Hierárquica (PAH), integrando dados geológicos, hidrometeorológicos e demográficos em um sistema de informação geográfica (SIG). Os resultados indicam um aumento populacional significativo em zonas de alto perigo, identificando áreas críticas com risco muito alto, o que evidencia a necessidade de incorporar critérios geológicos no planejamento urbano.

PALAVRAS-CHAVE: riscos geológicos; fluxo de detritos; análise hierárquica; crescimento populacional.

Abstract

The population growth of human settlements in the city of Arequipa, Peru, has not been adequate planning process, as a large part of the population settled on slopes and unconsolidated volcanic soils, exposing themselves to various geological hazards. The objective of this research is twofold: to estimate population growth from 2000 to 2019; and to calculate of the level of danger, vulnerability, and risk of the human settlements in the event of debris flows and earthquakes. For this purpose, ASTER and PeruSAT-1 satellite images were used, and the Hierarchy Analytic Process (AHP) was applied, integrating geological, hydrometeorological, and demographic data into a geographic information system (GIS). The results show a significant population increase in high-risk areas, identifying critical areas with very high risk, which highlights the need to incorporate geological criteria into urban planning.

KEYWORDS: geological risks; debris flow; hierarchical analysis; population growth.

1. Introducción

La ciudad de Arequipa (Perú) se ha caracterizado, en las últimas décadas, por un crecimiento poblacional acelerado y una inadecuada planificación territorial, lo que ha favorecido la consolidación de asentamientos humanos en zonas de alta susceptibilidad a fenómenos naturales, como las laderas de los volcanes Misti y Chachani. Estas áreas tienen características topográficas, geomorfológicas y geológicas que favorecen el desarrollo de diversos peligros naturales (Thouret *et al.*, 2013; 2014).

Los registros históricos y diversas evaluaciones confirman que Arequipa ha estado expuesta a terremotos, inundaciones, flujos de detritos y erupciones volcánicas (Delaite *et al.*, 2005; Cobeñas *et al.*, 2012). En particular, los asentamientos humanos del distrito de Alto Selva Alegre, ubicado al noroeste de la ciudad, presentan una alta vulnerabilidad debido a su localización en quebradas y suelos volcánicos no consolidados.

El riesgo que enfrenta una población está condicionado por la interacción entre el peligro, la exposición y la vulnerabilidad de los elementos en riesgo (Carreño *et al.*, 2004; 2006; Schneiderbauer y Ehrlich, 2004). El peligro se entiende como la manifestación de un fenómeno natural de determinada magnitud y frecuencia (Thouret *et al.*, 2013), mientras que la vulnerabilidad se refiere a la probabilidad de sufrir daños frente a dicho fenómeno (Birkmann, 2006; Künzler *et al.*, 2012). En este contexto, los flujos de detritos asociados a lluvias intensas entre diciembre y marzo (Martelli, 2011; Sandri *et al.*, 2014) y los sismos vinculados a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, con una convergencia de 8 as por -10 cm/año (Giovanni *et al.*, 2002) representan las principales amenazas en la zona de estudio.

En este sentido, la investigación se orientó a dos propósitos principales: (i) estimar el crecimiento poblacional de los asentamientos humanos de Alto Selva Alegre desde el año 2000 hasta el 2019, mediante el análisis de imágenes satelitales ASTER y PeruSAT-1; y (ii) calcular el

nivel de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo de dichos asentamientos frente a la ocurrencia de flujos de detritos y sismos, utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), (Saaty, 1980) e integrando información geológica, hidrometeorológica y demográfica en un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados obtenidos permiten identificar áreas críticas de riesgo muy alto, cuya delimitación constituye un insumo esencial para la planificación urbana y la gestión del riesgo en la ciudad de Arequipa.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio La zona de estudio está ubicada en el departamento de Arequipa, Perú, distrito de Alto Selva Alegre en la parte sur occidental del volcán Misti, comprometiendo a cinco asentamientos humanos (FIGURA 1) con un área de $3,57 \text{ km}^2$. Por su ubicación en el extremo occidental de Sudamérica, presenta un clima templado con temperaturas entre 11°C a 22°C , con una humedad relativa promedio anual de 12% y una precipitación media anual de 95mm y donde los vientos poseen una dirección predominante de este y oeste (Castro *et al.*, 2020).

2.2 Método empleado Se integraron datos geofísicos, geotécnicos, geológicos, fisiográficos y satelitales, obteniéndose seis capas temáticas. La geología, geomorfología y pendientes se cartografiaron a una escala 1:10.000. El mapa de densidad de suelos se obtuvo interpolando datos de densidad de 12 calicatas y de 8 líneas geofísicas (refracción sísmica). Los datos estructurales de las viviendas (material predominante de pared y estado de conservación de la vivienda), se obtuvieron por medio de encuestas a nivel de manzanas. Mientras que los datos económicos y sociales se consiguieron de la Plataforma Nacional de Datos Georreferenciados de Geo Perú. Lográndose adquirir un conjunto de datos que conforman factores condicionantes del terreno para la evaluación del peligro y datos demográficos para

la evaluación de la vulnerabilidad, los cuales fueron organizados, clasificados y trabajados en formato vectorial en el software ArcGIS 10.5 a una escala 1:10.000.

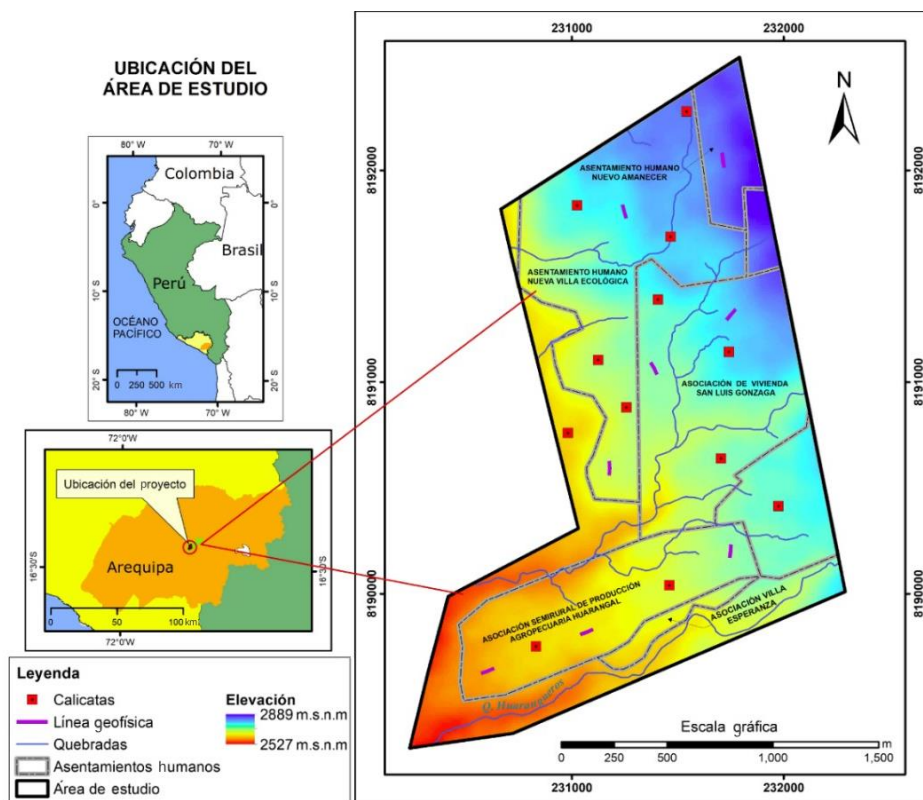


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio. Se muestra los asentamientos humanos y la distribución espacial de las líneas geofísicas y de las calicatas. Fuente: elaboración propia

2.3 Crecimiento poblacional

Se analizó el crecimiento urbano de Arequipa entre 2000-2019 usando imágenes satelitales ASTER para aquellos años y PerúSAT-1 (2019). Los archivos VNIR y SWIR se descargaron del portal *Earth Explorer* del *United States Geological Survey* (USGS), y la imagen PerúSAT-1 se obtuvo de la Agencia Espacial del Perú CONIDA. Las imágenes se corrigieron radiométrica, geométrica y atmosféricamente con ENVI V.5.3 y ATCOR4 para determinar el Factor de Reflectividad Hemisférica Direccional (HDRF). Se aplicó a una región de interés (ROI) para eliminar distorsiones en los bordes de las imágenes ASTER.

Los datos se importaron a QGIS 3.10.0 para corrección radiométrica usando el método *Dark*

Object Subtraction Keys (Chávez, 1996) utilizando el Plugin de Clasificación Semi-Automática (SCP). Las imágenes ASTER de 2000_coratm y 2019_coratm se procesaron en QGIS 3.10 con corrección atmosférica y composición RGB 2-3-1 para resaltar la vegetación. Se aplicó la calculadora ráster para restar la banda 1 de la imagen 2000_coratm. Se cambió el estilo de capas a pseudocolor monobanda y se aplicó la desviación media estándar 2,00, con la finalidad de separar las dos imágenes. Se hizo un *subset* a la imagen ASTER aplicando el *density slice*, dividiendo el rango de brillo en intervalos y asignando colores para mejorar la interpretación de los datos.

2.4 Análisis multicriterio

El Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), desarrollado por Saaty (1980), es una metodología de apoyo a la toma de decisiones que permite jerarquizar factores y asignarles un peso relativo en función de su importancia.

En el ámbito de la gestión del riesgo de desastres, ha sido adoptado por el CENEPRED (2014) como herramienta para integrar variables físicas, sociales y ambientales en la estimación de peligro, vulnerabilidad y riesgo.

Para calcular los pesos ponderados de los descriptores, se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1980), que incluye: (i) separar el problema en factores, (ii) ordenar los componentes por importancia, (iii) asignar valores numéricos según una escala (TABLA 1), (iv) preparar una matriz de comparación y (v) calcular el vector de priorización. Las inconsistencias en la comparación de pares se detectan y corrigen mediante los índices de consistencia (TABLA 2). Los pesos ponderados determinan los valores de peligro, vulnerabilidad y riesgo, clasificados en cuatro niveles: muy alto, alto, medio y bajo.

TABLA 1. Escala numérica de comparación de pares del análisis jerárquico. Fuente: Saaty, 1997

Escala numérica	Escala verbal
9	Absolutamente o muchísimo más importante o preferido que...
7	Muchísimo más importante o preferido que...
5	Más importante o preferido que...
3	Ligeramente más importante o preferido que...
1	Igual o diferente a ...
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que...
1/5	Menos importante o preferido que...
1/7	Muchísimo menos importante o preferido que...
1/9	Absolutamente o muchísimo menos importante o preferido que...
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores

TABLA 2. Índices de relación de consistencia para matrices de 3x3 hasta 16x16. Fuente: Saaty, 1980

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I	0,52	0,88	1,1	1,25	1,34	1,40	1,45	1,48	1,51	1,53	1,55	1,57	1,58	1,59
A	5	2	5	2	1	4	2	4	3	5	5	0	3	5

2.5 Adquisición de datos geotécnico

Se realizó un análisis geotécnico para determinar las propiedades y clasificación del suelo, mediante actividades de campo y laboratorio. Estos procedimientos permitieron caracterizar las propiedades físicas y clasificar el suelo conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El área de estudio está compuesta por arena mal graduada con gravas y 40% de bolonería volcánica, proveniente de material

aluvial y fluvioglacial. La capacidad portante promedio es de 1,43kg/cm².

2.6 Adquisición de datos geofísicos

Se utilizó la refracción sísmica para determinar las velocidades de onda de compresión, el espesor y la consistencia de los estratos, evaluando la viabilidad de la construcción de viviendas. Se realizaron 8 ensayos con tendidos de 75 m (FIGURA 1), usando el Equipo Geode de 24 canales según

la norma ASTM D5777 (2000). Se emplearon geófonos de 14Hz, un martillo de 25 lb y una placa metálica, con un intervalo de muestreo de 0,5 m y un tiempo de registro de 0,2 segundos, obteniendo datos de tiempo en 5 posiciones a lo largo de cada línea.

2.7 Determinación del peligro

El peligro se determinó en función de la susceptibilidad y del parámetro de evaluación del fenómeno. La susceptibilidad se calculó a partir de los factores condicionantes y desencadenantes del terreno. Para los flujos de detritos, los factores condicionantes fueron la geología, geomorfología, pendiente y distancia entre drenajes, mientras que el factor desencadenante correspondió a precipitaciones máximas de 33 a 35 mm con un periodo de retorno de 20 años. En el caso de la sismicidad, se consideraron como factores condicionantes la densidad, pendiente, geología y geomorfología; la magnitud del evento se tomó como factor desencadenante y la intensidad como parámetro de evaluación, con valores mayores a 8,0 Mw y una intensidad entre IX y X.

2.8 Factores condicionantes

2.8.1 Geología

La información geológica se obtuvo mediante la interpretación de cartografía oficial a escala 1:10 000, complementada con revisión bibliográfica y verificación en campo. Las unidades litológicas identificadas se integraron en el SIG para su análisis con las variables de peligro y vulnerabilidad (FIGURA 2A).

2.8.2 Geomorfología

El análisis geomorfológico se efectuó mediante la interpretación de modelos digitales de elevación (MDE) e imágenes ASTER y PeruSAT-1, delimitando unidades morfoestructurales, tipos de pendiente y zonas de acumulación o erosión.

Estas se cartografiaron y clasificaron según su morfodinámica en ArcGIS 10.5 (FIGURA 2B).

2.8.3 Pendiente

El plano de pendientes se elaboró mediante un mapeo netamente interpretativo. En vista que una mayor pendiente incrementa el peligro ante un flujo y un sismo, se realizó una clasificación general de pendientes (FIGURA 2C).

2.8.4 Densidad El mapa de densidad se obtuvo mediante interpolación de datos geofísicos y geotécnicos con *kriging* ordinario en ArcGIS 10.5, clasificando los resultados en cinco intervalos de densidad para su posterior análisis espacial.

2.8.5 Distancia entre quebradas

El plano se generó con geoprocésamiento en ArcGIS 10.5 usando la herramienta *Euclidean Distance*. Las quebradas se mapearon con la imagen satelital PeruSAT-1 y las distancias se clasificaron en rangos de 0 a 50 m, 50 a 100 m, 100 a 150 m, 150 a 250 m y más de 250 m.

2.9 Factores desencadenantes Los factores desencadenantes que se consideraron fueron: precipitación máxima para flujo de detritos y magnitud para sismos. Las cinco precipitaciones máximas fueron registradas por la estación La Pampilla (TABLA 3) entre 1981 y 2019. La magnitud se clasificó según CENEPRED en cinco descriptores: Mayor a 8,0 Mw, 7,9 a 6,0 Mw, 4,5 a 5,9 Mw, y 3,5 a 4,4 Mw.

2.10 Parámetros de evaluación del fenómeno

Los parámetros de evaluación incluyen el periodo de retorno e intensidad para flujo de detritos y sismos. El tiempo de retorno se calculó con la fórmula de Weibull (Chow, 1964) para las cinco precipitaciones máximas (TABLA 3). La intensidad sísmica se clasificó según CENEPRED en: XI – XII, IX – X, VII – VIII, V – VI y II – IV.

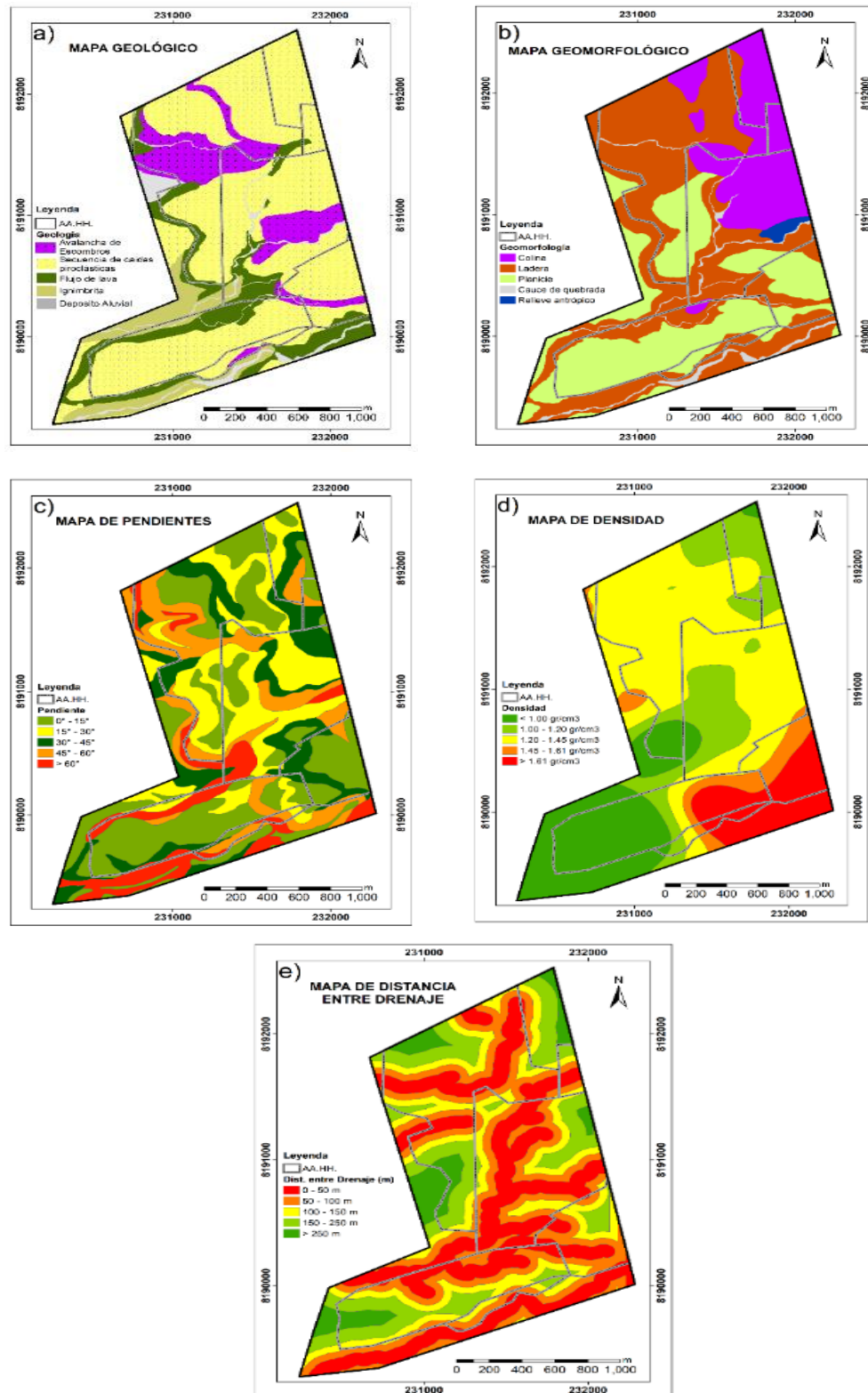


FIGURA 2. (a) Geológico; (b) Geomorfológico; (c) pendientes; (d) densidad, y (e) distancia entre drenajes. Fuente: elaboración propia

TABLA 3. Precipitaciones máximas y tiempos de retorno. Fuente: elaboración propia

Año	P Máx. (mm)	Periodo de retorno (años)
1997	26	10
2008	35	40
2012	23	5
2015	42	50
2016	33	20

2.11 Determinación de la vulnerabilidad

Se evaluaron las dimensiones económica y social de 378 manzanas de los asentamientos humanos, considerando los componentes de exposición, fragilidad y resiliencia. La vulnerabilidad económica se relaciona con las actividades e infraestructuras expuestas a fenómenos naturales, que afectan tanto la economía de la población como la del Estado; mientras que la vulnerabilidad social se centra en la población directamente expuesta. Para esta evaluación se recopiló información sobre las características físicas de las viviendas y de la población, organizadas en diez parámetros.

2.12 Determinación del riesgo

El riesgo se calcula en función del peligro y la vulnerabilidad, representado por la ecuación:

$$Rie | t = f(Pi, Ve) | t$$

Donde:

R = Riesgo

f = En función

Pi = Peligro con la intensidad mayor o igual a i durante un período de exposición t

Ve = Vulnerabilidad de un elemento expuesto

Esta ecuación está adaptada a la Ley N°29664, que crea el CENEPRED. La clasificación del nivel de riesgo utiliza una matriz de doble entrada: grado de peligro y grado de vulnerabilidad.

3. Resultados

Al procesar las imágenes ASTER y restar la banda 1 (región verde) de la imagen del año 2000, se obtuvo una composición en tonos de gris con valores entre -0,129938 y 0,320827. Posteriormente, se aplicó pseudocolor

monobanda con una desviación estándar de 2,00, obteniendo nuevos valores mínimos (-0,0418483) y máximos (0,552912) y generando cuatro clases con el color magma. El histograma se ajustó mediante la media $\pm$ 2 desviaciones estándar, donde los valores cercanos a la media representan píxeles sin cambios, los negativos indican áreas que existían en el 2000 pero desaparecieron en 2019, y los positivos, zonas nuevas ocupadas por población, destacadas en amarillo.

Al comparar las imágenes, se observa que en el año 2000 no existían asentamientos humanos (AA.HH.), mientras que en 2019 se evidencia un crecimiento poblacional hacia las laderas del volcán Misti (FIGURA 3A). El *density slice* de la imagen ASTER muestra las zonas de población asentada en amarillo, corroboradas con la imagen PeruSAT-1 (FIGURA 3B). Las áreas verdes corresponden a lomas redondeadas y los tonos azules a laderas empinadas o zonas deprimidas (FIGURA 3C).

3.1 Niveles de peligro, vulnerabilidad y riesgo

Se calculó el peligro de flujo de detritos (FIGURA 4A) y sismos (FIGURA 4B), considerando factores condicionantes, desencadenantes y de evaluación. Los pesos ponderados se calcularon con matrices de (Saaty, 2008), (TABLA 4; TABLA 5). El peligro por flujo de detritos se clasificó en cuatro niveles: muy alto, alto, medio y bajo. Las zonas de muy alta peligrosidad corresponden a cauces de quebradas y laderas abruptas. Este peligro afecta menos a los asentamientos humanos, ya que están en zonas de pendientes moderadas a llanas. La peligrosidad se clasificó según los rangos que se observan en la TABLA 6.

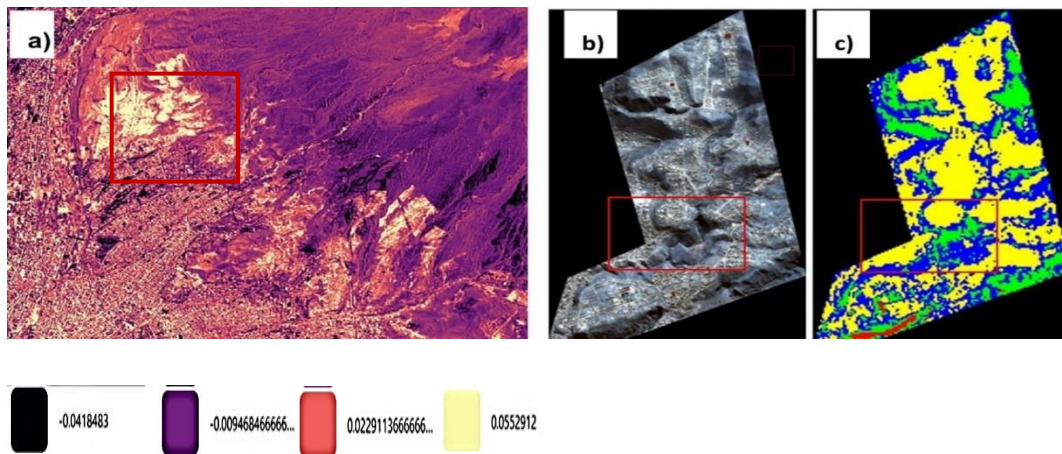


FIGURA 3. (a) Imagen generada con pseudocolor, y la rampa de color magma; (b) Imagen PeruSAT-1 y (c) *density slice*

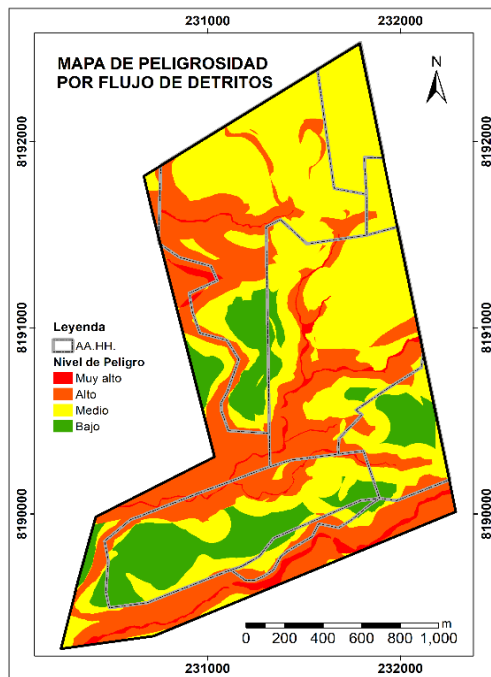


FIGURA 4a. Peligrosidad por flujo de detritos.
Fuente: elaboración propia

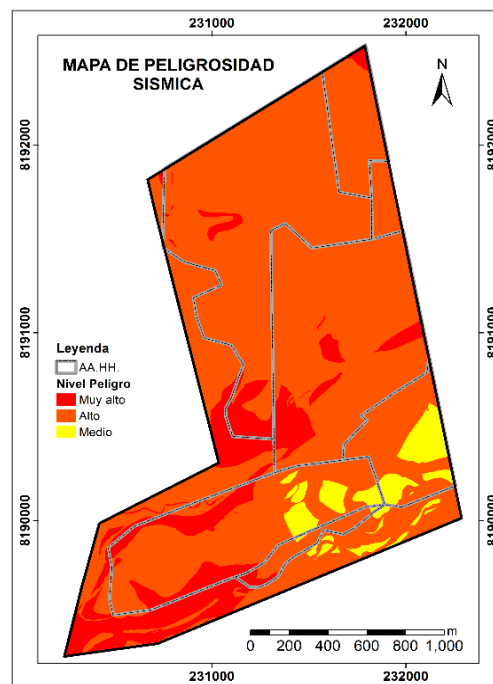


FIGURA 4b. Peligrosidad por sismos.
Fuente: elaboración propia

La peligrosidad sísmica se clasificó en tres niveles: muy alta, alta y media. El nivel muy alto se focaliza en flujos de lava andesíticos, que están muy fracturados y podrían generar caída de rocas en

un evento sísmico. El nivel alto se extiende por casi toda la zona, especialmente al norte, mientras que el sureste presenta un nivel medio debido a la alta densidad del suelo.

TABLA 4. Pesos ponderados para la evaluación del peligro sísmico. Fuente elaboración propia

Peligrosidad	Peso	Factores	Peso	Factores	Peso	Factores	Descriptor	Peso
	0,2	Parámetro de Evaluación	1	Parámetro de Evaluación	1,000	Periodo de retorno	cada 5 años	0,478
							cada 10 años	0,253
							cada 20 años	0,146
							cada 40 años	0,080
							cada 50 años	0,044
	0,8		0,8		0,455	Geología	Deposito aluvial	0,469
							Secuencia de caídas piroclásticas	0,267
							Depósito de avalancha de escombros	0,133
							Ignimbrita	0,088
							Flujo de lava andesítica	0,042
					0,289	Geomorfología	Cauce de quebrada	0,363
							Laderas	0,293
							Relieve antrópico	0,183
							Colina	0,109
							Planicie	0,052
	0,8		0,8		0,175	Pendiente	>60°	0,477
							45° - 60°	0,224
							30° - 45°	0,169
							15° - 30°	0,088
							0° - 15°	0,043
					0,081	Distancia entre drenajes	0 a 50 m	0,471
							50 a 100 m	0,244
							100 a 150 m	0,152
							150 a 250 m	0,088
							Mayor a 250 m	0,044

TABLA 5. Pesos ponderados para la evaluación del peligro a flujo de detritos. Fuente: elaboración propia

Peligrosidad	Peso	Factores	Peso	Factores	Peso	Factores	Descriptor	Peso
Peligrosidad	0,2		1		1,000		Entre XI – XII	0,428
							Entre IX – X	0,292
							Entre VII – VIII	0,152
							Entre V – VI	0,077
							Entre III – IV	0,051
	0,8		0,8		0,496	Densidad	< 1.0	0,414
							1.0 - 1.2	0,290
							1.20 - 1.45	0,161
							1.45 - 1.61	0,087
							> 1.6	0,048
					0,278	Pendiente	>60°	0,480
							45° - 60°	0,226
							30° - 45°	0,161
							15° - 30°	0,089
							0° - 15°	0,045
					0,155	Geología	Secuencia de caídas piroclásticas	0,448
							Depósito de avalancha de escombros	0,240
							Depósito aluvial	0,180
							Ignimbrita	0,088
							Flujo de lava andesítico	0,044
				Factores condicionantes	0,071	Geomorfología	Laderas	0,439
							Relieve antrópico	0,280
							Colina	0,143
							Planicies	0,097
							Cauce de quebrada	0,042
		Susceptibilidad	0,2	Factor desencadenante	1,000	Magnitud	Mayor a 8.0	0,401
							7.9 a 6.0	0,304
							4.5 a 5.9	0,147
							3.5 a 4.4	0,086
							Menor a 3.4	0,062

TABLA 6. Niveles de peligrosidad a flujo de detritos y sismos. Fuente: elaboración propia

Nivel de peligro	Rangos de peligrosidad a flujos de detritos			Rangos de peligrosidad ante sismo		
Muy alto	0,46	< P≤	0,262	0,431	< P≤	0,276
Alto	0,262	< P≤	0,148	0,276	< P≤	0,158
Medio	0,148	< P≤	0,087	0,158	< P≤	0,086
Bajo	0,087	< P≤	0,044	0,086	< P≤	0,05

Se evaluó la vulnerabilidad a flujo de detritos (FIGURA 5a) y sismos (FIGURA 5b), cuyos pesos de la dimensión económica se consideraron iguales. Para el caso del flujo de detritos se obtuvieron tres niveles de vulnerabilidad: alta, media y baja. Las manzanas con alta vulnerabilidad se concentran en el asentamiento humano de Huarangal, solo el 6,08% de las viviendas presentan un nivel bajo de vulnerabilidad. Dentro de los resultados, el factor exposición (peso 0,633) muestra que el parámetro grupo etario (peso 1,00) asigna los valores más altos a los grupos de 65 años y más (0,432) y de 0 a 14 años (0,295). En este mismo factor, el parámetro sin abastecimiento de agua (peso 0,619) alcanza su mayor peso en el rango de 80 a 100% (0,439). En cuanto al factor fragilidad (peso 0,26), el parámetro sin abastecimiento de luz (peso 0,284) registra un valor máximo de 0,409 en el rango de 80 a 100%, mientras que el parámetro sin desagüe (peso 0,096) también resulta más crítico en ese mismo rango (0,413).

Por otro lado, en el factor resiliencia (peso 0,106), el parámetro acceso a seguro (peso 1,00) alcanza un valor de 0,474 en los hogares con un acceso de 80 a 100%. En la dimensión económica (peso 0,45) se evaluaron tres factores: exposición, fragilidad y resiliencia. El factor exposición (0,633) considera el número de viviendas, donde más de 35 viviendas tienen un valor de 0,503, entre 25 y 35 viviendas 0,26, de 16 a 25 viviendas 0,134, de 6 a 15 viviendas 0,068 y de 1 a 6 viviendas 0,035. Además, se incluye el estado de conservación de las viviendas (peso 0,260), con valores de 0,4 para estado muy malo, 0,302 para malo, 0,165 para regular, 0,094 para bueno y 0,038 para muy bueno. El factor fragilidad (0,260) considera el material predominante de las paredes: madera (0,416), sillar (0,306), varios materiales (0,155), bloqueta (0,081) y ladrillo (0,043). Finalmente, la resiliencia (0,106) se analiza en función de la PEA, con valores de 0 a 19,9% (0,502), 20 a 39,9% (0,254), 40 a 59,9% (0,119), 60 a 79,9% (0,076) y 80 a 100% (0,049).

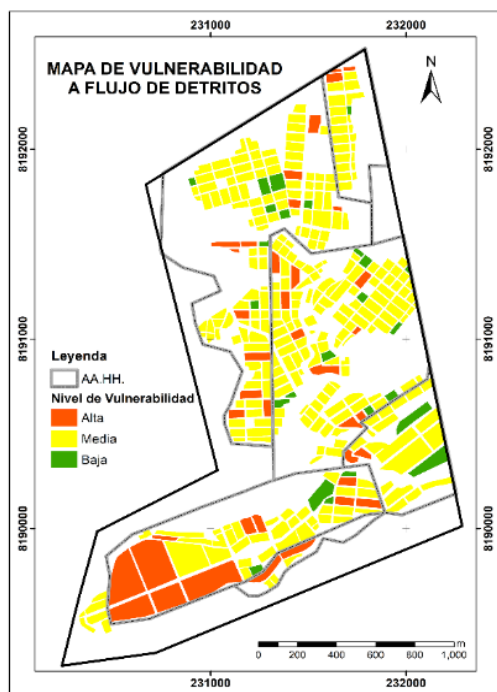


FIGURA 5a. Vulnerabilidad a flujo de detritos.
Fuente: elaboración propia

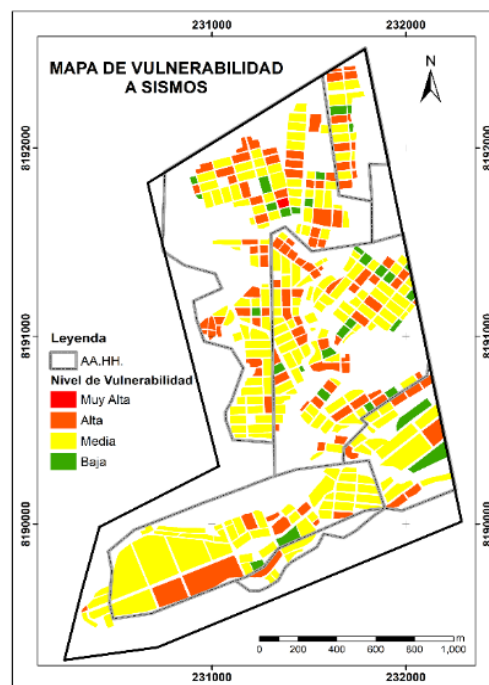


FIGURA 5b. Vulnerabilidad a sismos.
Fuente elaboración propia

Finalmente, se obtuvieron dos mapas de riesgo: flujo de detritos (FIGURA 6a) y sismos (FIGURA 6b). El primero afecta a las manzanas ubicadas en

Sin embargo, para el sismo se tiene que la mayoría de las manzanas presentan un nivel de riesgo alto, presentándose con más incidencia en los asentamientos humanos de Huarangal, Nueva

quebradas o zonas cercanas, mientras que la mayoría de la población está en áreas no expuestas a este peligro.

Villa Ecológica y Nuevo Amanecer. La clasificación del riesgo se realizó tomando en cuenta los rangos obtenidos en el análisis multicriterio (TABLA 7).

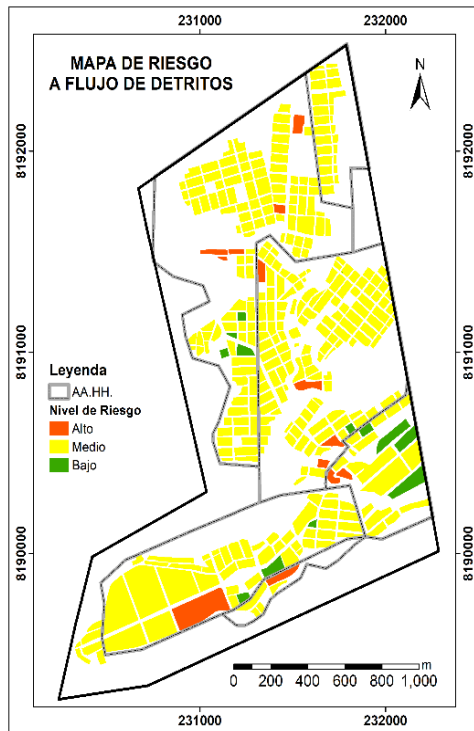


FIGURA 6a. Riesgo a flujo de detritos
Fuente: elaboración propia

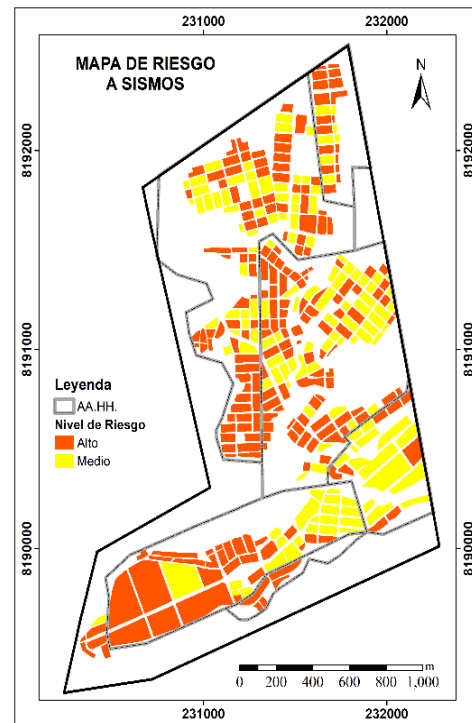


FIGURA 6b. Riesgo a sismos.
Fuente: elaboración propia

TABLA 7. Niveles de riesgo a flujo de detritos y a sismos. Fuente: elaboración propia

Nivel de riesgo	Rangos a riesgo por flujo de detritos	Rangos a riesgo sísmico
Muy alta	0,074 < R ≤ 0,209	0,074 < R ≤ 0,209
Alta	0,021 < R ≤ 0,074	0,021 < R ≤ 0,074
Media	0,007 < R ≤ 0,021	0,007 < R ≤ 0,021
Baja	0,002 < R ≤ 0,007	0,002 < R ≤ 0,007

4. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el peligro sísmico representa la principal amenaza para los asentamientos humanos del distrito de Alto Selva Alegre, debido a la presencia de suelos poco consolidados con densidades inferiores a $1,2 \text{ g/cm}^3$. Esta característica favorece la amplificación de las ondas sísmicas, lo que incrementa la probabilidad de daños estructurales, en concordancia con lo señalado por Martelli (2011) y CENEPRED (2014), quienes destacan la influencia de la geotecnia local en la severidad de los impactos sísmicos.

En cuanto a los flujos de detritos, su ocurrencia está directamente asociada a las precipitaciones intensas del verano austral y a la morfología del terreno, especialmente en las quebradas activas y laderas con pendientes pronunciadas. Este patrón coincide con los resultados obtenidos por Delaite *et al.* (2005) y Sandri *et al.* (2014), quienes demostraron que la acumulación de material piroclástico y la falta de infraestructura de drenaje son factores que aumentan la susceptibilidad a este tipo de eventos.

Por otro lado, la alta vulnerabilidad estructural y social de la población incrementa el nivel de riesgo general. Las edificaciones precarias, la carencia de servicios básicos y la ocupación de zonas inestables reflejan un proceso de crecimiento urbano desordenado, similar al observado en otras ciudades andinas (Birkmann, 2006; Carreño *et al.*, 2006).

5. Conclusión

En el presente trabajo, se obtuvieron los niveles de riesgo a flujo de detritos y sísmicos. El peligro sísmico puede afectar más a los asentamientos humanos, ya que los estudios geofísicos y geotécnicos demuestran que los suelos no son consolidados y, en su mayoría, presentan densidades menores a $1,2 \text{ gr/cm}^3$. Los flujos de detritos se desencadenan principalmente en los cauces de quebradas y en laderas abruptas, afectando a manzanas ubicadas en el mismo cauce. El riesgo sísmico muestra que la mayoría de las manzanas presentan un riesgo alto.

6. Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa por el financiamiento del proyecto de investigación IBAIB-01-2018-UNSA, por ceder el tiempo para la culminación de este estudio, como producción académica derivada de la labor docente.

7. Referencias citadas

- ASTM D5777-00. 2000. *Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation*. Disponible en: [DOI: 10.1520/D5777-18](https://doi.org/10.1520/D5777-18).
- BIRKMANN, J. 2006. *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*. United Nations University Press. Bonn, Alemania. ISBN 92-808-1135-5.
- CARREÑO, M.; CARDONA, O. y A. BARBAT. 2006. *Sistemas de indicadores para la evaluación de riesgos*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), MIS51. ISBN: 84-95999-70-6. Barcelona, España.

- CARREÑO, M.; CARDONA, O. y A. BARBAT. 2004. *Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión de riesgo*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), MIS51. ISBN: 84-95999-66-8. Barcelona, España.
- CASTRO, A.; CORREA, K.; AVALOS, G.; PORRAS, P.; CASTRO, V.; RODRÍGUEZ, L.; QUISPE, N. y K. QUISPE. 2020. *Informe Técnico: análisis del periodo lluvioso 2019/2020 a nivel nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/519>.
- CENEPRED. 2014. *Manual para evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*. Vol. 2. Lima, Perú.
- CHÁVEZ, P. S. 1996. "Image-Based Atmospheric Corrections – Revisited and Improved". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9): 1.025-1.036. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/236769129_ImageBased_Atmospheric_Corrections_-_Revisited_and_Improved.
- CHOW, V. T. 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company. New York, Estados Unidos.
- COBEÑAS, G.; THOURET, J. C.; BONADONNA, C. & P. BOIVIN. 2012. "The c. 2030 yr. BP-old Plinian eruption of El Misti, Peru: characteristics of the fallout and pyroclastic flows, and eruption dynamics". *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 241-242: 106-120. Disponible en: [doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.06.006).
- DELAITE, G.; THOURET, J. C.; SHERIDAN, M.; LABAZUY, PH.; STINTON, A.; SOURIOT, T. & C. VAN WESTEN. 2005. "Assessment of volcanic hazards of El Misti and in the city of Arequipa, Peru, based on GIS and simulations, with emphasis on lahars". *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge*, 140: 209-231.
- GIOVANNI, M. K.; BECK, S. L. & L. WAGNER. 2002. "Geophysical Research Letters". *Geophysical Research Letters*, 29(21): 2018. Disponible en: [doi:10.1029/2002GL015774](https://doi.org/10.1029/2002GL015774).
- KÜNZLER, M.; HUGGEL, C. & J. M. RAMÍREZ. 2012. "A risk analysis for floods and lahars: case study in the Cordillera Central of Colombia". *Natural Hazards*, 64: 767-796. Springer. Disponible en: [doi:10.1007/s11069-012-0271-9](https://doi.org/10.1007/s11069-012-0271-9).
- MARTELLI, K. M. 2011. *The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and floods: application to the city of Arequipa, Peru*. Laboratoire Magmas et Volcans, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, Francia. Tesis de Doctorado (inédita).
- SAATY, T. 2008. "Decision making with the analytic hierarchy process". *International Journal of Services Sciences*, 1(1): 83-98. Disponible en: [doi:10.1504/IJSSCI.2008.017590](https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590).
- SAATY, T. 1980. *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York, Estados Unidos.

- SAATY, T. 1997. *Toma de decisiones para líderes: El Proceso Analítico Jerárquico en la toma de decisiones en un mundo complejo*. Traducción de Mauricio Escude y, Eduardo Martínez y Luis Vargas. RWS Publications. Pittsburgh, Estados Unidos.
- SANDRI, L.; THOURET, J. C.; CONSTANTINESCU, R.; BIASS, S. & R. TONINI. 2014. "Long-term multi-hazard assessment for El Misti volcano (Peru)". *Bulletin of Volcanology*, 76: 1-26. Disponible en: [doi:10.1007/s00445-013-0771-9](https://doi.org/10.1007/s00445-013-0771-9).
- SCHNEIDERBAUER, S. & D. EHRLICH. 2004. *Risk, hazard, and people's vulnerability to natural hazards: a review of definitions, concepts and data*". Joint Research Centre, European Commission, EUR21410.
- THOURET, J. C.; ETTINGER, S.; GUITTON, M.; MARTELLI, K.; SANTONI, O.; MAGILL, C.; REVILLA, V. y J. A. CHARCA. 2014. "Assessing physical vulnerability in large cities exposed to debris flows and flash floods: the Arequipa (Peru) case study". *Natural Hazards*, 73(3): 1771-1815. Disponible en: [doi:10.1007/s11069-014-1172-x](https://doi.org/10.1007/s11069-014-1172-x).
- THOURET, J. C.; ENJOLRAS, G.; MARTELLI, K.; SANTONI, O.; LUQUE, J. A.; NAGATA, M.; ARGUEDAS, A. y L. MACEDO. 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. Disponible en: [doi:10.5194/nhess-13-339-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-339-2013).

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Arequipa-Perú; octubre, 2025
Revisión: octubre, 2025