

Numerical modeling of a debris flow associated with a dam break in the Quillcay sub basin, Ancash, Peru

Abelardo M. Díaz-Salas ^{*,a} , Edilberto Guevara-Pérez ^b , James D. Vidal-Moreno ^a 

^aUniversidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Ancash, Perú

^bUniversidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Abstract.- The objective of the research was to show results of a numerical modeling of debris flow, associated with a possible rupture of the Shallap dam, located at the head of the Quillcay river basin, in the department of Ancash, Peru. The modeling used is based on a sequence of chain events, which allowed coupling different numerical models, which simulated a complex process, and then apply methodologies that allow the elaboration of hazard maps. The results obtained show affected areas that vary from 0,82 km² to 0,87 km² for each level of risk, most of which are in low to intermediate categories, and are located on the left bank of the Quillcay River, representing 55 % on average of the total estimated area of impact. The results could allow authorities to develop risk management tools associated with the implementation of early warning systems to protect the most vulnerable areas.

Keywords: debris flow; flow modeling; RAMMS; IBER; dam breaking.

Modelamiento numérico de un flujo de escombros asociado a una rotura de presa en la subcuenca Quillcay, Áncash, Perú

Resumen.- La investigación tuvo como objetivo, mostrar resultados de un modelado numérico de flujo de escombros, asociado a una posible rotura de la presa Shallap, ubicada en la cabecera de cuenca del río Quillcay, en el departamento de Áncash, Perú. La modelización utilizada se basa en una secuencia de eventos en cadena, que permitió acoplar diferentes modelos numéricos, los cuales simulaban un proceso complejo, para luego aplicar metodologías que permiten elaborar mapas de peligros. Los resultados obtenidos muestran áreas afectadas que varían de 0,82 km² a 0,87 km² para cada nivel de peligro, la mayoría de las cuales están en categorías bajo a intermedio, y se ubican en la margen izquierda del río Quillcay, representando un 55 % en promedio del área total estimada de afectación. Los resultados podrían permitir a las autoridades, desarrollar herramientas de gestión de riesgos asociados con la implementación de sistemas de alerta temprana para proteger a las áreas más vulnerables.

Palabras clave: flujo de escombros; modelamiento de flujos; RAMMS; IBER; rotura de presas.

Recibido: 13 de octubre, 2020.

Aceptado: 06 de marzo, 2021.

1. Introducción

A lo largo de la historia, en diferentes partes del planeta, han ocurrido muchos tipos de desastres naturales. Dadas sus características topográficas y su ubicación geográfica, la región de los andes peruanos no es la excepción y está propensa a sufrir el impacto de terremotos, inundaciones por el fenómeno de El Niño, huaycos, avalanchas de hielo

y aluviones por ruptura de lagos de origen glaciar. En lo que se refiere a inundaciones o aluviones producidos por la ruptura de lagos, el departamento peruano de Áncash ha experimentado una trágica historia que se remonta al año 1941 con la ruptura del dique morrénico de la laguna Palcacocha, evento que produjo el mayor aluvión de origen glaciar que se conozca en el pasado, inundando la zona urbana de la ciudad de Huaraz [1].

Debido al peligro que representan los eventos naturales mencionados, es muy importante estudiar sus efectos potenciales para aplicar estrategias que permitan reducir los riesgos, sobre todo en poblaciones vulnerables como las que se asientan en la región de los andes. Los resultados de las

* Autor para correspondencia:

Correo-e:abelardo_mad@hotmail.com (A. Díaz-Salas)

investigaciones deben coadyuvar a la zonificación de las áreas de riesgo y el ordenamiento territorial para el uso de las tierras sobre una base científica confiable, independientemente del hecho de que esta tarea es intrínsecamente difícil en áreas de montaña alta como la que corresponde al presente estudio [2].

Por lo expuesto, se ha considerado llevar a cabo esta investigación sobre modelación numérica del flujo de escombros asociado a una posible rotura de la presa Shallap en la cabecera de cuenca del río Quillcay en el departamento de Áncash, Perú. Se aplican procedimientos establecidos en países de condiciones similares para generar mapas de amenazas de flujos, tanto en forma retrospectiva para eventos documentados; como prospectiva, para posibles escenarios de amenazas [3], [4].

2. Fundamentación teórica

Los flujos de escombros en las áreas montañosas representan una gran amenaza para las personas y las propiedades y han sido una gran preocupación en todo el mundo; se deben a la ocurrencia de las lluvias extremas y al efecto de la gravedad que generalmente acelera el descenso; siguen las zanjas empinadas de las montañas hasta los abanicos o llanuras aluviales donde normalmente se asientan las poblaciones que a menudo resultan afectadas por estos eventos catastróficos [5].

Un flujo de escombros, es un deslizamiento totalmente saturado de arcilla sensible, grava o arena, desencadenado por un exceso de presión de poros o el efecto de licuefacción del material deslizante [6]. Los factores climatológicos en las zonas montañosas afectan la magnitud y frecuencia de los procesos geomorfológicos, entre los que se incluyen los movimientos en masa o flujos de escombros [7]. La precipitación es uno de los factores principales que desencadena un flujo de escombros; además es el más activo cuando se producen estos tipos de flujos [8], cuya formación y características ha sido motivo de investigaciones utilizando diferentes modelos y aplicaciones en diferentes países. En la ocurrencia de este tipo de flujo, además de las lluvias extremas de periodos de retorno elevados, juega un papel muy importante

el deshielo de nevados y movimientos sísmicos, especialmente en zonas de alta montaña.

La denominación de estos flujos varía con las regiones y los países. En Perú se conocen como *Huaicos* y se asocian con flujos rápidos de aguas turbias y turbulentas de corta duración cargados de rocas y material sólido de diferentes tipos y tamaños. En Indonesia se denominan *Lahares* a los flujos de lodos de origen volcánico; en Bolivia se conocen como *Riadas* a los flujos torrenciales cargados de sedimentos. Hay otras denominaciones, como flujo de tierra, de lodo, de lodo rocoso, de escombros, aluviones, flujo de residuos, flujos hiperconcentrados de sedimentos, flujos torrenciales, entre otros, todos dentro de la denominación anglosajona de *Debris Flows* [9].

Se han desarrollado muchos modelos numéricos para dilucidar el proceso de movimiento del flujo de escombros, predecir las distancias de movimiento y el rango del efecto de estos. El modelo de fricción de *Voellmy* es capaz de simular con precisión el movimiento remoto del flujo de escombros; el de dos parámetros describe el comportamiento de fricción entre los escombros que fluyen [5]; fue propuesto originalmente para avalanchas de nieve, usando la suposición del fluido como un modelo monofásico que puede caracterizarse por dos tipos de parámetros; es decir, altura del fluido, $H(x, y, t)$ (m) y media de la velocidad $U(x, y, t)$ (m/s); la expresión matemática es como sigue en la ecuación (1).

$$U(x, y, t) = [U_x(x, y, t)U_y(x, y, t)]^T, \quad (1)$$

donde U_x , denota la velocidad en el eje X , U_y , es la velocidad en la dirección Y , y T es el símbolo de la transposición de la velocidad media. La magnitud de la velocidad también se puede definir como en la ecuación (2):

$$\|U\| = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}. \quad (2)$$

$\|U\|$, significa que se toma el valor promedio absoluto de U , lo que asegura que U alcance una velocidad estrictamente positiva en el espacio vectorial; la dirección de la velocidad del fluido está definida por el vector unitario (n_u), cuya denotación es: $n_u = \frac{1}{\|U\|} (U_x U_y)^T$

El modelo reológico de *Voellmy* se expresa mediante la ecuación (3) y constituye el balance de masa:

$$\partial_t H + \partial_x(HU_x) + \partial_y(HU_y) = Q(x, y, t), \quad (3)$$

donde $H(x, y, t)$, denota la altura del flujo (m) y $Q(x, y, t)$, es la fuente de producción en masa en término (m/s), cuando $Q > 0$, se denomina tasa de arrastre; cuando $Q = 0$, no hay erosión o deposición del material; cuando $Q < 0$, denota la tasa de deposición [3].

Existen otros factores geomorfológicos, los derrumbes o deslizamientos masivos, especialmente en áreas deleznable muy accidentadas que producen las inundaciones siendo los efectos directos la erosión y la generación de los flujos de escombros [10]. Para comprender y predecir el comportamiento de los flujos de escombros, se han utilizado modelos numéricos y herramientas analíticas; además existe una gran variedad de modelos, tanto en el enfoque de modelado, como en el tipo de las ecuaciones que se usan [11]. En este contexto, es importante diferenciar los flujos de escombros de las inundaciones; los primeros pueden contener concentraciones en peso de sedimentos entre el 70 y 90%; mientras que las concentraciones de sólidos en el agua de inundación no pasan del 5%. Otra diferencia se relaciona con el área de deposición, la cual ocurre para el caso del flujo de escombros en abanicos y diques; mientras que en las inundaciones el material se deposita en capas horizontales. Los flujos de escombros se pueden mover mucho más rápido en canales o cauces de alta pendiente y mucho más lento, cuando las pendientes son reducidas [9]; probablemente debido al incremento del componente de fuerza de la masa del material en el sentido de la pendiente. Esta diferencia entre ambos tipos de flujos hace que la modelación para su tratamiento sea también un tanto diferente; aunque en ambos casos se parte de una fundamentación teórica común.

En el presente estudio se usa el módulo hidrodinámico IBER para resolver las ecuaciones de *Saint Venant*, bidimensionales, (4), (5) y (6), incorporando los efectos de la turbulencia y

rozamiento superficial por viento [12].

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + g \frac{h^2}{2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (huhv) = gh(S_{0x} - S_{fx}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x} \left(hv^2 + g \frac{h^2}{2} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (huhv) = gh(S_{0y} - S_{fy}). \end{aligned} \quad (6)$$

Donde h , es el calado, U_x , U_y , son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g , es la aceleración de la gravedad, ρ , es la densidad del agua. En base a la hipótesis que se está siguiendo en el presente trabajo de investigación sobre la generación de flujo de escombros por efecto de la rotura de la presa, se debe precisar que la erosión de presas naturales y artificiales ha ido evolucionando desde principios de la década de 1980, cuando se desarrollaron modelos simples unidimensionales basados en análisis empíricos y paramétricos para procesos de ruptura de presas. Estos modelos son computacionalmente eficientes, pero dependen en gran medida del juicio de ingeniería y el análisis de casos históricos de fallas [13].

La propagación de las ondas del flujo hacia aguas abajo se puede simular mediante modelos que van desde simples modelos empíricos hasta los físicos, como es el caso de los modelos hidráulicos en los cuales se resuelven las ecuaciones de continuidad (conservación de masa o volumen) y de cantidad de movimiento. En el presente estudio se utilizó el modelamiento bidimensional IBER, el cual resuelve volúmenes finitos sobre un sistema de mallas estructuradas y no estructuradas [14]. Una posible aplicación de los denominados modelos bidimensionales de aguas someras vendría a ser la determinación de las zonas afectadas por la rotura total o parcial de una presa. Los esquemas numéricos implementados en el modelo IBER (del tipo Goduv), son especialmente adecuados

para el cálculo de este tipo de flujos, ya que se ha establecido que dichos modelos proporcionan, en los casos indicados, una buena relación entre precisión en los resultados y la complejidad del modelo de cálculo [12].

Las presas desempeñan un papel esencial para satisfacer las demandas de suministro de agua de las ciudades, la agricultura y la industria, o la generación de energía, así como la gestión de inundaciones; sin embargo, también representan un riesgo potencial de avería, que puede provocar graves daños materiales y la muerte [15]. Varias fallas de presas documentadas han sido asociadas con flujos de escombros, que transportan volúmenes significativos de sedimentos y causan cambios geomorfológicos severos. Según datos volumétricos, en muchos casos, el volumen de sedimentos transportado puede ser del mismo orden de magnitud que el volumen del agua drenado del depósito [16]; es por ello que los flujos de escombros se consideran como uno de los fenómenos más peligrosos en las áreas montañosas del mundo [17]. Los estudios de fallas de presas y el mapeo de inundaciones son vitales para establecer planes de emergencia que permiten a las autoridades competentes dar una respuesta rápida y eficaz [15]. En la Cordillera Blanca, la población local es altamente vulnerable a las cadenas de procesos de alta montaña [18]; la ciudad de Huaraz, alrededores y zonas aledañas se encuentran en una expansión urbana de alto índice de ocupación de lugares tradicionalmente agrícolas, ganaderos; así mismo, estos lugares son espacios naturales de sedimentación fluvio-glaciaria y de movimiento de masas, frente a eventos extremos de precipitación, aluviones, terremotos [19].

3. Metodología

3.1. Consideraciones generales

Existen diversos métodos para el estudio de la formación y propagación de las ondas de rotura de presas, pero debido a las condiciones orográficas y fisiográficas (altas pendientes, rugosidades y velocidades de propagación) se ha optado por utilizar el método mixto hidrológico-hidráulico [20] y con ello la utilización de modelos

numéricos, que comprenden modelos hidrológicos e hidráulicos.

Para el presente trabajo de investigación se tomó en cuenta una cadena de eventos o procesos, las cuales podrían dar lugar a un aluvión y su posterior determinación de zonas de peligro potenciales en la ciudad de Huaraz [20]. El presunto factor desencadenante es la rotura de la presa Shallap por factores extremos de precipitaciones máximas; la alta dinámica del relieve en relación con los temblores sísmicos y las fuertes lluvias locales son los principales factores desencadenantes [21]; la precipitación es también un parámetro importante para estudios climáticos, cuya variabilidad espacial y temporal pueden impactar en las actividades humanas durante eventos hidroclimáticos extremos como sequías e inundaciones [22].

Los trabajos de campo que se realizaron en la obra de seguridad de la laguna Shallap, estarían presentando deficiencias en temas de mantenimiento y limpieza, como son el talud; esto incluye aguas abajo del dique, así como los canales de entrada, canales de salida, y finalmente el aliviadero, pues, esta construcción se remonta a los años de 1970: además, otro punto desfavorable, es que la presa Shallap carece de un plan de emergencia que evalúe las consecuencias de una hipotética falla, y delimite las posibles inundaciones aguas abajo. La cadena de procesos supuestos desde la rotura de la presa hasta la determinación de zonas de peligro, fueron simuladas utilizando diferentes modelos numéricos. Para la determinación de las tormentas máximas se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS; se simula el hidrograma de una cuenca asociado con datos físicos, y con ello, se estiman los hidrogramas de salida; es decir, caudales máximos y tiempos picos; todo ello partiendo de condiciones extremas de tormentas [23]. Se asume la rotura de la presa usando el modelo numérico IBER, cuyo enfoque de modelado, se basa en un modelo de agua poco profundo de volúmenes finitos [15]. Para modelar la dinámica de la avalancha o flujo de escombros y el posterior depósito de material para las propiedades del canal o cauce existente [2] se utilizó el modelo numérico RAMMS, debido a que el flujo de escombros se moviliza repentinamente;

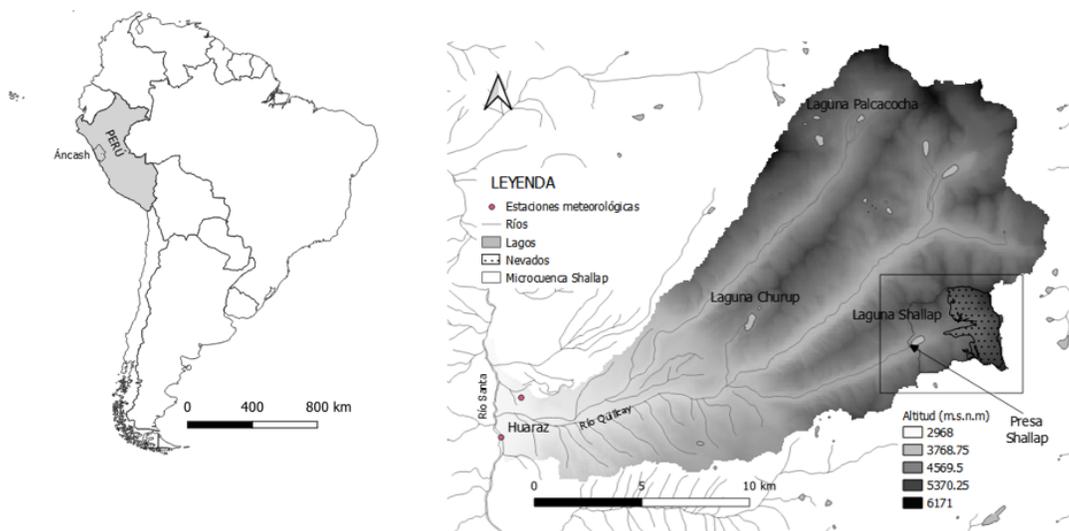


Figura 1: Ubicación de la cadena de eventos para el modelamiento numérico

además el modelo predice trayectorias de flujo, velocidades, flujo de alturas y presiones de impacto [17].

En la Figura 1 se muestra la ubicación de la zona de investigación donde se realizó el modelamiento numérico de la cadena de eventos o procesos.

3.2. Recopilación de información

Información meteorológica

Se recopiló información de cuatro (04) estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, CORPAC y ELECTRO PERÚ). Las estaciones meteorológicas se ubican en las cercanías de la microcuenca Shallah; poseen diferentes períodos de registro, entre 1950 y 2017. Para la investigación se llevó a cabo un análisis regional de las precipitaciones máximas anuales, previa evaluación de control de calidad de los datos mediante métodos y técnicas cualitativas. En la Tabla 1 se presentan las características de las estaciones pluviométricas y de la información utilizada.

Información de campo

A fin de conocer las características técnicas principales y la batimetría, para el uso del modelamiento numérico con IBER, en el área de la presa Shallah se llevó a cabo un levantamiento topográfico del vaso de la laguna, recabando las

Tabla 1: Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio

Estación	Latitud S	Longitud W	Altitud (m s.n.m)	Período
Anta	9°21'	77°36'	2748	1977-2001
Huaraz	9°32'	77°32'	3052	1950-2008
Querococha	9°41'27"	77°21'6"	3955	1975-1995
Unasam	9°30'59,5"	77°31'29,5"	3079	1998-2017

características técnicas, como corona, canales de salida, canales de entrada, aliviadero, espejo de agua, borde libre, taludes aguas arriba y taludes aguas abajo.

Trabajo de gabinete

Se recurrió a diversos autores como [13] y [24] de donde se extrajo información de trabajos realizados en escenarios similares de procesos de cadena referente a GLOF. Se recabó información sobre usos y texturas de suelo, parámetros hidráulicos de simulación de flujo de escombros. Todos estos parámetros fueron utilizados para la generación del proceso de cadena bajo un enfoque de modelamiento numérico en la presa Shallah.

3.3. Procesamiento de la información

Regionalización de la precipitación

Para el análisis de las precipitaciones máximas se trabajó con los modelos probabilísticos normal,

log normal 2p, log normal 3p, log pearson tipo III, gumbel y log gumbel. Mediante la prueba de bondad de ajuste se establecieron las precipitaciones máximas de 24 horas en base a información de las cuatro (04) estaciones meteorológicas para los períodos de retorno de 100, 150 y 200 años. La caracterización local de la precipitación se efectuó mediante la regionalización usando la relación dada en la ecuación (7) entre la altitud Z (ms.n.m) y la variable precipitación P (mm) como sigue:

$$P = a + b \cdot Z. \quad (7)$$

Donde, a y b son parámetros de la correlación lineal. Para la estimación de las tormentas de precipitación máximas de 24 horas, se distribuyó la precipitación mediante el método del servicio de conservación de recursos naturales de Estados Unidos (NRCS), con la distribución temporal de lluvia extrema más frecuente Gumbel tipo I, debido a características similares con la zona de estudio.

Parámetros geomorfológicos de la microcuenca Shallap

Se usó una combinación de la plataforma GIS y un modelo de elevación (DEM) digital, para determinar los parámetros geomorfológicos, así como muestreo de suelo, texturas de suelo, grupos hidrológicos, usos y aprovechamientos del suelo, para su posterior determinación del número de curva (CN) en la microcuenca de estudio y el coeficiente de rugosidad de Manning, el cual se utilizó en el modelamiento numérico con IBER [13], [24].

Parámetros hidráulicos para IBER

IBER es un modelo numérico distribuido para la simulación de flujo inestable en superficie libre; se ha utilizado con éxito en una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales se incluye la modelización del caudal y la calidad de los ríos, así como los impactos geomorfológicos de la rotura de la presa. El modelo IBER se basa en la Guía de clasificación de presas en función de su riesgo potencial, es por ello que utiliza una fórmula empírica para estimar las características de la rotura [15]. Se supone que el crecimiento de la brecha

es un proceso lineal y la forma de la brecha es trapezoidal con pendientes laterales de 1H:1V, el ancho promedio final de la brecha b (m) y el tiempo de desarrollo de la brecha T (h); estos parámetros se estiman con las ecuaciones (8) y (9).

$$T = \frac{4,8 \cdot V^{0,5}}{h}, \quad (8)$$

$$b = 20(V \cdot h)^{0,25}. \quad (9)$$

Donde V es el volumen almacenado en (hm^3) y h es la altura de la presa (m), además es preciso indicar que este modelo está en sintonía con los modelos de formación de brechas paramétricos ampliamente utilizados, los cuales, como cualquier modelo, tienen incertidumbres relacionadas con mala documentación de eventos históricos [15]. Una discusión más detallada del tema está fuera del alcance de este trabajo por lo que las estimaciones proporcionadas por el modelo se tratan como determinísticas en este trabajo de investigación.

Parámetros hidráulicos en el flujo de escombros

El modelo numérico RAMMS usa ecuaciones bidimensionales de masa y momento que promedia los resultados para el flujo granular en un espacio tridimensional utilizando el método de volumen finito [3]. Las entradas incluyen datos del terreno (DEM), área de liberación del flujo y los parámetros de fricción [13]. Para el dominio de cálculo se usa la información de investigaciones relacionadas a la zona de estudio, tal como la proveniente de la referencia [24], por utilizar condiciones similares a la microcuenca Shallap en lo que se refiere al recorrido del flujo de detritos (objetivo de la investigación) y los parámetros de fricción μ y ξ . El modelo RAMMS usa la relación de fricción de *Voellmy* para describir la fricción de flujo, dada en la ecuación (10).

$$S_f = \mu \rho h g \cos \phi + \frac{\rho g V^2}{\xi}, \quad (10)$$

donde S_f es la pendiente de fricción, ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), g es la aceleración gravitacional (m/s^2), ϕ es la pendiente, h es la altura de la avalancha (m) normal a la base y V es

Tabla 2: Niveles de peligro de un flujo de escombros [13]

Nivel de peligro	Descripción	Profundidad del flujo (m)	Descarga por ancho de unidad $v \cdot h(m^2/s)$	
Bajo	Personas en bajo riesgo, daños menores en edificios	$0,2 < h < 1,0$	y	$v \cdot h < 0,2$
Intermedio	Personas en peligro fuera de sus casas. Daño estructural y posible destrucción	$0,2 < h < 1,0$	y	$0,2 < v \cdot h < 1,0$
Alto	Personas en peligro dentro y fuera de sus casas. Estructuras destruidas	$h > 1,0$	o	$v \cdot h > 1,0$

la velocidad del flujo (m/s). En la Ecuación (10) se observa que el parámetro de fricción de Coulomb μ (fricción de superficie seca, en el primer término del lado derecho de la ecuación), domina el valor total de la fricción cuando ésta es relativamente lenta; mientras que ξ (el parámetro de fricción de turbulencia en el segundo término de la ecuación), lo hace cuando el flujo es rápido como el de escombros; aspecto que se está considerando en este trabajo de investigación. En el modelo *Debris flow* de RAMMS, se usaron valores de $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$; $\mu = 0,12$; y ; $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; valores muy similares a los referidos en [24].

En los modelos numéricos se suelen usar herramientas computacionales para la evaluación de los peligros naturales; en este estudio se utilizó el modelo numérico RAMMS, que resuelve ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas para flujos granulares aplicando la relación de fricción de *Voellmy*. Este enfoque es ampliamente utilizado y probado con éxito para avalanchas de nieve; muchos autores enfatizan la similitud entre el comportamiento de flujo de escombros y la aplicación de parámetros de fricción para modelar un flujo de estos [25]. En el estudio se utilizaron parámetros de campo encontrados en referencias de casos similares, como [13] y [24].

3.4. Criterios para la determinación de zonas de peligro

Los mapas de inundaciones se pueden preparar utilizando varios modelos y los datos resultantes se pueden utilizar para diversos propósitos [26]. En el presente caso, para la determinación de zonas de peligro en la ciudad de Huaraz, se utiliza la profundidad h (m) y la velocidad v (m/s), resultados que se obtuvieron con el modelado numérico RAMMS. En un segundo paso las intensidades

de flujos se convierten en niveles de peligro siguiendo los criterios presentados en la Tabla 2 creando un proceso semiautomático implementado en el entorno GIS, el cual convierte la altura y velocidades de flujo generado por RAMMS celda por celda en intensidades y niveles de peligro. Para esta clasificación se utilizó el criterio propuesto en Suiza y Venezuela, donde se asume que la infraestructura en Suiza y Venezuela es menos resistente que la infraestructura en Austria, y esto es similar a la que se tiene en la ciudad de Huaraz [13].

4. Resultados y discusión

Características geomorfológicas de la zona de estudio

En la Tabla 3 se presentan los parámetros geomorfológicos principales calculados para la microcuenca Shallap. Es notoria la altitud media, superando los 5200 ms.n.m. La pendiente es mayor que 30 % y se puede describir como fuertemente accidentada, favoreciendo así las contribuciones al escurrimiento de las precipitaciones que ocurren en temporadas de lluvias en los meses de enero y abril en esta parte de la cuenca.

Tabla 3: Características geomorfológicas de la microcuenca Shallap

Descripción	Microcuenca Shallap
Área (km ²)	13,28
Perímetro (km)	18,70
Altitud media (m s.n.m.)	5213,85
Pendiente (%)	31,70
Número de Curva	90,66
Grupo hidrológico del suelo	Nevado, roca y franco arenoso

4.1. Caracterización de las precipitaciones máximas

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de regionalización pluviométrica usando la ecuación (7). Aplicando la prueba de ajuste t-Student se encontró que todos los ajustes son positivos al 95 % de probabilidad. De este modo, los modelos de regionalización muestran un grado de asociación muy bueno, con coeficientes de correlación mayores que 0,84, lo cual permitió usar el modelo de regresión o regionalización para la obtención de las precipitaciones máximas de 24 horas en la zona de estudio (microcuenca Shallap).

Tabla 4: Ecuaciones de regionalización para la microcuenca Shallap

TR	Ecuación (7): $(P = f(Z))$	R^2
100	$P = 0,0227 \cdot Z - 12,543$	0,8499*
150	$P = 0,0243 \cdot Z - 14,826$	0,8451*
200	$P = 0,0254 \cdot Z - 16,451$	0,8417*

*: Correlación muy buena

En la Figura 2 se presentan los hietogramas adimensionales resultantes para la microcuenca Shallap. Para determinar las tormentas de diseño se tuvo en cuenta, el tipo de precipitaciones que se dan en la zona; es decir, precipitaciones máximas para alturas medias de la microcuenca mayores a los 5200 m s.n.m (Tabla 3)

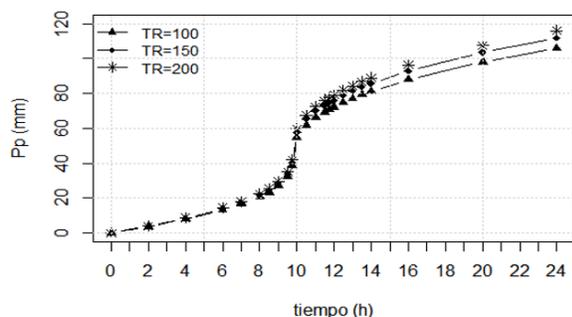


Figura 2: Caracterización de las precipitaciones máximas en la microcuenca Shallap

Caracterización de la rotura de la presa Shallap

En la Tabla 5 se dan las características técnicas de la presa Shallap, las que se usan como datos de entrada del modelo IBER para el modelamiento numérico de la rotura de la presa.

Tabla 5: Parámetros técnicos de la presa Shallap

Descripción	Valor
Cota de corona (m s.n.m)	4273,45
Ancho de corona (m)	9,03
Largo de la corona (m)	24,21
Cota de captación (m s.n.m)	4260
Cota de aliviadero (m s.n.m)	4267,9
Altura de la presa (m)	13,45
Volumen del embalse (m ³)	3467585,29

Los caudales de entrada para el modelo IBER se obtuvieron mediante los modelos hidrológicos HEC-HMS. En la Figura 3 se presentan los hidrogramas de estos caudales de entrada; su comportamiento muestra picos de hasta 60 m³/s a las 15 horas y de hasta 120 m³/s a las 24 horas.

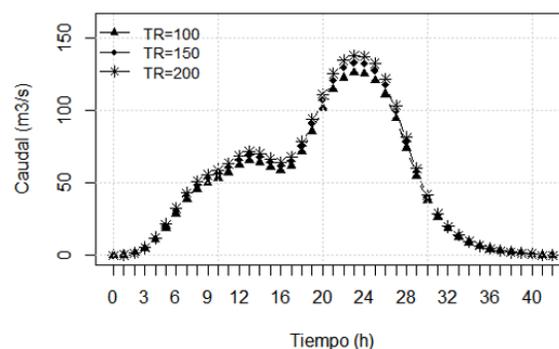


Figura 3: Caracterización de los caudales de ingreso en la microcuenca Shallap

Caracterización del flujo de escombros

En la Figura 4 se presentan los hidrogramas de salida del modelo IBER, así como los hidrogramas de rotura de la presa para períodos de retorno de 100, 150 y 200 años, observándose caudales máximos de 359 m³/s, 424 m³/s y 474 m³/s, respectivamente. Estos valores máximos se utilizaron para la simulación de los niveles de riesgo y peligro con el programa RAMMS, clasificados bajo, intermedio y alto.

Caracterización de las zonas de peligro

Para la caracterización de las zonas de peligro, se utilizó la información dada en la Tabla 2, y la metodología propuesta en la referencia [13] para estimar los diferentes niveles de peligro en la ciudad de Huaraz. Como se ha mencionado,

Tabla 6: Áreas de afectación por cada nivel de peligro en la ciudad de Huaraz

Clasificación del nivel de peligro	Área total de afectación (km ²)	Área de afectación (margen izquierda del río Quillcay) (km ²)	Porcentaje de afectación (%)
Bajo (1)	0,82	0,43	52,43
Intermedio (2)	0,85	0,46	54,11
Alto (3)	0,95	0,56	58,94

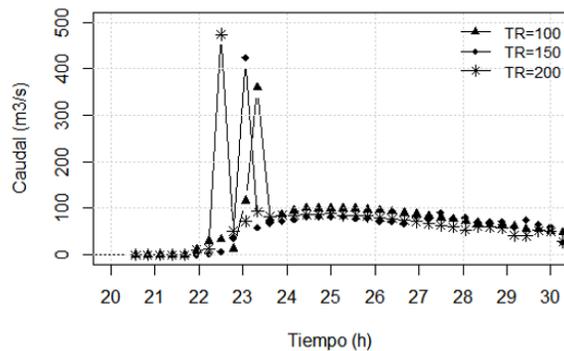


Figura 4: Hidrograma de rotura de la presa Shallap para diferentes períodos de retorno

los resultados provienen de metodologías para estimar flujos de escombros en casos similares de Suiza y Venezuela. Igualmente se consideraron las experiencias de investigaciones realizadas en la ciudad de Huaraz y Carhuaz [24] y [2]. En la Figura 5 se presentan los mapas de peligro obtenidos en la investigación mediante el modelamiento numérico con RAMMS para tres escenarios: bajo (TR = 100), intermedio (TR = 150), alto (TR = 200); provenientes de una cadena de procesos de movimiento masivo, considerando parámetros de fricción [24].

Los criterios de clasificación que se muestran en la Tabla 2 son un caso más probable de ocurrencia cuando se habla de flujo de escombros. Los impactos en volumen de flujo de escombros que ocurren bajo condiciones de los tres escenarios arrojan valores de $4,78 \times 10^5 \text{ m}^3$; $4,81 \times 10^5 \text{ m}^3$ y $4,95 \times 10^5 \text{ m}^3$, para períodos de retorno de 100, 150 y 200 años respectivamente. Las áreas totales de afectación correspondientes son de $0,82 \text{ km}^2$, $0,85 \text{ km}^2$ y $0,95 \text{ km}^2$ respectivamente, para cada nivel de peligro, y están ubicadas mayormente en la margen izquierda del río Quillcay, lo que representa en promedio un 55 % del área total estimada en

la simulación numérica, como se puede observar en la Tabla 6. Los resultados son estimaciones empíricas sujetas a incertidumbres, pero ayudarían en gran medida a conocer el comportamiento de un flujo de escombros bajo los supuestos escenarios modelados para los diferentes periodos de retorno.

El análisis de cada escenario siempre incluye cierto nivel de incertidumbre de estimación, debido a que se basan en relaciones de magnitud-frecuencia, que son difíciles de evaluar y pueden diferir para cualquier región geográfica donde se realice algún trabajo relacionado con modelos numéricos de simulación.

El enfoque que se ha presentado en este trabajo de investigación es de tipo hidrológico e hidráulico, es decir supuestos escenarios de precipitaciones máximas extremas que pueden poner en peligro la seguridad de la presa, y ocasionar la rotura con la subsecuente generación de un flujo de escombros debido a la pendiente que se presenta a lo largo del tramo de río analizado. Como perspectiva para escenarios futuros de modelamiento en quebradas similares se podría incluir deslizamientos simultáneos o caídas de rocas a lagos de origen glaciar, que ocasionan eventos combinados de oleaje que podría representar algún peligro de desbordes para diques morrénicos, tanto artificiales como naturales, eventos desencadenantes éstos que pudieran afectar a poblaciones vulnerables ubicadas aguas abajo.

5. Conclusiones

Se realizó el modelamiento numérico de una cadena de procesos, partiendo de un evento desencadenante como son las precipitaciones máximas en la microcuenca Shallap, para luego realizar la determinación de los niveles de peligro en la ciudad de Huaraz. Para ello se llevaron a cabo

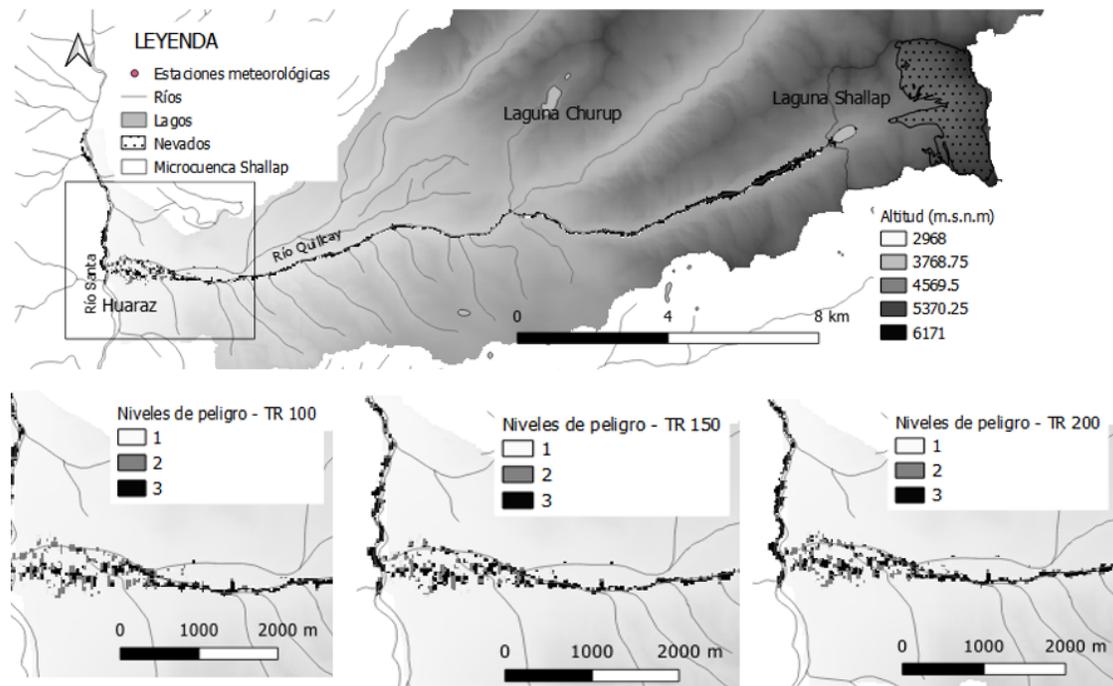


Figura 5: Niveles de peligro determinados en la ciudad de Huaraz, por efecto de la rotura de la presa Shallap

simulaciones con los modelos numéricos HEC-HMS, IBER y RAMMS, así como, experiencias en otros puntos similares a la zona de estudio.

Los caudales que se obtuvieron por efecto de la rotura de la presa Shallap fueron $358,64 \text{ m}^3/\text{s}$, $423,96 \text{ m}^3/\text{s}$ y $473,75 \text{ m}^3/\text{s}$ para periodos de retorno de, 100, 150 y 200 años respectivamente.

El modelamiento que se realizó con el modelo numérico RAMMS, se basó en experiencias trabajadas en escenarios similares en las lagunas 513 y Palcacocha, para su posterior proceso en el entorno GIS de acuerdo con metodologías propuestas en otros estudios similares. Cada uno de los componentes del modelamiento en este proceso de cadenas fue crucial; es decir, entender el comportamiento físico, y, lo más importante, el acoplamiento de estos procesos, donde el resultado de un componente fue necesario para el siguiente.

Se realizaron varias iteraciones para lograr un acoplamiento razonable de cada uno de los modelos. Teniendo ya establecidos los parámetros finales de modelamiento se procedió al modelado, el cual se basó en la determinación y generación de mapas de peligro para la ciudad de Huaraz. De

acuerdo a estos modelamientos se determinaron tres escenarios, bajo, intermedio y alto; se obtuvo en su gran mayoría niveles de peligro bajo a intermedio, con áreas totales afectadas que varían desde $0,82 \text{ km}^2$, $0,85 \text{ km}^2$ y $0,95 \text{ km}^2$ respectivamente para cada nivel de peligro para los diferentes periodos de retorno. Las áreas afectadas se ubican en un 55% en la margen izquierda del río Quillcay. Las principales calles afectadas son: las avenidas Manco Cápac, Antonio Raymondi, Fitzcarrald, Agustín y las calles aledañas. Hay que precisar que los resultados solo muestran el nivel de peligro físico. En próximas investigaciones se debe incluir el aspecto de la vulnerabilidad de la población e infraestructura.

Otro punto importante que hay que tener en cuenta es la verificación de campo, especialmente en sitios topográficos de difícil acceso y donde el modelo de elevación digital (DEM) puede generar errores de topografía y precisión.

Se necesitan más investigaciones sistemáticas para evaluar la influencia de los escenarios, como son la elección del tipo de modelo, y los parámetros en las alturas finales, así como otros parámetros de

velocidades máximas.

6. Referencias

- [1] S. A. Wegner, *Lo que el agua se llevó, consecuencias y lecciones del aluvión de Huaraz de 1941*. Perú: Corporación Globalmark, Ed. Huaraz, 2014.
- [2] J. Klimeš, M. Benešová, V. Vilímek, P. Bouška, and A. Cochachin-Rapre, “The reconstruction of a glacial lake outburst flood using HEC-RAS and its significance for future hazard assessments: An example from Lake 513 in the Cordillera Blanca, Peru,” *Nat. Hazards*, vol. 71, no. 3, pp. 1617–1638, 2014.
- [3] M. Christen, J. Kowalski, and P. Bartelt, “RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain,” *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 1–2, pp. 1–14, 2010.
- [4] F. Frank, B. W. McArdell, C. Huggel, and A. Vieli, “The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss Alps,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 15, no. 11, pp. 2569–2583, 2015.
- [5] J. Gan and Y. X. Zhang, “Numerical simulation of debris flow runout using RAMMS: A case study of Luzhuang gully in China,” *C. - Comput. Model. Eng. Sci.*, vol. 121, no. 3, pp. 981–1009, 2019.
- [6] F. Zimmermann, B. W. McArdell, C. Rickli, and C. Scheidl, “2D runout modelling of hillslope debris flows, based on well-documented events in Switzerland,” *Geosci.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–17, 2020.
- [7] Z. Engel, J. Česák, and V. R. Escobar, “Rainfall-related debris flows in Carhuacocha Valley, Cordillera Huayhuash, Peru,” *Landslides*, vol. 8, no. 3, pp. 269–278, 2011.
- [8] H. L. Pan, Y. J. Jiang, J. Wang, and G. Q. Ou, “Rainfall threshold calculation for debris flow early warning in areas with scarcity of data,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 18, no. 5, pp. 1395–1409, 2018.
- [9] J. Suárez, *Deslizamientos*. Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander UIS, 2009, vol. 1.
- [10] E. Destro, W. Amponsaha, E. I. Nikolopoulos, L. Marchi, F. Marra, D. Zoccatelli, and M. Borga, “Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event,” *Journal of Hydrology*, vol. 558, pp. 225–237, Mar. 2018.
- [11] B. Bout, L. Lombardo, C. J. van Westen, and V. G. Jetten, “Integration of two-phase solid fluid equations in a catchment model for flashfloods, debris flows and shallow slope failures,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 105, pp. 1–16, 2018.
- [12] E. Bladé, L. Cea, G. Corestein, E. Escolano, J. Puertas, E. Vázquez-Cendón, J. Dolz, and A. Coll, “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos,” *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, vol. 30, no. 1, pp. 1–10, 2014.
- [13] M. A. Somos-Valenzuela, R. E. Chisolm, D. S. Rivas, C. Portocarrero, and D. C. McKinney, “Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, no. 6, pp. 2519–2543, 2016.
- [14] R. Worni, C. Huggel, J. J. Clague, Y. Schaub, and M. Stoffel, “Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective,” *Geomorphology*, vol. 224, pp. 161–176, Nov. 2014.
- [15] M. Álvarez, J. Puertas, E. Peña, and M. Bermúdez, “Two-dimensional dam-break flood analysis in data-scarce regions: The case study of Chipembe dam, Mozambique,” *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 6, p. 432, Jun. 2017.
- [16] H. Capart, D. Young, and Y. Zech, *Dam-Break Induced Debris Flow*, W. McCaffrey, B. Kneller, and J. Peakall, Eds. Wiley, 2009.
- [17] C. Rodríguez-Morata, S. Villacorta, M. Stoffel, and J. A. Ballesteros-Cánovas, “Assessing strategies to mitigate debris-flow risk in Abancay province, south-central Peruvian Andes,” *Geomorphology*, vol. 342, pp. 127–139, Oct. 2019.
- [18] M. Mergili, S. P. Pudasaini, A. Emmer, J. T. Fischer, A. Cochachin, and H. Frey, “Reconstruction of the 1941 GLOF process chain at Lake Palcacocha (Cordillera Blanca, Peru),” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 1, pp. 93–114, 2020.
- [19] J. F. Melendez de la Cruz, “Geomorfología y peligros de la subcuenca del río Auqui (Calcahuayhuanca), Huaraz, Ancash,” *Investigaciones Sociales*, vol. 12, no. 21, pp. 145–160, 2014.
- [20] J. L. Prieto Calderón, R. M.-A. López, J. Taboada-Castro, I. Montequi-Martín, and G. Sanz-Lobón, “Rotura de la presa de Vega de Tera, simulación hidráulica de la propagación de la avenida (Zamora, España),” *DYNA*, vol. 84, no. 204, pp. 45–54, Dec. 2017.
- [21] V. Vilímek, M. L. Zapata, and J. Stemberk, “Slope movements in Callejón de Huaylas, Peru,” *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, vol. 35, pp. 39–51, 2000.
- [22] M. Ilbay-Yupa, R. Zubieta Barragán, and W. Lavado-Casimiro, “Regionalización de la precipitación, su agresividad y concentración en la cuenca del río Guayas, Ecuador,” *Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 30, no. 2, pp. 57–76, 2019.
- [23] P. Duque-Sarango, D. M. Patiño, and X. E. López, “Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 6, pp. 351–362, 2019.
- [24] D. Schneider, C. Huggel, A. Cochachin, S. Guillén, and J. García, “Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake

- 513, Carhuaz, Peru,” *Advances in Geosciences*, vol. 35, pp. 145–155, 2010.
- [25] Y. Deubelbeiss and C. Graf, “Two different starting conditions in numerical debris flow models—Case study at Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland),” in *Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft Reunión anual de la Sociedad Suiza de Geomorfología*, 2013, pp. 125–138.
- [26] H. Il Kim and K. Y. Han, “Linking Hydraulic Modeling with a Machine Learning Approach for Extreme Flood Prediction and Response,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 9, p. 987, 2020.