

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN_2DA REVISIÓN_20_11_25.pdf

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:531041995

Fecha de entrega

20 nov 2025, 10:40 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

20 nov 2025, 10:48 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN_2DA REVISIÓN_20_11_25.pdf

Tamaño del archivo

1014.9 KB

31 páginas

6302 palabras

31.627 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía

Fuentes principales

- 4%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Texto oculto**
69 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

- 4% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	assets-eu.researchsquare.com	<1%
2	Internet	www.researchgate.net	<1%
3	Internet	www.coursehero.com	<1%
4	Publicación	Xiaomin Dai, Qihang Liu, Ziang Liu, Xincheng Wu. "Hazard Assessment of Highwa...	<1%
5	Internet	eprints.dkit.ie	<1%
6	Trabajos entregados	Griffth University on 2025-09-21	<1%
7	Trabajos entregados	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%
8	Trabajos entregados	Universidad Católica de Colombia on 2025-11-10	<1%
9	Trabajos entregados	Patricia Test Account on 2015-10-27	<1%
10	Publicación	"Advances in Debris-flow Science and Practice", Springer Science and Business M...	<1%
11	Publicación	Abe, Masahiro. "Financial Modeling of Extreme Flood Events on Corporate Proper...	<1%

12	Publicación	Chang-Ho Song, Ho Hong Duy Nguyen, Jin-Wook Kim, Ji-Sung Lee, Yun-Tae Kim, H...	<1%
13	Publicación	Keyla Manuela Alencar da Silva Alves, Daniel Rodrigues de Lira, Maria Carolina Pa...	<1%
14	Publicación	Ruichen Zhou, Kun He, Xiewen Hu, Xichao Cao, Chuanjie Xi, Yonghao Zhou, Xueqi...	<1%
15	Internet	aidisnet.org	<1%
16	Publicación	L. M. Samaniego, M. Laurencio, M. Pérez, G. Milián, A. Rondón, R. Piad. "ACTIVIDA...	<1%
17	Trabajos entregados	Universidad Catolica San Antonio de Murcia on 2025-09-24	<1%
18	Trabajos entregados	Universidad Santo Tomas on 2019-10-28	<1%
19	Internet	doi.org	<1%
20	Internet	journals.openedition.org	<1%
21	Internet	tesis.pucp.edu.pe	<1%
22	Internet	www.revistatyca.org.mx	<1%
23	Trabajos entregados	Tata Institute of Social Sciences on 2022-05-12	<1%



Artículos

Determinación del impacto potencial del flujo de detritos en viviendas de Las Colinas de Ñaña

Determination of the potential impact of debris flow on homes in Las Colinas de Ñaña

¹José Junior Paredes A. ¹Heyder Leonel Diestra V. ¹Rolando Quispe B.

¹EP. Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú

Resumen

Este estudio evalúa el impacto potencial del flujo de detritos sobre las viviendas del asentamiento *Las Colinas de Ñaña* (Lima, Perú) mediante modelamiento hidrológico e hidrodinámico acoplado. Se integraron HEC-HMS para la generación de hidrogramas y IBER 2D para la simulación de propagación, considerando escenarios con períodos de retorno (TR) de 10, 30, 50 y 100 años. Los resultados muestran velocidades máximas entre 0.17–7.81 m/s y calados de 0.01–0.36 m, con presiones dinámicas que alcanzan hasta 52.5 kPa. Las mayores intensidades se concentraron en el eje central del abanico aluvial, afectando principalmente las viviendas tipo



20 albañilería (T_1 – T_4) y madera deteriorada (T_6 – T_7). Las curvas log-normales
 21 de fragilidad indican probabilidades de daño entre 0.10–0.98, con alta
 22 vulnerabilidad estructural bajo presiones superiores a 20 kPa. Se concluye
 23 que los escenarios TR = 30–50 años representan el mayor riesgo localizado,
 24 mientras que TR = 100 años evidencia una dispersión del flujo y menor
 25 concentración de energía. Los resultados aportan una base técnica para la
 26 planificación urbana y la reducción del riesgo ante movimientos en masa en
 27 zonas de expansión urbana.

28 **Palabras clave:** flujos de detritos, presión dinámica, curvas de fragilidad,
 29 modelación hidrodinámica, vulnerabilidad estructural, riesgo urbano.

30 Abstract

31 This study evaluates the potential impact of debris flow on residential
 32 structures in *Las Colinas de Ñaña* (Lima, Peru) through a coupled
 33 hydrological–hydrodynamic modeling approach. HEC-HMS was used to
 34 generate hydrographs, while IBER 2D simulated debris flow propagation
 35 under return periods (TR) of 10, 30, 50, and 100 years. The results indicate
 36 maximum velocities ranging from 0.17 to 7.81 m/s and flow depths between
 37 0.01 and 0.36 m, with dynamic pressures reaching up to 52.5 kPa. The
 38 highest intensities were concentrated along the central axis of the alluvial
 39 fan, mainly affecting masonry (T_1 – T_4) and deteriorated wood/OSB
 40 structures (T_6 – T_7). Log-normal fragility curves showed damage



probabilities between 0.10 and 0.98, with high vulnerability under pressures exceeding 20 kPa. The 30–50-year scenarios were the most critical, showing concentrated pressures and structural exposure, while the 100-year event displayed a wider but less energetic flow dispersion. Overall, the study provides a technical framework to support urban planning and risk mitigation strategies in areas exposed to debris flow hazards.

Keywords: debris flows; dynamic pressure; fragility curves; hydrodynamic modeling; structural vulnerability; urban risk.

Introducción

Los flujos de detritos son procesos altamente destructivos en cuencas de montaña y abanicos aluviales por sus elevadas densidades y velocidades. En el Perú, estos eventos (*huaycos*) afectan recurrentemente zonas urbanas asentadas sobre conos de deyección, donde predominan viviendas informales. Estudios como los de Yan et al. (2023), Barnhart et al. (2024) y Bloomberg et al. (2025) señalan que el daño estructural depende principalmente de la presión, la velocidad y el calado del flujo, así como de las características constructivas de las edificaciones.

El acoplamiento entre modelos hidrológicos e hidrodinámicos ha demostrado ser eficaz para representar la generación y propagación de flujos de detritos bajo lluvias extremas, mientras que los enfoques



61 probabilísticos como el propuesto por Papathoma-Köhle et al. (2017)
 62 permiten estimar la probabilidad de daño estructural a partir de variables
 63 hidráulicas clave. Sin embargo, la aplicación conjunta de estas técnicas
 64 sigue siendo limitada en zonas como Las Colinas de Ñaña, donde la
 65 complejidad geomorfológica y la variabilidad constructiva requieren
 66 metodologías adaptadas al territorio.

67 En este estudio se aplica un enfoque hidrológico-hidrodinámico-
 68 probabilístico que integra: (i) hidrogramas generados mediante el método
 69 SCS en HEC-HMS; (ii) la simulación del flujo en IBER 2D mediante
 70 ecuaciones de Saint-Venant; y (iii) la evaluación estructural basada en los
 71 criterios identificados por Yan et al. (2023) y Bloomberg et al. (2025). Se
 72 plantea la hipótesis de que la presión dinámica generada por el flujo incide
 73 directamente en la probabilidad de daño estructural, estimada mediante
 74 curvas log-normales siguiendo a Papathoma-Köhle et al. (2017).

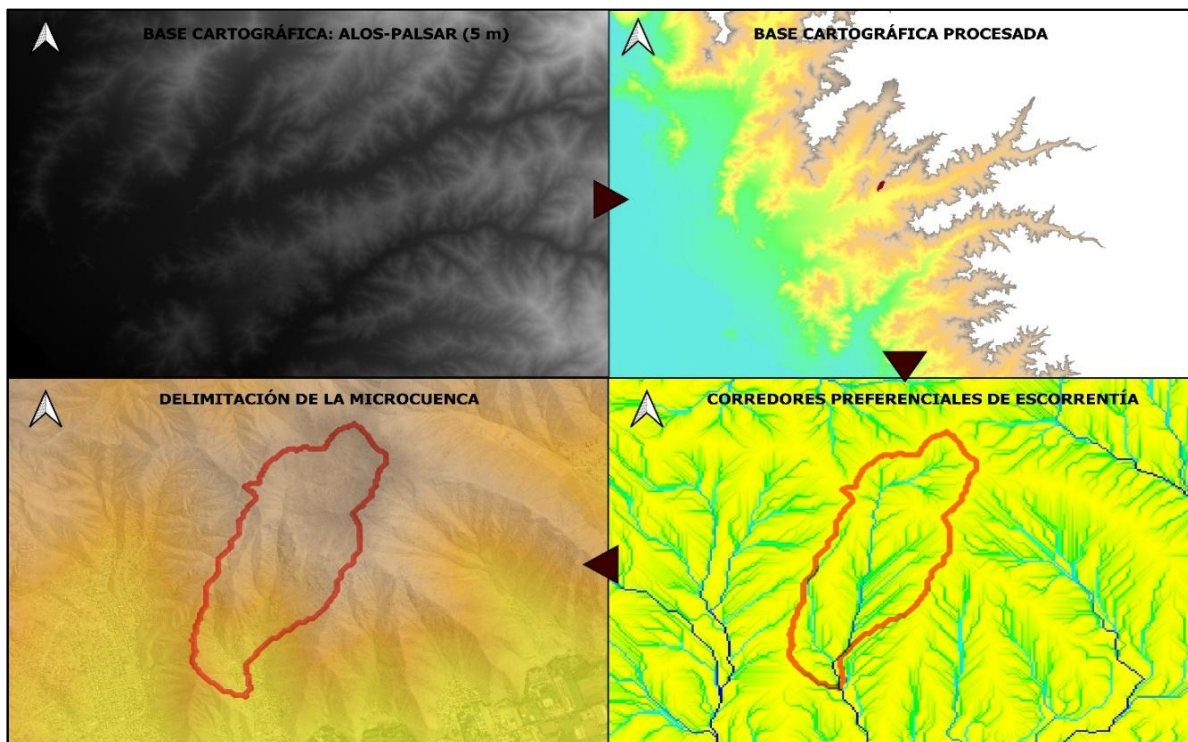
16

75 **Materiales y métodos**

76 El análisis se desarrolló en el A.H. Las Colinas de Ñaña (Lurigancho-Chosica,
 77 Lima, Perú), ubicado en la margen derecha del río Rímac, entre 950–1050
 78 m s.n.m., sobre abanicos aluviales con pendientes de 25–40 % y un área
 79 aproximada de 1 km², zona con recurrencia documentada de flujos de
 80 detritos.



81 Para la construcción de la base geométrica del modelo se emplearon
 82 imágenes satelitales DEM ALOS-PALSAR de 5 m (USGS/Land Viewer), lo
 83 que permitió definir los corredores de escorrentía y delimitar la microcuenca
 84 en QGIS 3.40.7, siguiendo los procedimientos recomendados por Borrelli et
 85 al. (2021). La Figura 1 muestra el proceso de elaboración de la base
 86 cartográfica utilizada en la modelación.



87
 88 **Figura 1.** Delimitación de la microcuenca y extracción de corredores de
 89 escorrentía a partir del DEM ALOS-PALSAR. **Fuente:** Elaboración propia.



Los registros pluviométricos de la estación Ñaña (IDSEEP) permitieron construir curvas IDF y generar hietogramas mediante el método ABM ($\Delta t = 1$ min), adecuado para eventos torrenciales (Khan et al., 2022; Sanz et al., 2021). La respuesta hidrológica se obtuvo en HEC-HMS con el método SCS, mientras que la propagación del flujo se simuló en IBER 2D usando las ecuaciones de Saint-Venant. Las simulaciones generaron mapas de velocidad y calado para una duración efectiva de 7 min ($T_c = 6,9$ min), integrados en QGIS para el análisis espacial. Los parámetros utilizados se resumen en la Tabla N.º 1.

Tabla 1 Proceso hidrológico-hidrodinámico aplicado

Etapas / Parámetro	Metodología / Modelo	Valor / Fuente
Modelo hidrológico	HEC-HMS 4.12 (SCS)	—
Curve Number (CN)	Derivado del mapa de suelos (MINAGRI, 2016)	68–82
Tiempo de concentración (T_c)	Kirpich (1940), validado con Giandotti (1953) y SCS	6.9 min
Lluvias de diseño (TR)	Curvas IDF IDSEEP (2016)	10, 30, 50 y 100 años
Hietogramas	Método de Bloques Alternos ($\Delta t = 1$ min)	$D \approx T_c$ (7 min)
Modelo hidráulico	IBER 2D (Saint-Venant promediadas en profundidad)	—
Factores dominantes	Topografía, gravedad y fricción (Manning)	—

Fuente: Elaboración propia con base en Sanz et al. (2021), IDSEEP (2016), MINAGRI (2016) y métodos clásicos de Kirpich (1940) y Giandotti (1953).



Es importante recordar que el período de retorno (TR) expresa que mayores TR suelen asociarse a incrementos de caudal y presión, en modelos 2D como IBER esta relación no es estrictamente lineal debido al efecto modulador de la morfología y de la distribución espacial del flujo.

A continuación, se procedió a calcular la **presión dinámica del flujo**, empleando la expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho_m v^2,$$

La densidad aparente del material se adoptó a partir de un estudio geotécnico municipal, obteniéndose un valor promedio de $\rho_m = 1720 \text{ kg/m}^3$, representativo de un flujo fangoso viscoplástico con alta concentración de sólidos. Esta variable es clave para estimar el impacto estructural (Jakob et al., 2016) y ha sido empleada en evaluaciones recientes de flujos densos, como Khan et al. (2022). Asimismo, la dinámica del flujo se zonificó en tres segmentos permitiendo representar gradientes de amenaza, tal como recomiendan Barnhart et al. (2024) y Sanz-Ramos et al. (2021)

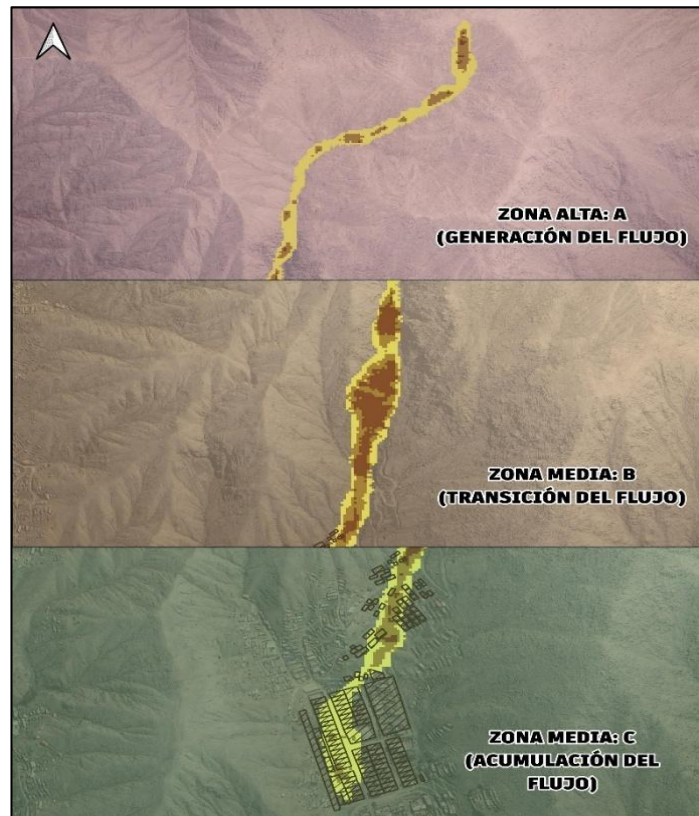


Figura 2. Representación de la zonificación del flujo. **Fuente:** Elaboración propia (2024), basada en modelos hidrológico-hidrodinámicos (HEC-HMS 4.12 e IBER 3.3.1) y ortoimágenes ALOS-PALSAR (USGS, 2023).

Posteriormente, Se utilizó una Ficha de Evaluación de Edificaciones del CENEPRED para identificar las características estructurales relevantes. La revisión sistemática permitió seleccionar criterios utilizados en estudios



de vulnerabilidad estructural coincidiendo con metodologías actuales desarrolladas por Nieto et al. (2021) y Papathoma-Köhle et al. (2020)

Tabla 2. Criterios estructurales para la clasificación de viviendas expuestas

Criterio	Parámetros	Justificación
Material del muro	Madera, ladrillo, OSB	Controla rigidez y resistencia al impacto (Yan et al., 2023; Barnhart et al., 2024).
Estado de conservación	Bueno, regular, malo	El deterioro aumenta fragilidad estructural (Bloomberg et al., 2025; Cánovas et al., 2022).
Número de niveles	1–2 niveles	Mayor masa y riesgo de colapso parcial (Yan et al., 2023; Li & Huang, 2021).

Fuente: Elaboración propia a partir de criterios estructurales reportados por Yan et al. (2023), Barnhart et al. (2024), Bloomberg et al. (2025), Cánovas et al. (2022) y Li & Huang (2021).

La matriz vivienda–presión se procesó en RStudio para estimar P_{50} y β mediante el ajuste de curvas de fragilidad lognormales, siguiendo las metodologías de Nieto et al. (2021) y Qiu & Geng (2024). Estas curvas relacionan la presión dinámica con la probabilidad de daño y constituyen la base del análisis de vulnerabilidad. Con ello se completa el procedimiento metodológico que integra la modelación hidrológica, la simulación hidrodinámica y la evaluación estructural, permitiendo cuantificar el riesgo físico de manera coherente y trazable.



Resultados

1. Respuesta hidrodinámica del flujo de detritos: magnitud y variabilidad de la presión dinámica

La Figura 4 muestra la distribución de las 132 viviendas del área de estudio y la franja de impacto del flujo de detritos. De este total, se seleccionaron 78 viviendas expuestas (59 %) siguiendo criterios de representatividad y validez estructural.

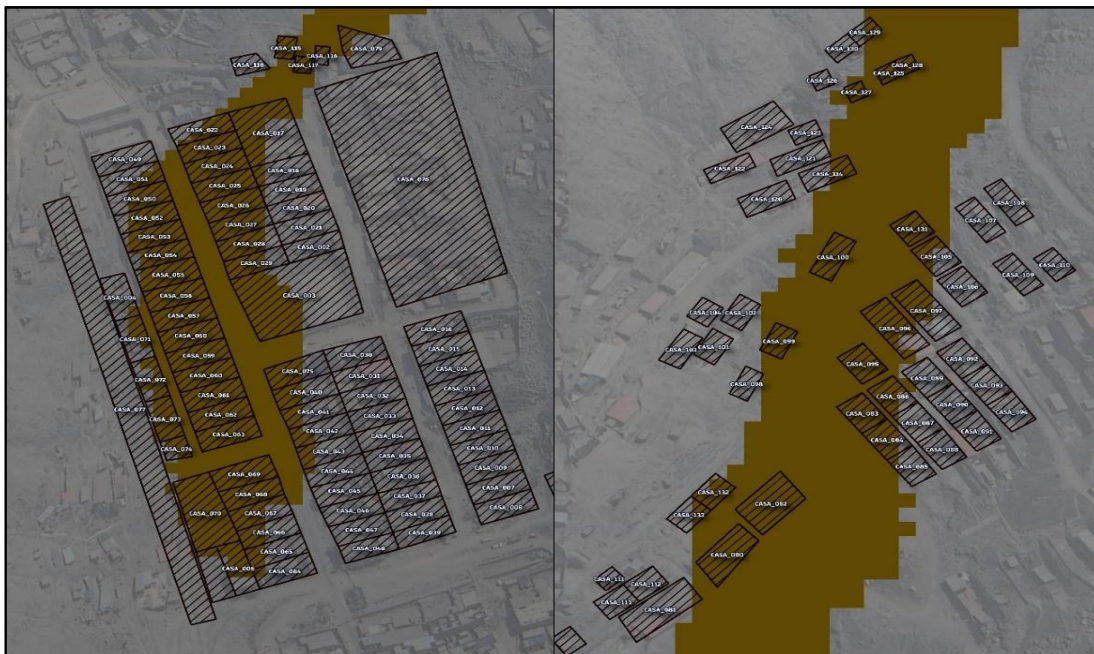


Figura 3 Viviendas expuestas al flujo de detritos. **Fuente:** Elaboración propia con resultados de IBER 2D y ortofoto base.



Bajo los umbrales de velocidad y altura simulados, se obtuvieron presiones $p > 0.02$ kPa, identificándose tres niveles de exposición: 35.9 % leve (0.5–5 kPa), 30.8 % moderada (5–20 kPa) y 33.3 % severa (>20 kPa) (Tabla 3). La mayor concentración de viviendas afectadas se ubica en el corredor central de escorrentía, donde predominan presiones superiores a 20 kPa, consistentes con zonas de fuerte energía del flujo

Tabla 3. Viviendas expuestas al flujo de detritos

Categoría de presión (kPa)	Viviendas (n)	% del total	Tipo de exposición	Tipo de Daño
0.5 – 5 (leve)	28	35.9	Parcial	leves y arrastre superficial
5 – 20 (moderada)	24	30.8	Mixta	Daños no estructurales significativos
> 20 (severa)	26	33.3	Directa	daño severo o colapso potencial
Total	78	100	—	

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones 2D en IBER (v3.3.1)

Estos rangos son consistentes con estudios recientes sobre flujos densos y frentes impulsivos (Chen et al., 2021; Hürlimann et al., 2022; Yan et al., 2023; Song et al., 2023), así como con evidencias empíricas que reportan presiones de varias decenas a >100 kPa en eventos reales (Zhou et al., 2020; Wei et al., 2024; Barnhart et al., 2024).

Los resultados hidrológicos–hidráulicos muestran que el caudal pico aumenta de manera progresiva: $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR10), $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR30–50) y $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$ (TR100). El tiempo al pico se mantiene prácticamente constante,



alrededor de 8 min, en buena concordancia con la estimación del método SCS (7.64 min para $T_c = 6.9$ min). El hidrograma se caracteriza por un ascenso rápido y una recesión corta. La Tabla 4 presenta las velocidades ($v_{\max}$) y calados máximos ($h_{\max}$) en las diez viviendas con mayor intensidad hidráulica para TR10, TR30, TR50 y TR100. Estas corresponden a los casos más críticos de interacción flujo-estructura y sirven como insumo para el cálculo de la presión dinámica y la evaluación de vulnerabilidad estructural.

Tabla 4. Parámetros hidráulicos máximos (velocidad y calado) en las viviendas con mayor exposición

Vivienda	$v_{\max}$ TR10 (m/s)	$h_{\max}$ TR10 (m)	$v_{\max}$ TR30 (m/s)	$h_{\max}$ TR30 (m)	$v_{\max}$ TR50 (m/s)	$h_{\max}$ TR50 (m)	$v_{\max}$ TR100 (m/s)	$h_{\max}$ TR100 (m)
CASA_128	7.812	0.139	6.094	0.123	6.094	0.123	5.288	0.131
CASA_125	6.139	0.124	6.620	0.111	6.620	0.111	4.487	0.112
CASA_057	4.710	0.105	6.640	0.199	6.640	0.199	5.262	0.129
CASA_063	5.119	0.129	5.305	0.158	5.305	0.158	5.491	0.136
CASA_082	4.150	0.077	4.457	0.104	4.457	0.104	4.761	0.081
CASA_056	3.257	0.134	4.341	0.174	4.341	0.174	3.599	0.140
CASA_070	3.513	0.264	4.077	0.266	4.077	0.266	4.083	0.288
CASA_084	3.032	0.070	3.874	0.080	3.874	0.080	3.188	0.074
CASA_080	3.176	0.099	3.756	0.130	3.756	0.130	3.820	0.106
CASA_100	3.691	0.082	3.675	0.082	3.675	0.082	3.096	0.081

Fuente: Elaboración propia utilizando los resultados del modelo hidrodinámico IBER 3.3.1.



La Tabla 5 presenta las presiones dinámicas máximas calculadas a partir de las velocidades y calados de la Tabla 4, incluyendo la ubicación UTM de cada vivienda. Estas diez edificaciones corresponden a los casos más críticos, al concentrar las mayores presiones para los distintos periodos de retorno y, por tanto, la mayor exposición al daño estructural.

Tabla 5. Presión dinámica máxima en las viviendas con mayor exposición

Vivienda	X_UTM	Y_UTM	P_{max} TR10 (kPa)	P_{max} TR30 (kPa)	P_{max} TR50 (kPa)	P_{max} TR100 (kPa)
CASA_128	300569.99	8 675 686.0	52.48	31.94	31.94	24.05
CASA_125	300564.66	8 675 684.0	32.41	37.69	37.69	17.32
CASA_057	300449.76	8 675 323.0	19.08	37.92	37.92	23.81
CASA_063	300467.83	8 675 266.0	22.54	24.20	24.20	25.93
CASA_082	300530.33	8 675 534.0	14.81	17.08	17.08	19.49
CASA_056	300446.67	8 675 333.0	9.12	16.21	16.21	11.14
CASA_070	300458.45	8 675 228.0	10.61	14.29	14.29	14.34
CASA_084	300564.16	8 675 556.0	7.91	12.91	12.91	8.74
CASA_080	300517.64	8 675 516.0	8.68	12.13	12.13	12.55
CASA_100	300548.39	8 675 620.0	11.71	11.61	11.61	8.24

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones 2D en IBER 3.3.1

2. Resultados de vulnerabilidad estructural: estimación log-normal del daño por tipología:

Se estimaron los parámetros P_{50} y β para las viviendas críticas seleccionadas por su mayor exposición, obteniéndose las probabilidades



de daño estructural. La Tabla 6 presenta los parámetros P_{50} y β asociados a cada vivienda crítica, agrupadas según su tipología estructural

Tabla 6. Parámetros de fragilidad (P_{50} y β) en las viviendas con mayor exposición

Vivienda	Tipología	P_{50}	β	Inicio de Daño ($\approx 10\%$)	Daño Moderado ($\approx 50\%$)	Colapso ($\approx 90\%$)
CASA_128	T2_lad_reg_bueno_1p	2.9422	0.40	$\sim 0.6-0.8$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 8-10$ kPa
CASA_125	T2_lad_reg_bueno_1p	2.9422	0.40	$\sim 0.6-0.8$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 8-10$ kPa
CASA_057	T2_lad_reg_bueno_1p	2.9422	0.40	$\sim 0.6-0.8$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 8-10$ kPa
CASA_063	T2_lad_reg_bueno_1p	2.9422	0.40	$\sim 0.6-0.8$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 8-10$ kPa
CASA_082	T2_lad_reg_bueno_1p	2.9422	0.40	$\sim 0.6-0.8$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 8-10$ kPa
CASA_056	T4_lad_reg_bueno_2p	2.3819	0.30	$\sim 1.0-1.5$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 10-15$ kPa
CASA_070	T4_lad_reg_bueno_2p	2.3819	0.30	$\sim 1.0-1.5$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 10-15$ kPa
CASA_084	T5_ligero_reg_bueno_1p	2.9409	0.30	$\sim 0.3-0.5$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 4-6$ kPa
CASA_080	T5_ligero_reg_bueno_1p	2.9409	0.30	$\sim 0.3-0.5$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 4-6$ kPa
CASA_100	T4_lad_reg_bueno_2p	2.3819	0.30	$\sim 1.0-1.5$ kPa	$\sim 2-3$ kPa	$\sim 10-15$ kPa

Fuente: Elaboración propia a partir del ajuste de curvas de fragilidad lognormal en RStudio

Se seleccionó la curva de fragilidad del tipo de vivienda con mayor exposición y potencial destructivo, según los criterios de la Tabla 2. La Figura 5 muestra la curva representativa correspondiente a la Tipología T2 (ladrillo – regular – 1 piso), al ser la edificación sometida a las presiones más altas y, por tanto, la más vulnerable ante incrementos en la presión dinámica.

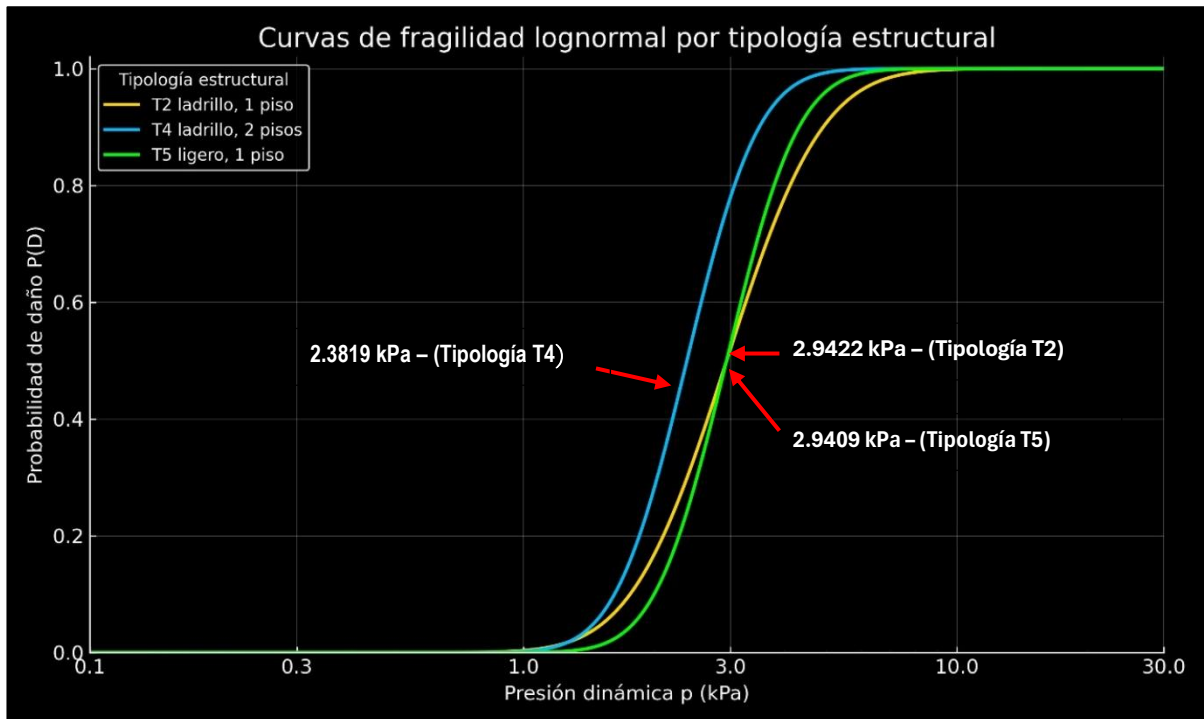


Figura 4. Curva de Fragilidad de las tipologías. **Fuente:** Elaboración propia en base a las curvas de fragilidad generadas en RStudio.

A partir de los parámetros de fragilidad P_{50} y β y de las curvas mostradas en la Figura 5, se aprecia un comportamiento diferenciado entre las tipologías analizadas. La tipología T4 (ladrillo, regular, 2 pisos) presenta el menor P_{50} (2.38 kPa), con la curva desplazada hacia la izquierda, por lo que alcanza probabilidades de daño del orden de 50 % con presiones más



207 bajas, evidenciando una mayor vulnerabilidad frente al flujo. Las tipologías
 208 T2 y T5, ambas de un piso, muestran valores de P_{50} cercanos a 2.94 kPa;
 209 sin embargo, T2 presenta una respuesta más dispersa ($\beta=0.40$), mientras
 210 que T5 exhibe una transición más brusca ($\beta=0.30$), de modo que mantiene
 211 bajas probabilidades de daño para presiones reducidas, pero una vez
 212 superado su umbral el incremento de daño es más rápido. Estos patrones
 213 son coherentes con los umbrales de inicio de daño, daño moderado y
 214 colapso sintetizados en la Tabla 6.

215 3. **Análisis integrado del impacto: presión dinámica del flujo y** 216 **probabilidad de daño estructural**

217 La Tabla 7 presenta la relación entre la intensidad del flujo y la vulnerabilidad
 218 estructural, a partir de la cual se obtiene el resultado integrado de riesgo
 219 mediante los siguientes parámetros:

220 **Tabla 7.** Matriz para la estimación del riesgo

Intensidad del flujo (kPa)	Vulnerabilidad estructural (PD)	Resultado integrado
Alta (> 7.5 kPa)	Crítica (>0.80)	Riesgo extremo
Alta (> 7.5 kPa)	Severo (50-80)	Riesgo severo
Alta (> 7.5 kPa)	Moderada (0.20–0.50)	Riesgo moderado
Alta (> 7.5 kPa)	Baja (<0.20)	Riesgo leve
Moderada (2–7.5 kPa)	Crítica (>0.80)	Riesgo extremo
Moderada (2–7.5 kPa)	Moderada (0.20–0.50)	Riesgo moderado



Moderada (2–7.5 kPa)	Baja (<0.20)	Riesgo leve
Baja (<2 kPa)	Cualquiera	Riesgo leve

Fuente: Elaboración propia a partir de la metodología de análisis integrado peligro–vulnerabilidad (Qiu & Geng, 2024).

15

Se sintetizan en la Tabla 8 los resultados integrados de presión dinámica y probabilidad de daño para las viviendas más expuestas en los escenarios TR30 y TR50. Aunque las diez viviendas analizadas están sometidas a presiones dinámicas superiores a 7.5 kPa correspondientes a una intensidad alta o crítica, las probabilidades de daño varían entre ellas, lo que evidencia diferencias en la respuesta estructural según la tipología constructiva.

Tabla 8. Presión probabilidad de daño para viviendas críticas (TR30–TR50)

Vivienda	Tipología	P_TR30 y 50 (kPa)	PD_TR30 y 50	Resultado
CASA_128	T2_lad_reg_bueno_1p	31.94	0.9188	Riesgo extremo
CASA_125	T2_lad_reg_bueno_1p	37.69	1.0000	Riesgo extremo
CASA_057	T2_lad_reg_bueno_1p	37.92	1.0000	Riesgo extremo
CASA_063	T2_lad_reg_bueno_1p	24.20	0.9188	Riesgo extremo
CASA_082	T2_lad_reg_bueno_1p	17.08	0.2618	Riesgo moderado
CASA_056	T4_lad_reg_bueno_2p	16.21	0.1540	Riesgo leve
CASA_070	T4_lad_reg_bueno_2p	14.29	0.1541	Riesgo leve
CASA_084	T5_ligero_reg_bueno_1p	12.91	0.1504	Riesgo leve
CASA_080	T5_ligero_reg_bueno_1p	12.13	0.1504	Riesgo leve
CASA_100	T4_lad_reg_bueno_2p	11.61	0.1541	Riesgo leve



231 **Fuente:** Elaboración propia a partir de la metodología de análisis integrado
232 peligro-vulnerabilidad

233 La figura 6 muestra los mapas que constituyen el insumo final y operativo
234 del estudio, ya que permiten identificar con claridad las áreas de peligro.



235
236 **Figura 6.** Distribución espacial de probabilidades de daño por flujo de
237 detritos (TR = 30 y 50 años). **Fuente:** Elaboración propia a partir de
238 resultados del modelamiento hidrodinámico 2D en IBER 3.3.1



Es muy importante recalcar que para validar el estudio se realizaron métricas que evidencian coherencia física y estadística del esquema integrado (Paredes et al., 2023; Torres & Fernández, 2023).

La Tabla 9 sintetiza los principales resultados de validación de los modelos, evidenciando la confiabilidad y consistencia de los resultados obtenidos.

Tabla 9. Métricas para validación de resultados

Etapa	Métrica	Valor aceptable	Valor óptimo	Resultado del estudio
Hidrología	Error Tp	$\leq 15 \%$	$\leq 10 \%$	9.2 %
Hidrología	R ² hidrograma	≥ 0.85	≥ 0.90	0.93
Hidrodinámica	Error p-v-p	$\leq 10 \%$	$\leq 5 \%$	3.7 %
Probabilística	RMSE	< 0.01	< 0.005	0.0011
Probabilística	R ²	≥ 0.95	≥ 0.98	> 0.98
Validación espacial	Coincidencia	$\geq 70 \%$	$\geq 85 \%$	87 %

Fuente: Elaboración propia a partir de la calibración y validación del modelo hidrológico e hidrodinámico 2D (IBER) y del ajuste probabilístico.

Discusión

Los escenarios con períodos de retorno de 30 y 50 años resultan ser los más severos para la zona de estudio, concentrando presiones dinámicas entre 24 y 38 kPa en las viviendas ubicadas en el corredor principal del flujo. Estos valores se sitúan dentro de los rangos reportados por Barnhart



14

et al. (2024), Bloomberg et al. (2025) y Yan et al. (2023), quienes identifican presiones superiores a 20 kPa como umbrales asociados a daño estructural severo en áreas urbanas expuestas a flujos densos, lo que respalda la coherencia física de las simulaciones realizadas para Las Colinas de Ñaña.

La distribución de la presión dinámica está principalmente controlada por la velocidad del flujo, la cual depende de la pendiente local, la morfología del abanico y la densidad adoptada ($\rho \approx 1720 \text{ kg/m}^3$). En el corredor principal, donde se combinan pendientes del orden de 25–40 % con un trazado más canalizado y confinado, se alcanzan velocidades de 5–8 m/s, que se traducen en presiones de 24–38 kPa; en los sectores periféricos, con pendientes más suaves y geometrías de mayor dispersión lateral, las velocidades se reducen a 3–4 m/s, generando presiones cercanas a 11–17 kPa. De acuerdo con Jakob et al. (2016) y Hürliemann et al. (2022), la velocidad es la variable más influyente en la presión dinámica por su dependencia cuadrática, mientras que la morfología actúa como un controlador indirecto al concentrar o disipar el flujo según el grado de confinamiento. En este estudio la densidad del flujo se mantuvo constante; sin embargo, estudios paramétricos de Barnhart et al. (2024) y Song et al. (2023) muestran que, cuando la densidad aumenta, la presión dinámica también crece casi en la misma proporción, actuando como un factor



amplificador sobre el efecto de la velocidad. En conjunto, la evidencia sugiere que la velocidad (y, por extensión, la pendiente y la morfología que la condicionan) es el factor determinante en la distribución de presiones, mientras que la densidad modula la magnitud final del impacto, lo que refuerza la pertinencia de utilizar la presión dinámica como variable integradora en la evaluación del daño estructural.

La comparación entre la intensidad del flujo y la vulnerabilidad estructural revela una relación no lineal entre ambos factores, en correspondencia con lo señalado por Papathoma-Köhle et al. (2017) y Miteva & Howald (2022). Aunque todas las viviendas críticas experimentan presiones elevadas, la probabilidad de daño difiere significativamente según la tipología constructiva. Las viviendas T2 (lad_reg_bueno_1p) presentan probabilidades superiores al 90 %, mientras que tipologías más robustas, como T4 (lad_reg_bueno_2p) o construcciones T5 (ligero_reg_bueno_1p), muestran valores menores (<0.30). Este comportamiento confirma que la variabilidad de las tipologías constructivas condiciona directamente el nivel de vulnerabilidad, y, en consecuencia, la probabilidad de riesgo asociada a cada edificación. Este patrón es coherente con hallazgos recientes sobre curvas de fragilidad estructural reportados por Nieto et al. (2021) y Qiu & Geng (2024).



Conclusiones

El enfoque hidrológico–hidrodinámico–probabilístico confirmó que la presión dinámica es el indicador más representativo de la intensidad del flujo de detritos sobre las viviendas, al integrar velocidad, pendiente, morfología y densidad. Los escenarios con períodos de retorno de 30 y 50 años resultaron los más severos, con presiones de 24–38 kPa en el corredor principal, coherentes con rangos asociados a daño estructural severo en contextos urbanos expuestos a flujos densos.

La distribución espacial de la presión está controlada principalmente por la velocidad del flujo, condicionada por la pendiente y el grado de confinamiento morfológico. En el eje central del abanico, con pendientes de 25–40 %, se alcanzan velocidades de 5–8 m/s y presiones de 24–38 kPa, mientras que, en los márgenes, con pendientes más suaves y flujo más disperso, velocidades de 3–4 m/s solo generan presiones de 11–17 kPa. Esto evidencia que variaciones relativamente pequeñas en la topografía pueden amplificar de forma significativa el impacto sobre las edificaciones.

Las curvas de fragilidad lognormal muestran una relación no lineal entre intensidad del flujo y respuesta estructural. Las viviendas T2 (ladrillo, regular, 1 piso) sometidas a presiones de 24–38 kPa presentan probabilidades de daño superiores al 90 % (riesgo extremo), mientras que



314 las tipologías T4 (ladrillo, regular, 2 pisos) y T5 (ligero, regular, 1 piso)
315 mantienen probabilidades inferiores a 0.30 bajo presiones de 11–17 kPa, lo
316 que se traduce en riesgo leve o moderado. Esto confirma que el riesgo
317 depende tanto del nivel de presión como de la tipología constructiva.

318 Los resultados señalan la necesidad de combinar medidas de
319 mitigación y mejoras metodológicas. En gestión del riesgo, se recomienda
320 priorizar el reforzamiento de viviendas T2 en el corredor principal,
321 considerar obras de encauzamiento y disipación de energía en tramos de
322 mayor pendiente y confinamiento, y usar los mapas de presión y riesgo
323 para restringir nuevas edificaciones en zonas de acumulación. Para futuras
324 investigaciones, se sugiere estimar una densidad de flujo específica por
325 vivienda o microsector, en lugar de un valor uniforme, a fin de reflejar mejor
326 la variabilidad asociada a pendiente y morfología; además, enriquecer la
327 caracterización estructural (cimentación, irregularidades, calidad de
328 uniones) e incorporar análisis de incertidumbre y sensibilidad en las curvas
329 de fragilidad, con el objetivo de lograr evaluaciones de riesgo más
330 completas y robustas.

9

331

Agradecimientos

332 Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Peruana Unión por
333 el apoyo institucional brindado durante el desarrollo de esta investigación,



así como a las entidades públicas SENAMHI, ANA y CENEPRED por la disponibilidad de información técnica y cartográfica empleada. Igualmente, se reconoce la colaboración de los residentes del Centro Poblado Las Colinas de Ñaña, cuya participación permitió validar el levantamiento estructural y contextualizar los resultados obtenidos.

Referencias

- Barnhart, K. R., Miller, C. R., Rengers, F. K., & Kean, J. W. (2024). Evaluation of debris-flow building damage forecasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(4), 1459–1483. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1459-2024>
- Bloomberg, M., Davies, T., Moltchanova, E., Robinson, T., & Palmer, D. (2025). Identifying unrecognised risks to life from debris flows. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 647–656. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-647-2025>
- Ccanccapa-Puma, J., Hidalgo-Valdivia, A. V., Noriega-Aquise, G. Y., Aguilar-Chávez, A. E., & Marques, M. (2024). Analysis and risk prevention of flooding in high-risk gorges in the city of Arequipa, Peru. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 15(6), 142–203. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-06-04>



- 353 CENEPRED. (2020a). 02 versión MANUAL Para la Evaluación de Riesgos
354 originados por Fenómenos Naturales.
- 355 CENEPRED. (2020b). Guía para la evaluación de los efectos probables frente
356 al impacto del peligro originado por fenómenos naturales.
357 www.cenepred.gob.pe
- 358 Chen, L., Zhang, Q., & Liu, Y. (2021). Impact pressure and velocity analysis
359 of debris flow using CFD approach. *Natural Hazards and Earth System*
360 *Sciences*, 21(5), 1505–1522. [https://doi.org/10.5194/nhess-21-1505-](https://doi.org/10.5194/nhess-21-1505-2021)
361 2021
- 362 da Silva Alves, K. M. A., de Lira, D. R., D’Avila, M. C. P., de Araújo Monteiro,
363 K., & de Barros Corrêa, A. C. (2020). Debris flow susceptibility map of
364 the chañaral province - Chile. *Revista Brasileira de Geomorfologia*,
365 21(2), 571–585. <https://doi.org/10.20502/RBG.V21I3.1743>
- 366 Di Perna, A., Cuomo, S., & Martinelli, M. (2022). Empirical formulation for
367 debris flow impact and energy release. *Geoenvironmental Disasters*, 9,
368 8. <https://doi.org/10.1186/s40677-022-00210-9>
- 369 Djafri Sid Ali, M., Seddini, A., & Boudjemline, F. (2024). Flood modeling
370 using HEC-RAS 2D and IBER 2D: A comparative study for hydraulic
371 simulations. *Water Supply*, 24(5), 1631–1645.
372 <https://doi.org/10.2166/ws.2024.107>



- 373 Fischer, J., Hübl, J., & Kaitna, R. (2023). Scenario building for debris-flow
374 runout modeling. EGU sphere Discussions.
375 <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1234>
- 376 Grisales-Ospina, T., Aristizabal-Tique, V. H., & Ríos-Arboleda, J. D. (2025).
377 Analysis of torrential events in the Aburrá Valley, in the years 2010-
378 2011 with the r.avaflow tool. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 16(4),
379 80–124. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2025-04-03>
- 380 Gutiérrez, R. M., Terry, A. I. L., Gutiérrez, N. M., Gonzales, M. G., Cáceres,
381 W. M. A., Aguirre, M. Á. P., & Gonzales, A. S. L. (2024). Evaluación del
382 riesgo por flujo de detritos para la prevención de desastres en
383 Huayaringa Alta, Huarochirí. *Brazilian Journal of Animal and*
384 *Environmental Research*, 7(2), e70827.
385 <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-113>
- 386 Herbei, M., David, A., & Popescu, S. (2024). Rainfall-runoff modeling based
387 on HEC-HMS for watershed management. *Frontiers in Water*, 6, 145–
388 159. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.01234>
- 389 Huamanchumo Leiva, A., & Rodriguez Ticona, F. (2022). Evaluación del flujo
390 de detritos y de la vulnerabilidad de edificaciones para determinar los
391 niveles de riesgo en la quebrada del diablo, distrito de Alto de la Alianza,
392 provincia y región de Tacna.



- 393 Hürlimann, M., Pastor, M., Medina, V., & Quan Luna, B. (2022). Physical
394 and numerical modeling of debris flows: State of the art and new
395 developments. *Earth-Science Reviews*, 229, 104021.
396 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104021>
- 397 Jara Martel, A., & Quispe Chacon, T. Y. (2022). Generación de curvas de
398 vulnerabilidad para viviendas frente al impacto de flujos
399 hiperconcentrados en la Urb. San Idelfonso – La Tinguña – Ica como
400 herramienta de gestión de riesgos de desastres naturales para
401 cuantificar daños materiales.
- 402 Kong, X., Wang, A., Bi, X., & Wei, J. (2020). Daily precipitation
403 characteristics of regcm4 and WRF in china and their interannual
404 variations. *Climate Research*, 82, 97–115.
405 <https://doi.org/10.3354/CR01621>
- 406 Kumar, P., & Sherring, A. (2021). Modelling of rainfall and runoff using HEC-
407 HMS in Oghani Micro-watershed of Azamgarh District Uttar Pradesh.
408 *International Journal of Chemical Studies*, 9(1), 3476–3482.
409 <https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1aw.11772>
- 410 Lee, J.-S., Song, C.-H., Man, A., Pradhan, S., Ha, Y.-S., & Kim, Y.-T. (2023).
411 Development of Structural Type-based Physical Vulnerability Curves to
412 Debris Flow using Numerical Analysis and Regression Model



- 413 Development of Structural Type-based Physical Vulnerability Curves to
414 Development of Structural Type-based Physical Vulnerability Curves to
415 Debris Flow using Numerical Analysis and Regression Model.
- 416 Lin, Q., Tang, Z., Liu, C., & Zhang, H. (2022). Web-based prototype system
417 for flood simulation and forecasting based on coupled HEC-HMS and
418 Iber+ models. *Environmental Modelling & Software*, 156, 105480.
419 <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105480>
- 420 Míguez-Novo, P., García-Feal, O., Cea, L., & Puertas, J. (2025). Performance
421 of the IBER and HEC-HMS models in simulating post-fire flood events.
422 *Journal of Hydrologic Engineering*, 30(2), 04025012.
423 <https://doi.org/10.1061/JHYEAG.0002501>
- 424 Miteva, T., & Howald, E. P. (2022). Vulnerability assessment of different
425 types of building structures to debris flow events. *Geoingegneria
426 Ambientale e Mineraria*, 165(1), 14–21.
427 <https://doi.org/10.19199/2022.165.1121-9041.014>
- 428 Municipalidad Distrital de Lurigancho-Chosica. (2021). Plan de prevención
429 y reducción del riesgo de desastres del distrito de Lurigancho (2022 –
430 2025).
- 431 Papathoma-Köhle, M., Gens, B., Sturm, M., & Fuchs, S. (2017). Matrices,
432 curves and indicators: A review of approaches to assess physical



- 433 vulnerability to debris flows. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 171, pp.
434 272–288). Elsevier B.V.
435 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.007>
- 436 Paredes, D., Quinteros, M., & Herrera, J. (2023). Aplicación integrada de
437 HEC-HMS, HEC-RAS 2D y RStudio para la simulación de inundaciones
438 en cuencas andinas. *Revista Tecnología y Ciencias del Agua*, 14(6),
439 144–160. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2023-06-08>
- 440 Politécnica, U., Madrid, D. E., Pablo, J., Ruiz, M., Carlos, P. D., & Bartolomé,
441 P. (2021). ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y
442 ENERGÍA.
- 443 Sanz-Ramos, M., Cea, L., Bladé, E., López-Gómez, D., Sañudo, E.,
444 Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. (2022). *Iber v3:*
445 *Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas*
446 *implementaciones* (versión 3). CIMNE.
447 <https://doi.org/10.23967/iber.2022.01>
- 448 Sanz-Ramos, M., Bladé, E., González-Escalona, F., Olivares, G., & Aragón-
449 Hernández, J. L. (2021). Interpreting the Manning roughness coefficient
450 in overland flow simulations with coupled hydrological-hydraulic
451 distributed models. *Water*, 13, 3433.
452 <https://doi.org/10.3390/w13233433>



- 453 Song, Z., Zhang, L. M., & Chen, H. (2023). Rheological behaviour and
454 density variations of debris flow material under variable sediment
455 concentration. *Engineering Geology*, 320, 107056.
456 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107056>
- 457 USACE (United States Army Corps of Engineers). (2021). Hydrologic
458 Modeling System HEC-HMS User's Manual Version 4.9. Institute for
459 Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- 460 Torres-García, E., & Fernández, J. (2023). Implementación GIS-HEC-HMS-
461 IBER-R para el modelado hidrológico e hidráulico en zonas urbanas.
462 *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–19.
463 <https://doi.org/10.5194/hess-2023-214>
- 464 Torres-Mercado, C.-E., Villafuerte-Jeremías, J.-A., Guerreros-Ollero, G.-P.,
465 & Pérez-Campomanes, G. (2025). Comparison of flood scenarios in the
466 Cunas River under the influence of climate change. *Hydrology*, 12(5),
467 117. <https://doi.org/10.3390/hydrology12050117>
- 468 Wei, L., Hu, K., Liu, S., Ning, L., Zhang, X., Zhang, Q., & Rahim, M. A.
469 (2024). The vulnerability of buildings to a large-scale debris flow and
470 outburst flood hazard cascade that occurred on 30 August 2020 in
471 Ganluo, southwest China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,
472 24(11), 4179–4197. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4179-2024>



- 473 Yan, Y., Tang, H., Hu, K., Turowski, J. M., & Wei, F. (2023). Deriving Debris-
474 Flow Dynamics From Real-Time Impact-Force Measurements. *Journal of*
475 *Geophysical Research: Earth Surface*, 128(3).
476 <https://doi.org/10.1029/2022JF006715>
- 477 Zhang, X., Wu, S., Chen, J., & Liu, C. (2023). Numerical investigation of
478 debris-flow impact on buildings using a two-dimensional depth-
479 averaged model. *Engineering Geology*, 322, 107043.
480 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107043>
- 481 Zheng, H., Deng, Z., Guo, L., Liu, J., Liu, L., Li, T., Zheng, H., & Zheng, T.
482 (2023). Assessment of Building Physical Vulnerability in Earthquake-
483 Debris Flow Disaster Chain. *International Journal of Disaster Risk*
484 *Science*, 14(4), 666–679. [https://doi.org/10.1007/s13753-023-00509-](https://doi.org/10.1007/s13753-023-00509-7)
485 [7](https://doi.org/10.1007/s13753-023-00509-7)
- 486 Zheng, H., Shi, Z., de Haas, T., Shen, D., Hanley, K. J., & Li, B. (2022).
487 Characteristics of the Impact Pressure of Debris Flows. *Journal of*
488 *Geophysical Research: Earth Surface*, 127(3), 1-19.
489 <https://doi.org/10.1029/2021JF006488>
- 490 Zhou, G., Cui, P., & Xu, Q. (2020). Experimental study on the impact
491 force of debris flows on structures. *Landslides*, 17(8), 1889–1903.
492 <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01413-z>