

MODELO DE INUNDACIÓN POR POTENCIAL ALUVIÓN DESDE LA LAGUNA PALCACOCHA, HUARAZ, PERÚ



Foto: Colette Simonds

Esta publicación forma parte de la Serie "Notas Técnicas sobre Cambio Climático", cuyo objetivo es hacer llegar a un público más amplio los resultados de los estudios, consultorías y sistematizaciones de la Dirección General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos del Ministerio del Ambiente.

Elaborado por:

**Marcelo A. Somos-Valenzuela
Rachel E. Chisolm
Daene C. McKinney
Denny Rivas**

**CENTER FOR RESEARCH IN WATER RESOURCES
Bureau of Engineering Research
Texas University at Austin**

**El documento original en inglés se encuentra disponible en línea en
<http://www.crrw.utexas.edu/online.shtml>**

Huaraz, mayo de 2014

Impreso en Corporación Globalmark

**Esta investigación ha sido realizada gracias a la cooperación de los proyectos:
Construyendo capacidades científicas, sociales e institucionales para el manejo y reducción del riesgo de avalanchas de lagos glaciares en la Cordillera Blanca, Perú (HIMAP/TMI/The University of Texas)
Implementación de medidas de adaptación al cambio climático en la subcuenca del río Quillcay (MINAM / BID)**

MODELO DE INUNDACIÓN POR POTENCIAL ALUVIÓN DESDE LA LAGUNA PALCACOCHA, HUARAZ, PERÚ

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del proyecto Climate Change Resilient Development (CCRD) de USAID y a la Fulbright Foundation por el apoyo a Somos-Valenzuela y Rivas. Asimismo, el apoyo de los desarrolladores de software de FLO-2D, FLOW3D y RAMMS quienes han hecho posible gran parte del trabajo aquí presentado. Igualmente, el apoyo de Josefa Rojas y Ricardo Villanueva Ramírez del proyecto “Implementación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático y Gestión de Riesgos en la subcuenca de Quillcay” (IMACC) del Ministerio del Ambiente de Perú constituyó una ayuda valiosa para la obtención del nuevo DEM de la subcuenca del río Quillcay. Finalmente, el Ing. César Portocarrero, el Prof. Wilfred Haerberli, el Dr. Alton Byers y el Dr. Jorge Recharte proporcionaron valiosos conocimientos y ánimos durante todo el trabajo.

RESUMEN

Una de las consecuencias del reciente retroceso glaciar es el rápido crecimiento de lagunas formadas en el frente de los glaciares. Uno de los riesgos resultantes es que las morrenas que represan estas lagunas glaciares puedan colapsar, liberando un inmenso volumen de agua y originando un desborde violento. Esto ocurrió el 13 de diciembre de 1941 en la laguna Palcacocha, Perú, cuando el aluvión originado siguió el curso del río Quillcay y destruyó parte de la ciudad de Huaraz, ocasionando la muerte de varios miles de personas. En el año 2011, la laguna Palcacocha fue declarada en estado de emergencia debido a que su volumen había alcanzado nuevamente niveles alarmantes, amenazando con un aluvión que podría llegar muy rápidamente a la ciudad de Huaraz, ocasionando una gran devastación y una potencial pérdida de vidas. El análisis de los peligros de origen glaciar para la ciudad de Huaraz consiste en modelos físicos de cada proceso de la cadena de eventos que resulta en un aluvión de una laguna glaciar: una avalancha de hielo y rocas; la generación de oleaje, su propagación y el desborde de morrenas; la brecha morrénica terminal y el drenaje de la laguna; y el aluvión aguas abajo, así como los impactos en la ciudad de Huaraz. Se simuló dos escenarios de erosión de morrenas: un evento grave con una brecha de 56 m y un evento de erosión más leve de 22.5 m. Estos escenarios mostraron que el aluvión alcanza la ciudad de Huaraz en 1.06 y 1.20 horas luego de la avalancha para los eventos de 56 m y 22.5 m, respectivamente. La inundación en la ciudad es extensa en ambos casos, con profundidades que sobrepasan 1 metro en muchas áreas, especialmente cerca del cauce del río Quillcay, con una velocidad de inundación sobrepasando 1 m/s en casi toda esta zona, de tal modo que gran parte de la ciudad estará sometida a un nivel de peligro muy alto, con riesgo de vidas y propiedades.

AVISO LEGAL

Las opiniones de los autores vertidas en esta publicación no reflejan necesariamente las opiniones de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional o del gobierno de los Estados Unidos.



ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	4
ÁREA DE ESTUDIO	5
METODOLOGÍA	6
Información física	7
Modelo digital de elevación	7
Valores de coeficientes de rugosidad	8
Simulación de avalancha	11
Simulación de la laguna	12
Modelo empírico del oleaje	12
Simulación de la laguna	12
Simulación de la brecha morrénica	14
Ecuaciones empíricas de la brecha	14
Modelo de la brecha morrénica MIKE-11	14
Simulación de la inundación	19
Identificación de los peligros	21
RESULTADOS	21
Simulación de avalancha	21
Simulación de la laguna	22
Simulación de la brecha morrénica	25
Simulación de la inundación	26
Inundación en Huaraz	30
Identificación de los peligros	34
CONCLUSIONES	38
REFERENCIAS	38
NOTA DEL EDITOR	43

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valores para los coeficientes de rugosidad del río Paria (FLO-2D, 2012)	9
Tabla 2.	Parámetros de brechas morrénicas para las brechas de 56 m y 22.5 m	18
Tabla 3.	Nivel de peligro de un evento de flujo de detritos	21
Tabla 4.	Características de tres escenarios de avalanchas simuladas RAMMS	22
Tabla 5.	Oleaje calculado para tres escenarios de avalancha empleando el método empírico	22
Tabla 6.	Oleaje calculado para el escenario de avalancha grande empleando el modelo Flow-3D	22
Tabla 7.	Ubicación de las secciones transversales del hidrograma de la inundación aguas abajo de la laguna Palcacocha	27
Tabla 8.	Resultados de la simulación Flo-2D en las secciones transversales aguas abajo de la laguna Palcacocha	28

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Laguna Palcacocha en 2010 teniendo como fondo los nevados Palcaraju a la izquierda y Pucaranra a la derecha	5
Figura 2.	Mapa del área de estudio mostrando la laguna Palcacocha y la ciudad de Huaraz en la subcuenca del río Quillcay	6
Figura 3.	Fotografía aérea de la subcuenca del río Quillcay mostrando la laguna Palcacocha, el río Paria y la ciudad de Huaraz	7
Figura 4.	Modelo Digital de Elevación (DEM) de la subcuenca del río Quillcay	8
Figura 5.	Resultados NDVI usando valores corregidos de reflexión de imágenes Landsat 7	10
Figura 6.	Clasificación de cobertura de tierra según la clasificación ISODATA	10
Figura 7.	Morrena de la laguna Palcacocha mostrando la brecha del aluvión de laguna glaciario de 1941	15
Figura 8.	Perfil parcial longitudinal de la laguna Palcacocha y la morrena terminal	16
Figura 9.	Brecha potencial máxima	17
Figura 10.	Curva del volumen/profundidad de la laguna Palcacocha	18
Figura 11.	Cañón del río Paria (quebrada Cojup) en sentido descendente	20
Figura 12.	Oleaje para el escenario de avalancha grande representada por la profundidad del líquido justo después de que la avalancha entre a la laguna	23
Figura 13.	Oleaje para el escenario de avalancha grande en su altura máxima	23
Figura 14.	Oleaje para el escenario de avalancha grande en el punto de desborde de la morrena terminal	24
Figura 15.	Hidrograma de descarga en la salida de la laguna debido al desborde del oleaje para el escenario de avalancha grande	24
Figura 16.	Hidrogramas de descarga potencial máxima y mínima de la laguna Palcacocha debido a una brecha morrénica	25
Figura 17.	Hidrogramas combinados del desborde de la ola y las brechas de 56 m y 22.5 m	26
Figura 18.	Resultados de las secciones transversales para la simulación FLO-2D	27
Figura 19.	Hidrogramas en las secciones transversales para la brecha de 56 m	28
Figura 20.	Hidrogramas en las secciones transversales para la brecha de 22.5 m	28
Figura 21.	Profundidad de la inundación versus el tiempo en la sección transversal 4 para las brechas de 56 m y 22.5 m	29
Figura 22.	Profundidad del agua de la inundación en Huaraz del hidrograma combinado para la brecha de 56 m	30
Figura 23.	Profundidad del agua de la inundación en Huaraz del hidrograma combinado para la brecha de 22.5 m	31
Figura 24.	Velocidad máxima de las aguas de la inundación en Huaraz para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m	32
Figura 25.	Velocidad máxima de las aguas de la inundación en Huaraz para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m	33
Figura 26.	Nivel de peligro en Huaraz por el aluvión de la laguna Palcacocha para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m	34
Figura 27.	Nivel de peligro en Huaraz por el aluvión de la laguna Palcacocha para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m	35
Figura 28.	Tiempo para la profundidad máxima de la inundación para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m	36
Figura 29.	Tiempo para la profundidad máxima de la inundación para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m	37

INTRODUCCIÓN

El calentamiento atmosférico permanente ha ocasionado el derretimiento de muchos glaciares en el mundo (WGMS 2012, IPCC 2013). La formación de nuevas lagunas en regiones de alta montaña que se están descongelando influye poderosamente en las características del paisaje y representa un peligro importante relacionado al cambio climático (Frey et al., 2010; Rosenzweig et al., 2007; Kattleman, 2003; Richardson y Reynolds, 2000). El área glaciar de la Cordillera Blanca en Perú ha disminuido de un pico de 900 km² en la Pequeña Edad de Hielo a cerca de 700 km² en 1970, a 528 km² en 2003 y más aún, a 482 km² en 2010 (UGRH, 2010; Burns y Nolin, 2014). Como resultado de esta recesión glaciar, se han formado o expandido muchas lagunas en la Cordillera Blanca, las cuales representan varios niveles de riesgo de aluvión por desbordamiento de una laguna de origen glaciar (GLOF, en inglés) para las comunidades ubicadas aguas abajo de estas lagunas (Emmer y Vilímek, 2013). En particular, la laguna Palcacocha, ubicada por encima de la ciudad de Huaraz, que causó un aluvión devastador en 1941, y cuyo volumen de agua se ha incrementado de manera peligrosa en los últimos años.

Las escarpadas cumbres en la Cordillera Blanca están experimentando un proceso de desestabilización de sus laderas debido al calentamiento y a la degradación del permafrost. Las avalanchas de hielo y rocas relacionadas son particularmente peligrosas en conexión con las lagunas que se forman a los pies de las paredes de las abruptas montañas, ya que pueden desencadenar grandes olas en estas lagunas y, probablemente, ocasionar aluviones (Carey et al., 2012; Haeberli, 2013). Existen muchos ejemplos en la Cordillera Blanca de incidentes históricos y recientes y de catástrofes en relación a los glaciares (Carey, 2010; Portocarrero, 2014). Un ejemplo reciente es la avalancha de hielo y rocas que en 2010 cayó desde la cima del nevado Hualcán hacia la laguna 513, generando un oleaje que rebasó su dique, originando diversos oleajes y flujos de detritos que llegaron al pueblo de Carhuaz (Carey et al., 2012; Schneider et al., 2014). La reducción preventiva de la laguna 513 por medio de túneles artificiales en los años 90 había creado un borde libre de 20 metros, lo cual ayudó a evitar una catástrofe mayor en la cual muchas personas podrían haber perdido la vida (Carey et al., 2012; Portocarrero, 2013).

Entre los factores que desencadenan la ocurrencia de avalanchas se encuentran terremotos, deshielos, olas de calor y precipitación abundante (Haeberli, 2013; Huggel

et al. 2010). Emmer y Vilímek (2013, 2014) y Haeberli et al. (2010) recomiendan que la evaluación de peligros que suponen las lagunas glaciares se base en un análisis sistemático y científico de los tipos de lagunas, características de diques de morrena, mecanismos de desborde, procesos valle abajo y posibles cascadas de procesos. Adicionalmente, los cambios en los patrones climáticos pueden incrementar la frecuencia de avalanchas como consecuencia de una estabilidad reducida del permafrost, del lecho de rocas y de los glaciares escarpados en la Cordillera Blanca (Fischer et al., 2012).

La laguna Palcacocha (Figura 1) supone un creciente peligro de laguna glaciar en la Cordillera Blanca. En 1941, tuvo lugar un aluvión desde la laguna que inundó la ciudad de Huaraz, matando a más de 5,000 personas (según las mejores estimaciones) y destruyendo infraestructura y tierra agrícola en todo el recorrido hasta la costa (Carey, 2010). En años recientes, la laguna Palcacocha ha crecido hasta el punto en que se ha vuelto nuevamente peligrosa. Las avalanchas desde las escarpadas laderas circundantes ahora pueden llegar directamente a la laguna, creando el potencial de generar olas que podrían rebasar el dique de morrena y alcanzar la ciudad de Huaraz (Hegglin y Huggel, 2008). En 2010, la laguna fue declarada en estado de emergencia debido a que su nivel excedía la altura considerada segura (Diario La República, 2010). Recientemente, se han instalado sifones en la laguna para disminuir temporalmente en unos tres metros el nivel del agua, pero es recomendable por motivos de seguridad actuales y futuros, reducirlo unos 15 m o más (Portocarrero, 2014). El dique de morrena de la laguna podría fallar si un oleaje generado por una avalancha rebasa la morrena y libera de manera violenta un gran volumen de agua de la laguna creando una ola de inundación y/o flujos de detritos (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011). Las autoridades locales y los pobladores de Huaraz se encuentran preocupados por la amenaza que representa la laguna Palcacocha y han solicitado apoyo técnico para realizar investigaciones sobre los impactos que pudiera tener un aluvión en Huaraz, así como sobre los métodos para reducir el riesgo.

Este documento describe el análisis de los procesos involucrados, del comportamiento y de las consecuencias de un posible aluvión de la laguna Palcacocha y posterior inundación en Huaraz. El proceso en cascada se inicia con una avalancha que cae en la laguna produciendo una ola que rebasa la morrena, lo que a su vez causa una brecha,

resultando en una avenida aguas abajo y en la inundación de la ciudad de Huaraz. En las siguientes secciones se presenta el escenario del problema seguido de una descripción de los datos disponibles utilizados para modelar los procesos. Luego, se describe la base física y el

modelamiento de cada uno de los procesos en la cadena, seguido de los resultados de cada uno de éstos y concluyendo con detalles de la inundación en Huaraz como consecuencia de una avalancha de grandes proporciones.



Figura 1. Laguna Palcacocha en 2010 teniendo como fondo los nevados Palcaraju (6,274 m) a la izquierda y Pucaranra (6,156 m) a la derecha (foto por Colette Simonds)

ÁREA DE ESTUDIO

La laguna Palcacocha (Figura 1) se encuentra ubicada a $9^{\circ}23' S$, $77^{\circ}22' W$, a una altitud de 4,562 m, en la Región Ancash de Perú, y es parte de la subcuenca del río Quillcay en la Cordillera Blanca (Figuras 2 y 3). La laguna tiene una profundidad máxima de 73 m y una altura del espejo de agua de 4,562 msnm. La desembocadura de la laguna ingresa al río Paria, un tributario del río Quillcay, que cruza la ciudad de Huaraz hacia el río Santa, el principal río de la región. Antes del aluvión de 1941, la laguna tenía un volumen estimado de 10 a 12 millones de m^3 de agua (Instituto de Defensa Civil, 2011). Después de este aluvión, el volumen se redujo a cerca de 500,000 m^3 . En

1974, se construyeron estructuras de drenaje en la laguna para mantener 8 m de borde libre en la desembocadura de la laguna, un nivel que se consideraba seguro para otros oleajes generados por una avalancha.

Debido al crecimiento de la laguna en dirección ascendente hacia el glaciar, su volumen se incrementó a cerca de 17 millones de m^3 de agua en 2009, excediendo el nivel considerado seguro (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2011). El sistema de sifón ha podido reducir el nivel de la laguna en unos 3 a 5 m, proporcionando un borde libre total de unos 12 m.

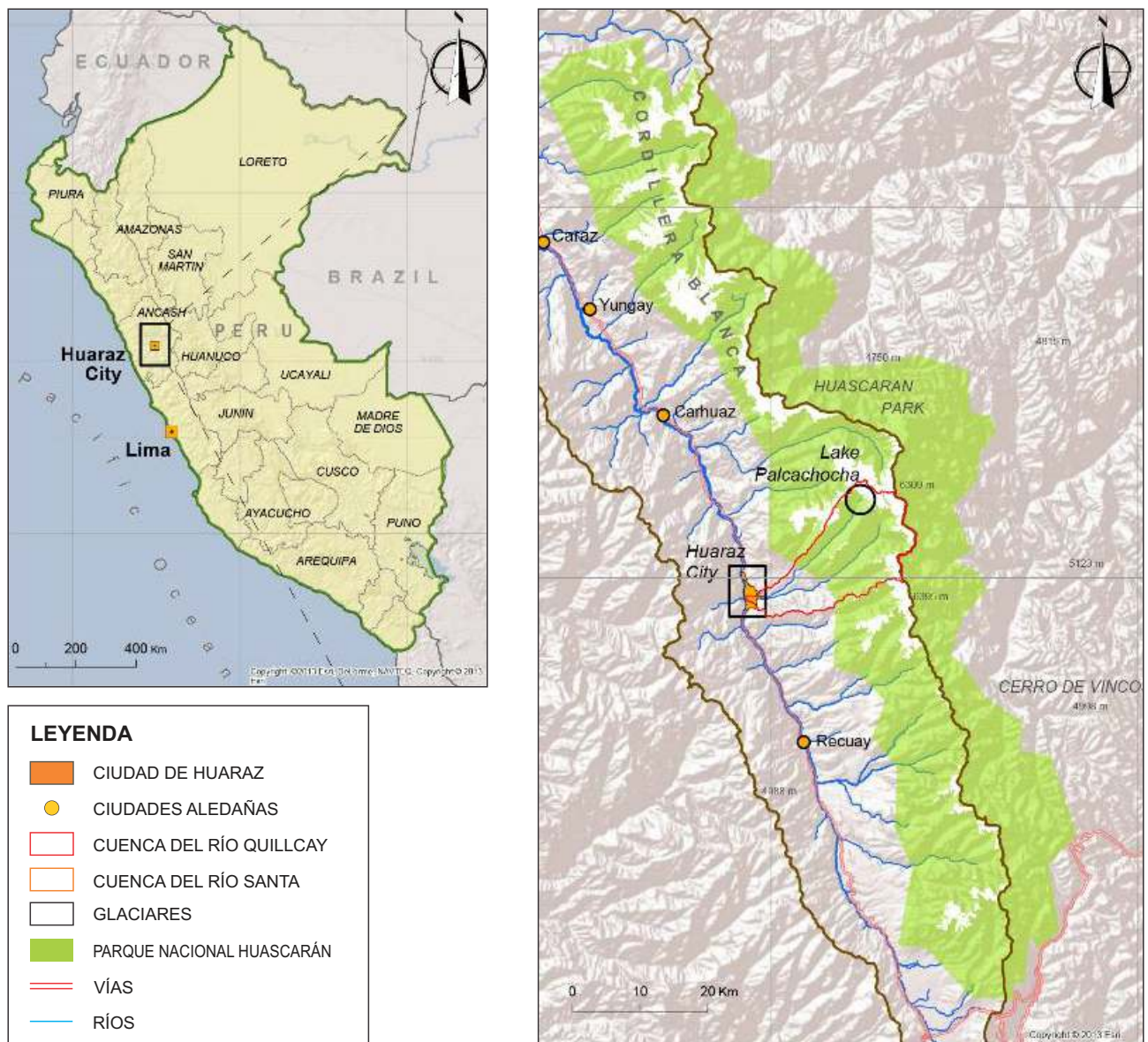


Figura 2. Mapa del área de estudio mostrando la laguna Palcacocha y la ciudad de Huaraz en la subcuenca del río Quillcay

METODOLOGÍA

Tomamos en consideración una cadena de eventos que podría resultar en un aluvión originado por una avalancha del glaciar sobre la laguna Palcacocha y evaluamos la inundación potencial de Huaraz como consecuencia de dicho evento. El presunto factor desencadenante del aluvión es una avalancha desde los glaciares Palcaraju o Pucaranra, ubicados directamente sobre la laguna. Se consideran tres diferentes tamaños de avalancha: pequeña (0.5 millones de m³), intermedia (1 millón de m³) y grande (3 millones de m³). Cuando la avalancha ingresa a la laguna, la ola resultante puede rebasar el dique de morrena, que tiene un borde libre de 8 a 12 m, e iniciar un proceso erosivo de brecha que podría liberar

cantidades considerables de agua al río Paria y posiblemente inundar áreas bastante pobladas de Huaraz. La cadena de procesos desde la avalancha hasta la inundación fue simulada utilizando varios modelos: las avalanchas potenciales fueron modeladas usando RAMMS (Christen et al., 2010), la dinámica del oleaje de la laguna fue modelada con FLOW-3D (Flow Science, 2012), los hidrogramas de la descarga potencial del aluvión en la brecha abierta en la morrena fueron generados usando MIKE-11 (DHI, 2001), y la propagación de la ola de avenida aguas abajo y la inundación de Huaraz se calcularon utilizando FLO-2D (O'Brien, 2003).

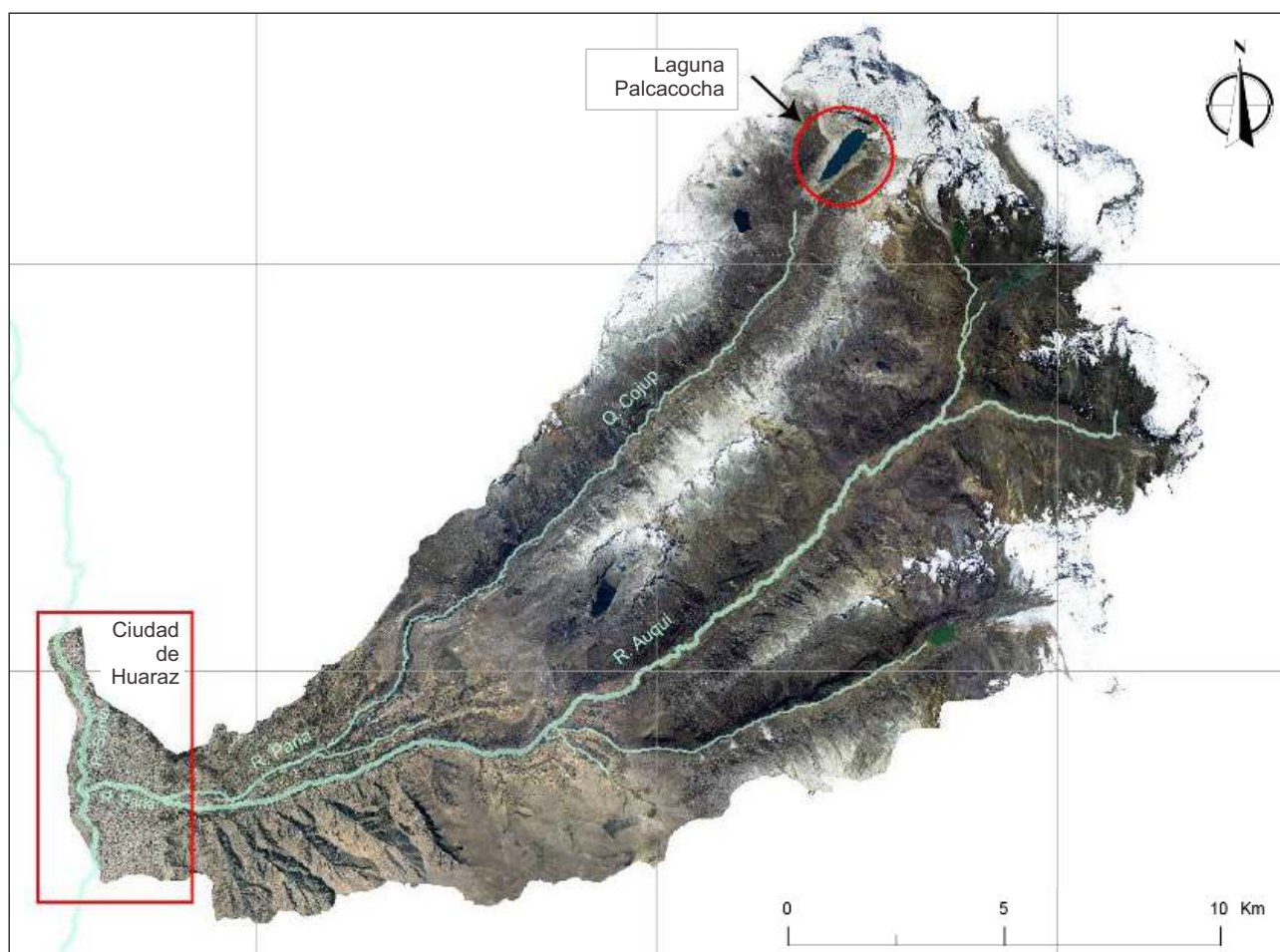


Figura 3. Fotografía aérea de la subcuenca del río Quillcay mostrando la laguna Palcacocha, el río Paria y la ciudad de Huaraz.
Fuente: Horizons (2013)

INFORMACIÓN FÍSICA

Modelo digital de elevación

Se utilizó un modelo digital de elevación (DEM) de resolución horizontal de 5 m x 5 m generado exclusivamente para este trabajo (Horizons, 2013) (Figura 4) empleando técnicas de alta resolución de Laser Imaging, Detection and Ranging (LIDAR), que proporcionan precisiones verticales de hasta 7 cm. Un grupo de diez puntos de control (GCP, en inglés), establecidos temporalmente para apoyar los vuelos LIDAR, permitieron el control, la calibración y el ajuste de los datos LIDAR, y la ortocorrección de las imágenes aéreas de alta resolución. Se usó un dataset de líneas de drenaje creado por el Instituto Geográfico Militar de Perú para verificar la información DEM y proporcionar el eje del cauce del río Paria, que drena de la laguna Palcacocha, así como los ejes de cauce de los ríos Quillcay y Santa.

La Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua de Perú (UGRH), llevó a cabo un estudio batimétrico de la laguna Palcacocha en 2009, que se usó para representar la elevación del lecho de la laguna en el DEM (UGRH, 2009). La distancia desde la morrena que represa la laguna Palcacocha hasta el río Santa es de 22 km. Sin embargo, además del centro urbano de la ciudad de Huaraz, se encuentran diseminadas entre la laguna y la ciudad otras infraestructuras aisladas incluyendo casas pequeñas, una escuela primaria, piscigranjas e instalaciones de abastecimiento de agua.

VALORES DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

La resistencia del caudal en los cauces de los ríos depende de diferentes factores, como: los meandro, los materiales del lecho del río, la sección transversal y su variación, y la vegetación (Chow, 1959). Para el modelo de inundación, es necesario que los valores del coeficiente de rugosidad de Manning sean estimados e incluidos como insumo para la simulación (Flow Science, 2012). Las estimaciones de los coeficientes de rugosidad pueden ser realizadas in situ. No obstante, este modelo demanda mucho tiempo y puede ser ineficiente para largos tramos de ríos. Por otro lado, la variabilidad espacial de la rugosidad puede ser mal representada (Forzieri et al., 2011; Hossain et al., 2009). Como una alternativa, se puede combinar la clasificación automática de índices de vegetación (IV) derivados de imágenes espectrales con mapas de elevación de terreno de alta resolución (Forzieri et al.,

2011; Forzieri et al., 2010). Los IV son utilizados para clasificar las diferentes clases de cubierta terrestre presentes en la cuenca del río y el mapa de elevación es usado para estimar la textura de la cubierta, que a su vez es empleada para estimar los valores de rugosidad. Los valores de rugosidad pueden ser asignados para diferentes cubiertas terrestres, ya sea manualmente o automáticamente (Forzieri et al. 2011, 2010). Nosotros hemos empleado una combinación de los dos procedimientos mencionados anteriormente y el esquema desarrollado por Hossain et al. (2009), que es una adaptación de Hamandawana et al. (2006). El procedimiento calcula el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI, en inglés) de una imagen multiespectral. Luego, una Técnica Analítica Iterativa de Auto-organización de Datos (ISODATA, en inglés) es usada para determinar el número de clases en las que los píxeles en una imagen pueden ser clasificados (Ball y Hall 1965). Finalmente, se emplea una representación móvil para asignar los valores de los coeficientes de rugosidad a las clases.

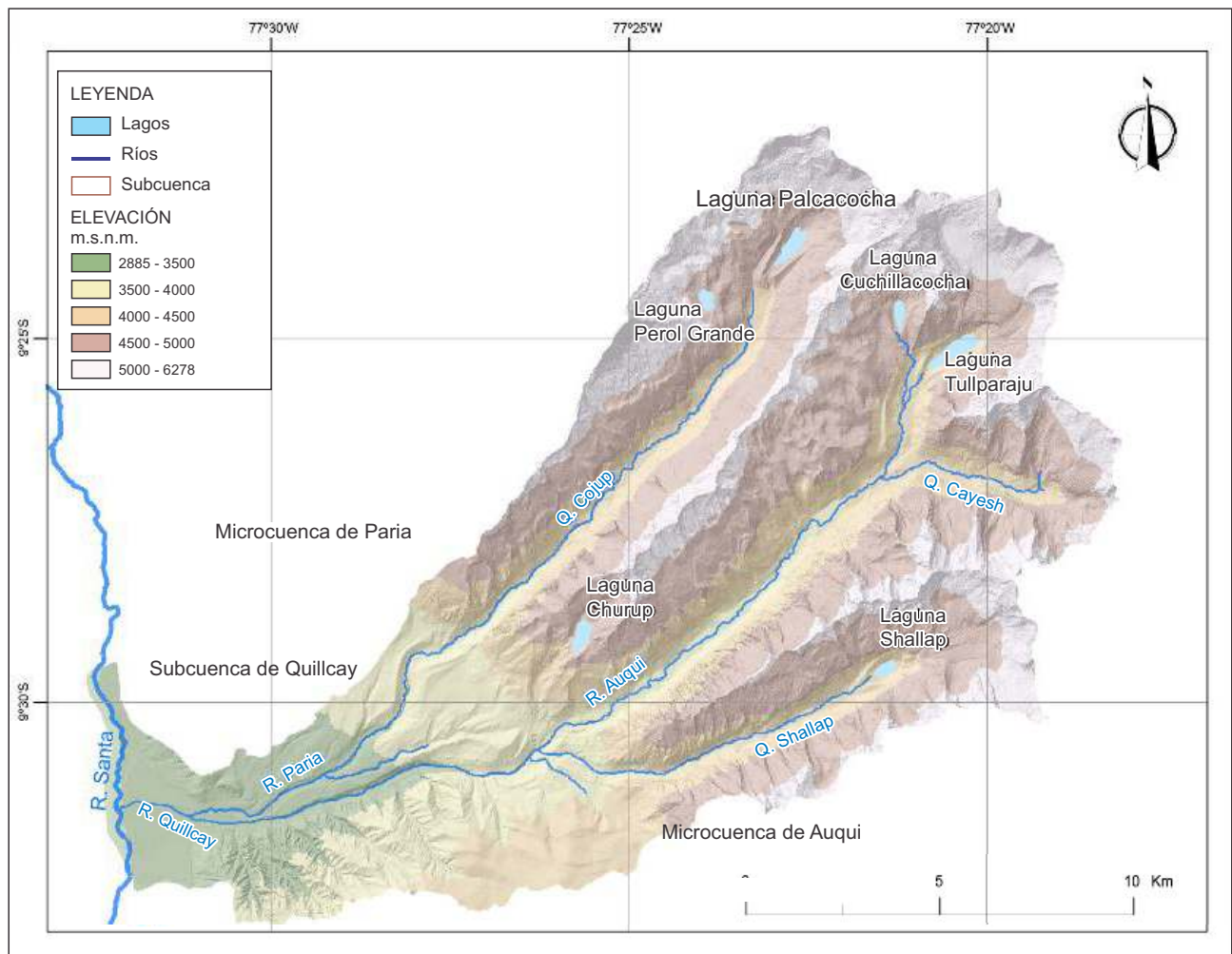


Figura 4. Modelo Digital de Elevación (DEM, en inglés) de la subcuenca del río Quillcay

En el cálculo de los valores NDVI para evaluar la presencia de vegetación verde viva (Rouse et al., 1973), se empleó Landsat 7 Banda 3 (cerca de infrarrojo 0.77-0.90 μm) y Banda 4 (rojo 0.63-0.69 μm) de una imagen del 22 de octubre 2013 (WRS_PATH 8, WRS_ROW 67).¹

$$NDVI = \frac{(Banda_4 - Banda_3)}{(Banda_4 + Banda_3)} \quad (1)$$

Los valores NDVI van desde -1 a 1, y los valores más altos indican la presencia de más vegetación verde viva. El número primo digital (DN) de la imagen fue ajustado al convertirlo a irradiancia para ambas bandas y luego a reflectancia (Chandler y Markham, 2003; Chandler et al., 2009). Los ajustes producen valores NDVI más consistentes ya que ellos toman en cuenta la elevación del sol, la fecha de adquisición, y las onfiguraciones de ganancia/sesgo de los sensores para cada banda.

El esquema ISODATA (Ball y Hall, 1965) minimiza la variabilidad dentro de los clústeres y categoriza los pixeles dentro de una cantidad de clases basada en minimizar la suma de distancias cuadradas entre cada pixel y su centro clúster asignado, equivalente a minimizar el Error Cuadrático Medio (MSE, en inglés) (Hossain et al., 2009)

$$MSE = \frac{\sum_{x \in C} [x - C(x)]^2}{(N - c)b} \quad (2)$$

donde $C(x)$ es la media del clúster que contiene el pixel x , N es el número de pixeles, c es el número de

clústeres y b es el número de bandas espectrales. Finalmente, se implementó el deslizamiento de la densidad basado en los valores límites generados usando el ráster NDVI.

Inspeccionamos el río Paria desde la laguna Palcacocha hasta el río Santa en junio-julio 2013, y hemos combinado nuestras observaciones de campo con los resultados de clasificación automática. Aun cuando existe una cantidad considerable de tipos de cubierta terrestre, usamos 5 clases principales que son las más representativas del sistema. Adicionalmente, la variación de los valores de coeficientes de rugosidad para los diferentes tipos de cubierta terrestre presentes en el área es mínima. La Tabla 1 muestra los valores de coeficientes de rugosidad asignados según la cubierta terrestre observada en el campo.

La Figura 5 muestra valores NDVI tomados de la imagen Landsat 7 luego de la corrección de la reflectancia (Chandler et al., 2009). Para los valores NDVI más altos, se presenta más vegetación intensa. A lo largo del cauce principal del río Paria (aguas abajo de la laguna y por encima de la ciudad) existe más vegetación verde, lo que es corroborado por las observaciones de campo. En el área de Huaraz, hay valores NDVI bajos que indican una disminución del área verde. La clasificación ISODATA se llevó a cabo en los datos ráster NDVI (Figura 6). Finalmente, empleando el ráster ISODATA, asignamos los valores máximos, mínimos y de coeficiente de rugosidad máximos de la Tabla 1 y los valores se usan en los cálculos de inundación FLO-2D descritos abajo.

Tabla 1. Valores de coeficiente de rugosidad para el río Paria (FLO-2D, 2012)

#	Clase	Descripción	Mín.	Máx.
1	Urbano	Concreto	0.10	0.15
2	Suelo sin vegetación	Tierra, roca, cascajal	0.05	0.013
3	Áreas cultivadas o hierba	Cultivos o hierba corta	0.06	0.22
4	Árbol	Tierra despejada con tocones de árboles, sin brotes	0.30	0.40
5	Cursos de agua naturales	Riachuelos de montaña, sin vegetación en los cauces, por lo general orillas abruptas, árboles y arbustos sumergidos a lo largo de las orillas en las partes altas. Abajo: guijarros y bolonería (grandes fragmentos de rocas)	0.04	0.07

¹ U.S. Geological Survey-EROS Data Center, <http://landsat.usgs.gov/>

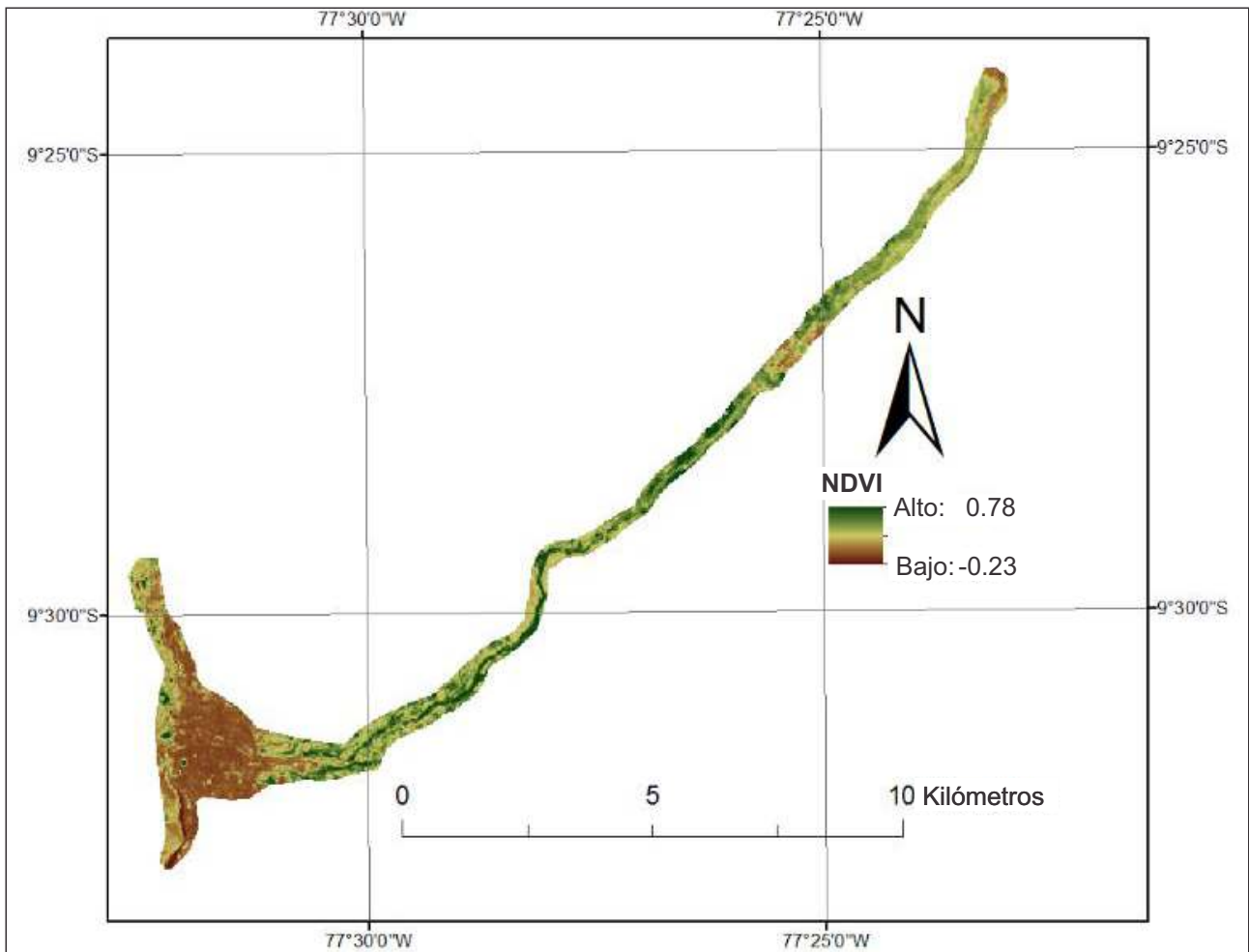


Figura 5. Resultados NDVI usando valores corregidos de reflexión de imágenes Landsat 7

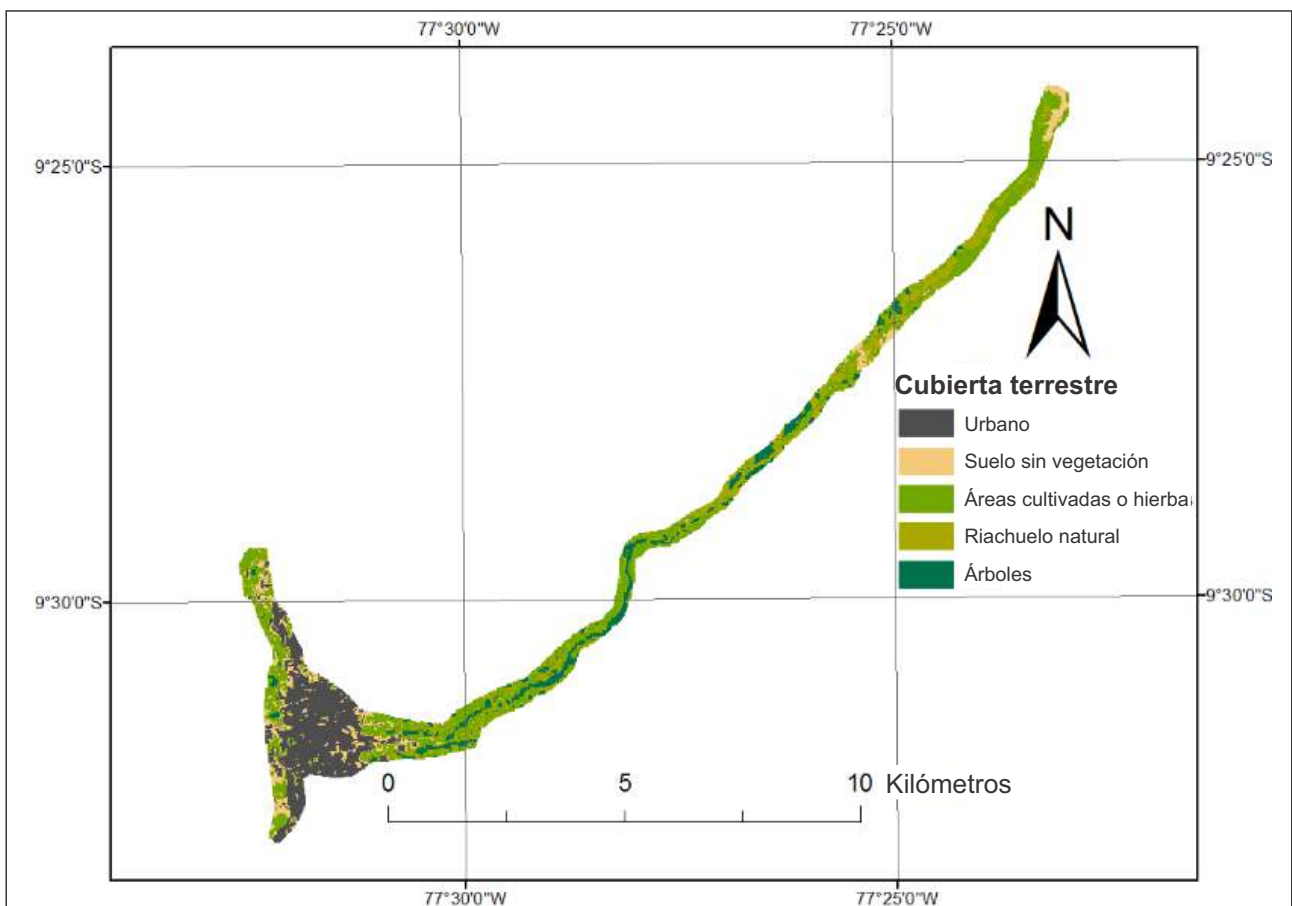


Figura 6. Clasificación de cubierta terrestre según clasificación de ISODATA

SIMULACIÓN DE AVALANCHA

En zonas no forestales, se pueden generar avalanchas en laderas de 30° - 50°, o menores en áreas tropicales (Christen et al., 2005; Haeberli, 2013). Las montañas que rodean la laguna Palcacocha tienen laderas de hasta 55°; por lo tanto, las probabilidades de que se produzcan avalanchas en ellas son altas. No obstante, es difícil predecir cuándo ocurrirán las avalanchas y dónde se ubicará la zona de desprendimiento (Evans y Clague, 1988; Haeberli et al., 2010).

A fin de predecir el comportamiento de una avalancha hacia la laguna Palcacocha, se usa como modelo una avalancha reciente que ocurrió en la cercana laguna 513 en 2010 (Carey et al., 2012; Scheneider et al., 2014) debido a algunas condiciones similares entre ambas ubicaciones, en especial porque las lagunas se encuentran cerca geográficamente hablando, y orientadas en la misma dirección este-oeste, la altitud de ambas y los picos circundantes son muy similares, así como las profundidades de las lagunas, y los glaciares en contacto con éstas tienen características parecidas. La diferencia principal es la condición de represamiento de las desembocaduras de las lagunas, que es de material morrénico suelto en la laguna Palcacocha, pero de roca sólida en la laguna 513.

Se están considerando tres escenarios de avalancha con volúmenes de 0.5 (pequeño), 1.0 (intermedio) y 3.0 (grande) millones de m³, parecidos a aquellos que Schneider et al. (2014) utilizó para evaluar la laguna 513 basándose en recomendaciones de prácticas para Suiza (Raetzo et al., 2002). Se usó el modelo de avalancha de Movimientos Rápidos de Masas (RAMMS, en inglés) para modelar la progresión de la avalancha cuesta abajo hacia la laguna 513 (Christen et al., 2010). RAMMS resuelve ecuaciones bidimensionales con profundidades promedio de masa e impulso en un terreno tridimensional empleando un método de volumen finito (Bartelt et al., 2013). Los datos para el modelo incluyen: (1) información del terreno (un DEM); (2) zona de descarga de la avalancha; (3) alturas de las fracturas; y, (4) parámetros de fricción. El modelo calcula la velocidad de la avalancha, la distancia de la zona terminal de la avalancha, la distribución de la presión y la altura del frente de la avalancha en diferentes ubicaciones debajo del punto de inicio.

RAMMS está basado en una solución de volumen finito para ecuaciones de movimiento para flujos granulares sobre una topografía general tridimensional (Bartelt et al., 2013; Christen et al., 2008). La ecuación dominante de conservación de masa es (Christen, 2010)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hV_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hV_y)}{\partial y} = \dot{Q} \quad (3)$$

donde \dot{Q} denota el término fuente de producción de masa. Las ecuaciones dominantes de conservación de impulso son (Christen, 2010):

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hV_x^2 + gk \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hV_x V_y) = S_{gx} - S_{fx} \quad (4)$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (hV_x V_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hV_y^2 + gk \frac{h^2}{2} \right) = S_{gy} - S_{fy} \quad (5)$$

donde S_{gx} y S_{gy} son las fuerzas gravitacionales en las direcciones x e y respectivamente, k es el coeficiente de presión de tierra y S_f es la fuerza de fricción. El modelo usa la relación de fricción de Voellmy para describir la fricción de flujo.

$$S_f = \mu \rho g h \cos(\phi) + \frac{\rho g V^2}{\xi} \quad (6)$$

donde S_f es la pendiente de fricción, ρ es la densidad de la roca y el hielo (kg/m³), g es la aceleración gravitacional (m/s²), ϕ es la pendiente, h es la altura de la avalancha (m) normal a la base y V es la velocidad de la avalancha (m/s). El término fricción de Coulomb (el primer término al lado derecho) con una fricción de superficie seca (μ) domina la fricción total cuando la fricción es relativamente lenta y el parámetro de fricción de turbulencia (segundo término) (ξ) tiende a dominar la fricción total cuando el flujo es rápido como en una avalancha tal como la considerada aquí. En el modelo de avalancha RAMMS, usamos $\xi = 1000$ m/s², $\mu = 0.12$ y $\rho = 1000$ kg/m³, valores similares a aquellos empleados para modelar la avalancha hacia la laguna 513 (Schneider et al., 2014).

SIMULACIÓN DE LA LAGUNA

Modelo empírico del oleaje

El método empírico de Heller et al. (2009) para calcular las características de ondas de impulso generadas por movimiento ha sido probado en estudios de laboratorio y en observaciones de campo. A pesar de que este modelo tiene sus limitaciones, puede emplearse para ser comparado con los resultados de modelos hidrodinámicos. Si las características de la onda de impulso tanto en el modelo hidrodinámico como en el modelo empírico son del mismo orden, se puede tener una confianza razonable en los resultados del modelo.

El método Heller et al. (2009) se usó para determinar las características de las ondas generadas por la avalancha a ser empleadas como línea de base de comparación para las ondas generadas en las simulaciones FLOW-3D. Las características de la onda calculadas según este método empírico son comparadas con las características de las ondas generadas en FLOW-3D para asegurarse que las simulaciones del impacto de la avalancha y la generación de ondas están produciendo resultados razonables. Las características de la avalancha (ancho, espesor y velocidad al momento de ingresar a la laguna) son usadas como datos para este modelo empírico conjuntamente con las dimensiones de la laguna y las densidades del material de deslizamiento y del agua. Las características de las olas generadas por la avalancha son determinadas de acuerdo a la siguientes ecuaciones (Heller et al. 2009).

La altura de la onda es estimada como

$$H(x) = \frac{3}{4}h \left[P \left(\frac{x}{h} \right)^{-0.33} \right]^{0.8} \quad (7)$$

donde P es un parámetro asociado al impulso de la forma

$$P = FS^{0.5} M^{0.25} \left[\cos \left(\frac{6\alpha}{7} \right) \right]^{0.5} \quad (8)$$

h es la profundidad del agua (m), $S = s/h$ es el espesor relativo de la avalancha, s = espesor de la avalancha (m), y α = ángulo de impacto de la avalancha (grados), $F = V_s / \sqrt{gh}$ es el número Froude de la avalancha, V_s = velocidad de la avalancha (m/s), $M = \rho_s V_s / (\rho_w b h^2)$ = masa relativa de la avalancha, ρ_s = densidad del agua (kg/m³) y V_s = volumen de la avalancha (m³). Debido a lo irregular del lecho de la laguna y a la poca profundidad del agua en la porción de la laguna cerca de la morrena terminal, no puede emplearse el método empírico de Heller et al. (2009) para predecir exactamente la profundidad o volumen del desborde. El desborde de la morrena es simulado en FLOW-3D tal como se describe en la siguiente sección.

Simulación de la laguna

Las ecuaciones empíricas brindan la altura y la ubicación de la altura máxima de la ola, pero no de la dinámica de ésta a medida que se mueve por la laguna o el hidrograma en la desembocadura. Con este objetivo, se usa FLOW-3D, un software de modelación tridimensional para fluidos que emplea el método del volumen de fluido para modelar caudales superficiales libres (Flow Science 2012), así como para modelar el oleaje generado por una avalancha, su propagación y el desborde de la morrena terminal. El producto principal del modelo es un hidrograma generado para cada escenario de avalancha que puede ser usado como insumo para un modelo de aluvión aguas abajo.

FLOW-3D resuelve la ecuación de continuación de masa y las ecuaciones de Navier-Stokes para la laguna Palcacocha

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (9)$$

donde V_F es el volumen fraccional abierto al flujo, ρ es la densidad del flujo, R_{DIF} es el término de difusión turbulenta, R_{SOR} es la fuente de masas, u, v, w son los componentes de velocidad y A_x, A_y, A_z son las áreas fraccionales abiertas al flujo en las direcciones x, y, z direcciones, respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_x \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta v_s) \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_x \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_x \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta v_s) \quad (12)$$

donde G_i son las aceleraciones del cuerpo, y f_i son las aceleraciones viscosas en las direcciones $i = x, y, z$, respectivamente, u_i, v_i, w_i son componentes de la fuente ($i = w$) y las velocidades relativas de la superficie de la fuente ($i = s$) en las direcciones x, y, z .

Para los caudales superficiales libres en FLOW-3D, el volumen de la función de fluido (F) definido en la ecuación 13 determina qué volúmenes son ocupados por el fluido en cualquier momento y punto en el espacio. Para los caudales superficiales libres, $F=1$ en regiones ocupadas por el fluido y $F=0$ en regiones vacías

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right] = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (13)$$

donde F_{DIF} es el término de difusión y F_{SOR} es la tasa de cambio temporal de F debido a una fuente. El modelo de turbulencia empleado por estas simulaciones es el modelo k- RNG (Grupo Renormalizado) con longitudes de turbulencia combinadas calculadas dinámicamente, basadas en las condiciones de flujo.

Los datos de batimetría a ser usados para el modelo hidrodinámico de la laguna han sido tomados de un estudio batimétrico de 2009 realizado por la UGRH. Los datos del estudio batimétrico han sido extraídos hacia una cuadrícula de 5 m que ha sido incorporada dentro del modelo digital de elevación del terreno circundante que se describe en la sección sobre información física. Esta topografía combinada del lecho de la laguna y el terreno circundante es empleada como insumo para el modelo de la laguna.

El impacto de la avalancha en la laguna es modelado como un volumen de agua igual al volumen de la avalancha que ingresa a la laguna desde el terreno por encima de la misma. Para reproducir las características de la avalancha, la velocidad y profundidad promedios del volumen del agua en el punto de impacto es emparejada con las velocidades y profundidades de la avalancha a medida que ingresa en la laguna. La altura y profundidad del volumen del fluido inicial que representa a la avalancha son ajustadas hasta que la profundidad y velocidad del agua, justo antes del impacto con la laguna, sean aproximadamente las mismas que las de los valores correspondientes en el modelo de la avalancha. La clave para representar con precisión la generación de la ola en el modelo FLOW-3D es reproducir la transferencia de masa e impulso de la avalancha hacia la laguna. Los detalles de este proceso no son bien comprendidos y el problema de reproducir una onda generada por una avalancha en un modelo hidrodinámico no es muy fácil debido a la dinámica complicada de la combinación y la disipación de energía que ocurre en el punto de impacto.

SIMULACIÓN DE LA BRECHA MORRÉNICA

Ecuaciones empíricas de la brecha

El riesgo de inundaciones en lugares aguas abajo de una presa de tierra natural depende de la capacidad de ésta para contener el embalse de agua. El límite de capacidad puede ser excedido debido a eventos de desborde por oleaje o por el colapso de una represa inducido por fallas estructurales o procesos erosivos. En las lagunas glaciares, es probable que se den ambos tipos de falla. Los diques morrénicos son susceptibles a la destrucción erosiva y pueden ser rebasados por altos oleajes producidos por avalanchas.

Hasta el momento, el fenómeno erosivo que impulsa la rotura de presas de tierra no es entendido en su totalidad. La compleja interacción entre el suelo y la dinámica de los fluidos que rigen el proceso de erosión del dique aún representan un desafío para la investigación. Se han explorado diferentes métodos para predecir el desarrollo de brechas en presas de tierra y los hidrogramas de descarga resultantes (Wahl, 2004). El primer tipo involucra modelos determinísticos que describen parcialmente la física dominante del problema. El segundo tipo es ampliamente aplicado en la práctica de ingeniería para predecir las características de una brecha en una presa y de los picos máximos de flujos aplicando modelos estadísticos empíricos basados en eventos históricos registrados de fallas en presas. Mientras permanezcan los obstáculos al desarrollo y a la aplicación de modelos determinísticos, los modelos empíricos representan una alternativa razonable para evaluar problemas de brechas en las presas.

El proceso de crecimiento de la brecha morrénica en la laguna Palcacocha controlará la liberación del agua embalsada por la morrena en caso de falla. Sin importar el tipo de desencadenante que inicie el proceso de erosión, la forma y magnitud del hidrograma de descarga dependen de la velocidad de expansión y de la forma de la brecha. Ese mecanismo de brechas es difícil de predecir sin un conocimiento detallado de la composición geotécnica de la morrena. Además, la erosión de brechas es comúnmente detenida por procesos que son ampliamente impredecibles en modelos numéricos (O'Connor et al., 2001).

Entre los parámetros físicos necesarios para aplicar las ecuaciones empíricas tenemos: el volumen de agua

embalsada, la profundidad del agua desde la superficie de la laguna hasta el nivel final alcanzado por la brecha, el volumen de material morrénico a ser erosionado y el ancho de la morrena. Estos parámetros pueden ser extraídos de la batimetría digital y de los modelos de terreno, pero una posible forma de una brecha debe ser definida primero para determinar los límites potenciales de crecimiento de la brecha. Siguiendo a Froehlich (1995), la descarga pico Q_p (m^3/s) es dada por

$$Q_p = 0.607 (V^{0.295} h^{1.24}) \quad (14)$$

y el tiempo de falla, t_f (hr) es

$$t_f = 0.00254 (V^{0.53} h^{-0.9}) \quad (15)$$

donde h (m) es la profundidad del agua y V (m^3) es el volumen del agua.

Modelo de la brecha morrénica MIKE-11

Las ecuaciones empíricas de la brecha de la presa en la sección previa ofrecen la descarga pico y el tiempo de falla de la brecha, pero no ofrecen el hidrograma completo de descarga para el proceso de formación de la brecha. Para esto, se emplea el modelo numérico MIKE-11. No contamos con información sobre una verdadera brecha con la cual comparar los resultados o calibrar el modelo. En cambio, la simulación tiene dos objetivos: (1) validar de manera razonable los valores del flujo pico y el tiempo de falla estimados por las ecuaciones empíricas, y (2) elaborar los hidrogramas que esas ecuaciones no puedan ofrecer.

Ya que no contamos con las características geotécnicas y de erosionabilidad de la morrena de la laguna Palcacocha, estamos siguiendo dos criterios principales para definir las probables forma y profundidad de la brecha. En primer lugar, asumimos que la trayectoria más fácil por la cual el agua fluya será la trayectoria definida por el aluvión de 1941. Esa brecha permanece y parece razonable que una nueva inundación transcurra de la misma manera que en la avenida de 1941. En segundo lugar, aun cuando la profundidad de la brecha pueda variar en cierta medida debido a la magnitud y continuidad del mecanismo detonante (desborde por oleaje generado por avalancha), un evento como el peor de los casos es el escenario más apropiado para planear posibles medidas mitigadoras (Laenen et al. 1987).

De igual forma, en ausencia de un lecho rocoso y dada la presencia de materiales con baja cohesión, es improbable que se pueda prevenir la formación de grandes brechas en la morrena de la laguna Palcacocha (C. Portocarrero, 2013, comunicación personal). Existe cierta incertidumbre acerca de la profundidad del lecho rocoso en la morrena y hemos asumido dos niveles diferentes de posible erosión morrénica (56 m y 22.5 m), tal como se discute más adelante. La Figura 8 muestra la sección transversal a través de la morrena basada en la batimetría y el DEM de la laguna.

El perfil en la Figura 8 muestra tres capas de elevación asociadas con diferentes dimensiones de morrena y volúmenes de agua embalsada. La superficie de la capa superior (0-22.5 m de profundidad) está expuesta a la erosión de manera inmediata y está formada por materiales con propiedades menos cohesivas que aumentan su susceptibilidad a la falla. Para alcanzar el fondo de la segunda capa, la brecha debe ir a una profundidad de 56 m, erosionar longitudinalmente 985 m de material morrénico y ser capaz de drenar $16.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua. No existen estimaciones de la probabilidad del último

evento, pero la incertidumbre sobre condiciones internas de la estructura morrénica no nos permite rechazar la hipótesis de que tal evento pudiera ocurrir. Por consiguiente, hemos considerado dos brechas potenciales debido a una gran avalancha y el oleaje asociado, una que erosiona la morrena a una profundidad de brecha de 56 m y una más pequeña que tiene una profundidad de brecha de 22.5 m. La brecha de 56 m es el peor caso. Si la tercera capa de la morrena estuviese expuesta, un volumen relativamente pequeño de agua permanecería - $0.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ o, cerca del 5% del volumen total de agua. Para liberar ese volumen, que consideramos bastante improbable, más de 1700 m de material morrénico debe ser erosionado en la dirección longitudinal, extendiendo la brecha 700 m más que la longitud desarrollada en la segunda capa.

Para las brechas de 56 y 22.5 m, la profundidad del agua no es igual a la profundidad de la brecha porque la profundidad de la brecha incluye el borde libre en la parte superior de la morrena sobre el fondo de la estructura de drenaje. Existe una diferencia de 6.3 m porque el caudal del oleaje de desborde no incluye el

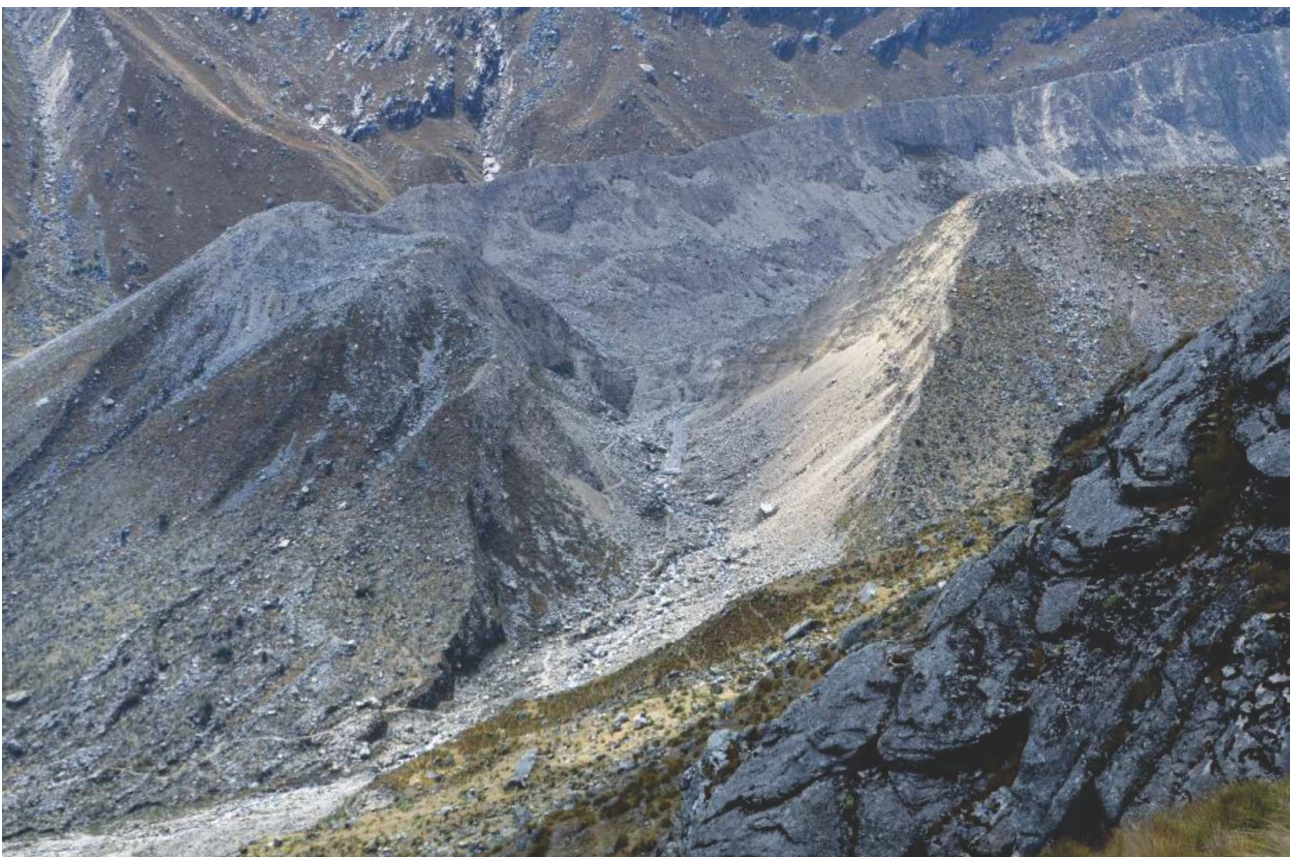


Figura 7. Morrena de la laguna Palcacocha mostrando la brecha del aluvión de 1941

volumen total de la avalancha, $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ del volumen del oleaje es retenido en la laguna y $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ es liberado en el caudal de desborde. Por lo tanto, el volumen residual de la laguna incrementa tanto el volumen (por $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$) como la profundidad de la laguna (por 1.7 m) antes de que se inicie el proceso de erosión. En el desborde, asumimos que la parte superior de la morrena (8 m sobre el nivel del fondo del túnel de drenaje) es instantáneamente destruida. La velocidad de erosión es distribuida uniformemente por debajo de ese nivel. El volumen de agua embalsada liberada en el proceso de brecha aumenta una vez que la ola pasa a través de la laguna. La Figura 8 muestra condiciones estáticas antes de que empiecen los procesos en cadena, mientras que la Tabla 2 muestra las condiciones después de la ola.

El caudal a través de la brecha en la morrena agrandará progresivamente el canal aguas abajo hasta que la brecha intersecte el fondo de la segunda capa. Debido a que la erosión morrénica es un proceso de movimiento hacia atrás (moviéndose de la cara aguas abajo de la morrena hacia la cara aguas arriba), proyectamos la forma potencial de la brecha como extensión más profunda de los últimos segmentos del canal creados por el aluvión de 1941. Esta forma se propagará hacia atrás para formar

toda la brecha tal como se muestra en la Figura 9, remodelando las secciones transversales del terreno existentes con la brecha máxima potencial proyectada. La forma de brecha proyectada para la brecha de 56 m (Figura 9a) tiene 50 m de ancho en el nivel inferior, con laderas de 1H: 1V y una profundidad máxima de 54 m. El ancho del fondo de la brecha y del canal aguas abajo es aproximadamente igual en la elevación menor de la segunda capa (Figura 9b)

La curva del volumen/elevación de la laguna Palcacocha (Figura 10) fue derivada de las medidas batimétricas (UGRH, 2009). Los parámetros resultantes de combinar la forma estimada de la brecha máxima potencial, la geometría de la laguna y el modelo digital del terreno circundante se muestran en la Tabla 2. Estos parámetros son los datos requeridos por los modelos empíricos que estiman el flujo de salida pico y el tiempo de falla del proceso de la brecha morrénica. Obsérvese que el volumen de agua embalsada representa el volumen de agua susceptible de ser drenada a través de la brecha máxima potencial (agua sobre el fondo de la segunda capa), incluyendo el volumen adicional añadido por una potencial avalancha menos el volumen de desborde de la onda glaciár generada por la avalancha.

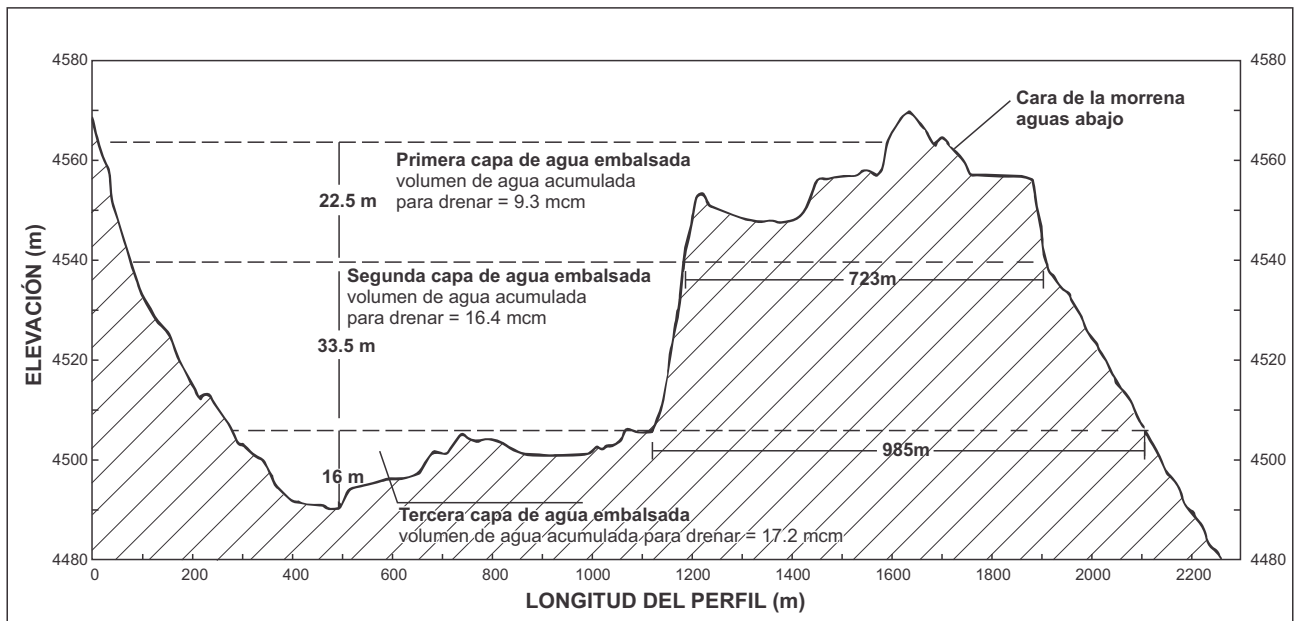


Figura 8. Perfil longitudinal parcial de la laguna Palcacocha y la morrena terminal

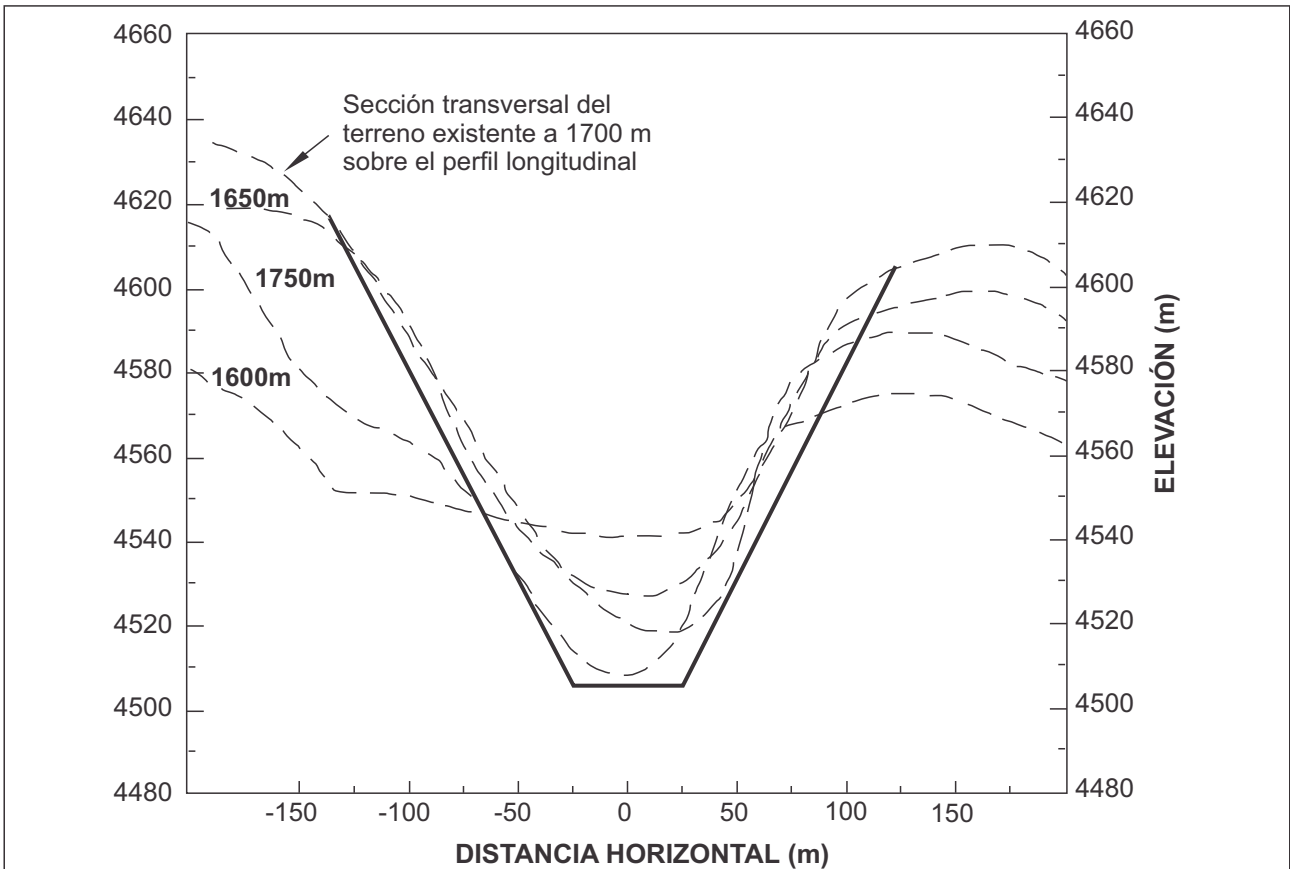
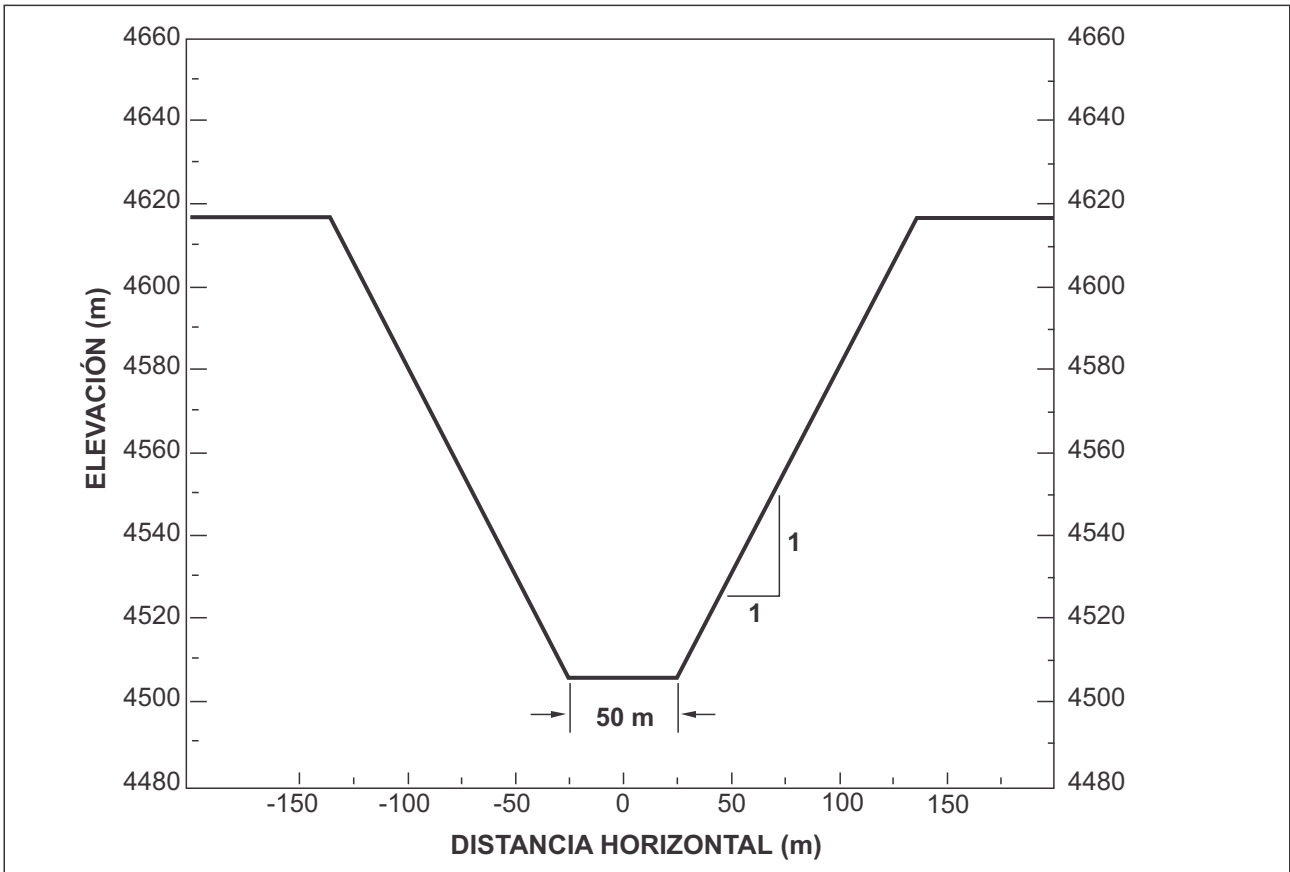


Figura 9. Brecha máxima potencial: (Arriba) forma de la brecha, (Abajo) superposición entre la brecha potencial y las secciones transversales existentes en los últimos 200 m de morrena erosionada.

ELEVACIÓN – DISTANCIA HORIZONTAL

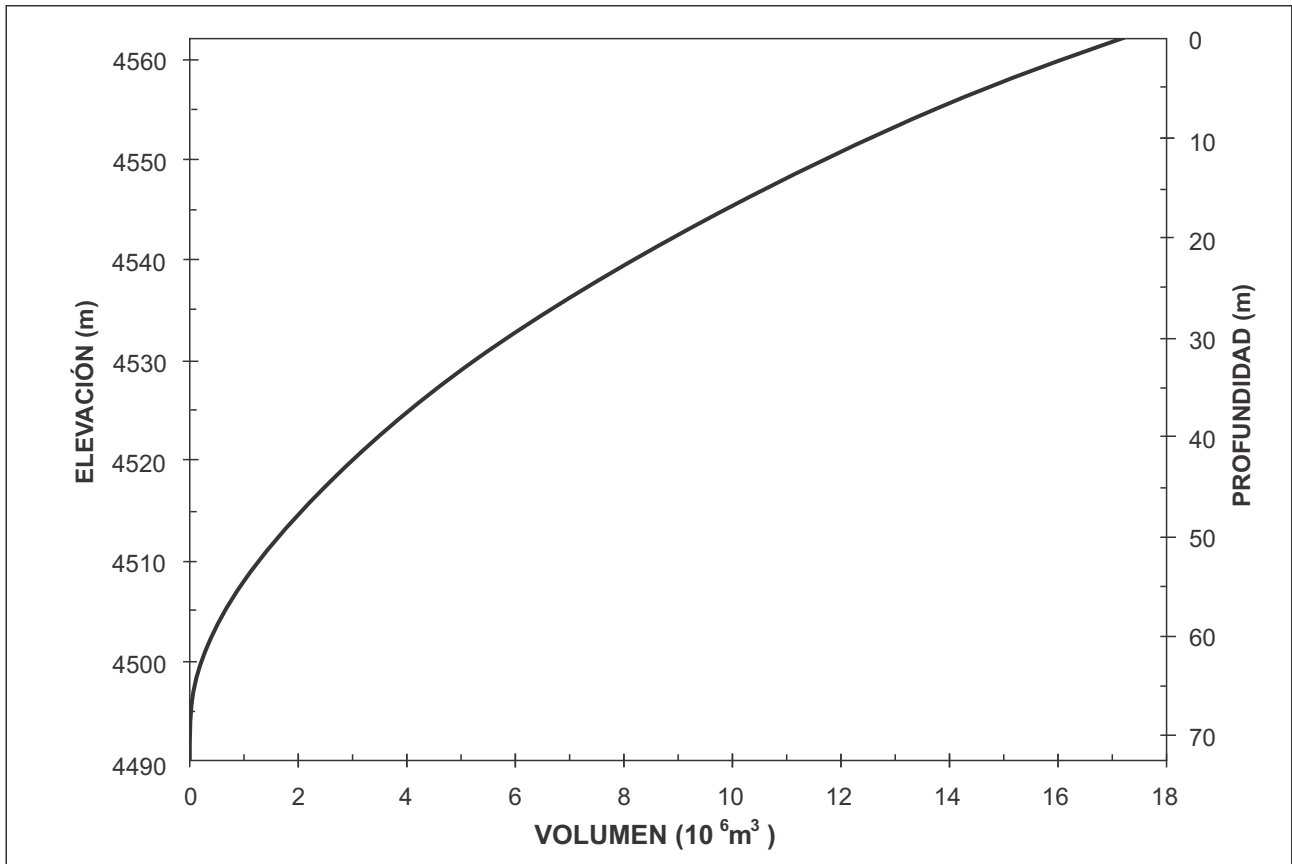


Figura 10. Curva de volumen / profundidad de la laguna Palcacocha. El volumen está concentrado principalmente sobre 4500 m (60 m de profundidad medidos desde la superficie)

Tabla 2 Parámetros de la brecha morrénica para las brechas de 56 m y 22.5 m

Parámetro	Valor
Brecha de 56 m	
Profundidad del agua (h)	49.7 m
Volumen de agua embalsada sin incluir la zona inferior (V)	16.9x10 ⁶ m ³
Profundidad de la brecha (hd)	56.0 m
Brecha de 22.5 m	
Profundidad del agua (h)	16.2 m
Volumen de agua embalsada sin incluir la zona inferior (V)	9.8x10 ⁶ m ³
Profundidad de la brecha (hd)	22.5 m

Para generar hidrogramas de brechas morrénicas, se calcularon simulaciones numéricas de la laguna Palcacocha y la morrena usando el método brecha de presa - DAMBRK del US National Weather Service – NWS (Servicio Nacional Meteorológico de los Estados Unidos) (Fread, 1979), implementado en el software de MIKE-11 (DHI, 2011). El modelo representa el flujo de salida como si la creciente brecha morrénica fuera una presa de cresta ancha, por la cual la forma de la brecha cambia en el tiempo y el flujo crítico existe durante todo el período de rotura (DHI, 2011). Los parámetros utilizados para establecer el modelo de brecha morrénica para la laguna Palcacocha en MIKE-11 son: geometría de la laguna embalsada, topografía del terreno circundante, forma de la brecha y tiempos de falla variables. Se trata básicamente de los mismos parámetros aplicados a las ecuaciones empíricas descritas en la sección anterior incluyendo la curva elevación-volumen.

Catorce diferentes modelos empíricos de colapso de presa fueron comparados con los resultados de una simulación hidráulica empleando NWS-DMBRK en MIKE-11 (Rivas et al., 2014). Estos resultados sugieren que para la laguna Palcacocha, las diferencias entre los modelos empíricos y MIKE-11 son menores cuando se emplea el modelo Froehlich. La diferencia del flujo pico es menor a 1% y la diferencia del tiempo de falla es de alrededor de 21%. El modelo Froehlich requiere de menos parámetros para estimar el flujo de salida pico que las demás ecuaciones que fueron consideradas. Esa simplicidad disminuye la incertidumbre añadida implícitamente cuando se incluye condiciones de erosionabilidad en modelos como los propuestos por Xu y Zhang (2009), Peng y Zhang (2011), Walder y O'Connor (1997) o MacDonald y Landrige-Monopolis (1984), para los cuales las diferencias del tiempo de falla varían aproximadamente entre 51% y 99%.

SIMULACIÓN DE LA INUNDACIÓN

FLO-2D es empleado para calcular la inundación aguas abajo de la laguna Palcacocha. El modelo es apropiado para simular la propagación del flujo de detritos (FLO-2D, 2012). La ecuación de conservación de masa solucionada en FLO-2D es

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = i \quad (16)$$

y la ecuación de conservación del momento lineal es

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (17)$$

donde h (m) es la profundidad del flujo, v (m/s) es la velocidad promediada en profundidad en uno de las direcciones del flujo, i es la intensidad del exceso de lluvias (m/s), S_f es la pendiente de fricción, S_o es la pendiente del lecho. Estamos considerando los efectos de los sedimentos. Por lo tanto, las características del sedimento y su concentración se encuentran incluidas en el fluido. Así, la pendiente de fricción total puede expresarse de la siguiente manera (Flo-2D, 2012; Julien, 2010; O'Brien et al., 1993)

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta\omega}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 \omega^2}{h^{4/3}} \quad (18)$$

donde S_y es la pendiente de rendimiento, S_v es la pendiente resbaladiza, S_{td} es la pendiente turbulenta-dispersiva, τ_y es el límite de fluencia de Mohr Coulomb, γ_m es el peso específico de la combinación de sedimento, K es el parámetro de resistencia [$K = 2,285$ para estudios urbanos (Flo-2D 2012)], η es la viscosidad dinámica de Bingham, ω es la velocidad promediada en profundidad, n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

Las propiedades reológicas, la viscosidad dinámica de Bingham (η) y el límite de fluencia de Mohr Coulomb (τ_y), están formulados como funciones exponenciales de la concentración del volumen de sedimento (Julien y León; Julien, 2010). El límite de fluencia y la viscosidad dinámica se representan como

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 c_v} \quad (19)$$

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 c_v} \quad (20)$$

donde c_v es la concentración de sedimento, α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio (Flo-2D 2009). Por contar con información geológica bastante limitada del área de estudio, se están empleando los valores recomendados por el manual Flo-2D para coeficientes empíricos.

A raíz de lo escarpado del terreno y de la baja cohesión del material que compone las morrenas (la principal fuente de sedimento para un aluvión), esperamos altas velocidades y flujos turbulentos con viscosidad dinámica similar a la viscosidad dinámica del agua así como bajos valores del límite de fluencia (Julien y León, 2000). Por consiguiente, hemos empleado coeficientes empíricos: $\alpha_1 = 0.0765$, $\beta_1 = 16.9$, $\alpha_2 = 0.0648$ y $\beta_2 = 6.2$, que otorgan valores bajos a la viscosidad dinámica y al límite de fluencia, similares a la lista recomendada en el manual Flo-2D (Flo-2D 2012). Los valores de la viscosidad dinámica y del límite de fluencia son también funciones de la concentración del sedimento. Las morrenas laterales son consideradas como fuentes importantes de sedimento para los aluviones en el Himalaya y en los Andes peruanos (Huggel et al., 2004). Según Huggel et al. (2004), por lo general, los aluviones tienen concentraciones promedio por volumen del orden del 50-60%. En la modelación de un evento anterior en la Cordillera Blanca, en la laguna 513, Schneider et al. (2014) usaron una concentración de sedimento por volumen del 50%. Asimismo, Julien y León (2000) recomiendan el uso de una concentración por volumen del 50% lo que corresponde también a los rangos dados por Rickenmann (1999). Así, como consecuencia de la falta de información geológica, estamos usando una concentración por

volumen del 50%, lo que resulta en un límite máximo razonable para el volumen del aluvión. Asimismo, ejecutamos el modelo con diferentes valores de concentración de sedimento a fin de estimar cuán sensibles son los impactos en la ciudad con relación a este parámetro.

A pesar de que la geometría de la cuadrícula dentro del modelo Flo-2D es de dos dimensiones, el flujo es modelado en ocho direcciones y resuelve la ecuación unidimensional en cada dirección. Cada cálculo de la velocidad es esencialmente de naturaleza unidimensional y se resuelve independientemente de las otras siete direcciones. Las ecuaciones de continuidad y momento se resuelven con un método central de diferencia finita con un esquema de avance de tiempo explícito, que usa una condición Courant-Friedrich-Lewy (CFL) para la estabilidad numérica.

La Figura 11 muestra el cañón del río Paria (quebrada Cojup) mirando hacia la salida del cañón y hacia la ciudad de Huaraz. La Figura 12 muestra cinco secciones transversales donde son calculados los hidrogramas de flujo. La Figura 13 muestra un primer plano de la ciudad de Huaraz y algunas de las características incluidas en la simulación de la inundación.



Figura 11. Cañón del río Paria (quebrada Cojup) en sentido descendente.

IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

El peligro de una inundación es el resultado de la combinación de probabilidad e intensidad de una inundación. La probabilidad también está inversamente relacionada a la intensidad de la inundación ya que la probabilidad disminuye a medida que la intensidad de una inundación aumenta. La intensidad de una inundación es una función de la profundidad máxima y la velocidad de la inundación (Tabla 3) (García et al., 2002; García et al., 2003). Los criterios presentados en la Tabla 3 fueron propuestos primero en el proyecto venezolano PREVENE (2001) para la evaluación de los impactos de flujos de detritos en dos abanicos aluviales en Venezuela (García et al., 2002). Más tarde, éstos fueron adoptados y aplicados a otros abanicos aluviales en Venezuela. La metodología es una adaptación de las metodologías austríaca (Fiebiger, 1997) y suiza (OFEE et al., 1997), donde García et al. (2002) asumía que la infraestructura en Venezuela es menos resistente que la infraestructura en Austria o Suiza. Esto es importante ya que la ciudad de Huaraz se asemeja más, en cuanto a resistencia de construcción, a una ciudad de Venezuela que a una ciudad de Europa. Esta metodología consiste en la clasificación de áreas inundadas con agua o

flujo de detritos en tres niveles de peligro (bajo, intermedio y alto). Los criterios de clasificación se muestran en la Tabla 3 para los flujos de detritos ya que se trata del caso más probable para un aluvión desde la laguna Palcacocha. Obsérvese que no estamos considerando el nivel de peligro muy bajo (profundidad menor a 0.2 m). Un nivel de peligro bajo se presenta cuando las profundidades son pequeñas y la descarga por ancho de unidad es pequeña. El nivel de peligro intermedio es cuando las profundidades y la descarga se encuentran en niveles intermedios. El nivel de peligro alto está presente cuando la profundidad es grande o la descarga es mayor, o ambos.

Pueden usarse otros sistemas de identificación de peligros para flujos de detrito, pero estamos presentando solo un ejemplo, basado en las experiencias suiza y venezolana. Igualmente, no hemos definido los niveles de peligro muy bajos y muy altos que son definidos, algunas veces, en otros métodos. Aquí no se está considerando la vulnerabilidad de la población o de la infraestructura, únicamente el nivel de peligro físico de los eventos modelados.

Tabla 3. Nivel de peligro de un flujo de detritos

Nivel de peligro	Descripción	Profundidad del flujo h (m)		Descarga por ancho de unidad $v * h$ (m ² /s)
Bajo	Personas en bajo riesgo. Daños menores en edificios.	$0.2 < h < 1.0$	y	$v * h < 0.2$
Intermedio	Personas en peligro fuera de sus casas. Daño estructural y posible destrucción.	$0.2 < h < 1.0$	y	$0.2 < v * h < 1.0$
Alto	Personas en peligro dentro y fuera de sus casas. Estructuras destruidas.	$h > 1.0$	o	$v * h > 1.0$

RESULTADOS

SIMULACIÓN DE AVALANCHA

Los resultados de las simulaciones de avalancha se muestran en la Tabla 4. El periodo de simulación del modelo RAMMS fue de 60 segundos. En los tres escenarios, las avalanchas llegan a la laguna Palcacocha

luego de 35 – 38 segundos. En los tres escenarios, el 100% de la masa liberada alcanzó la laguna. Los resultados de las simulaciones de las avalanchas brindan las condiciones de información para las simulaciones de oleaje de la laguna.

Tabla 4. Características de las avalanchas simuladas RAMMS para los tres escenarios

Escenario de avalancha	Volumen (10^6m^3)	Espesor a la entrada de la laguna (m)	Velocidad a la entrada de la laguna (m/s)
Pequeño	0.5	6	20
Intermedio	1.0	15	32
Grande	3.0	20	50

SIMULACIÓN DE LA LAGUNA

Cuando la avalancha impacta la laguna, genera una gran ola que se propaga en sentido longitudinal hacia la morrena terminal y alcanza su altura máxima cuando ha viajado aproximadamente un tercio del largo de la laguna. La altura máxima de la ola es atenuada solo ligeramente a medida que se propaga por la laguna, generando una cantidad significativa de agua que desborda la morrena terminal. El desborde resulta en un pico angosto en el hidrograma del flujo de salida de la laguna. El tiempo total desde el inicio de la avalancha hasta el desborde pico de la descarga de la laguna es de aproximadamente 2 minutos.

Las características de la ola calculadas según el método empírico de Heller et al. (2009) se presentan en la Tabla 5. Las características clave para modelar el escenario de ola grande en Flow-3D, se presentan en la Tabla 6. Sólo se presentan aquí los resultados del modelo hidrodinámico del escenario de avalancha grande, porque el escenario grande es una representación razonable del peor escenario y puede ser usado para propósitos de toma de decisiones. Las imágenes que muestran la profundidad del fluido para la simulación del escenario grande en diversos puntos clave se muestran en la Figura 12-14. El hidrograma de desborde para el escenario de avalancha grande se muestra en la Figura 15.

Tabla 5. Oleaje calculado para tres escenarios de avalancha empleando el método empírico

Escenario de avalancha	Altura máxima de la ola (m sobre la superficie libre inicial)	Distancia a la altura máxima de la ola (m)
Pequeño	9	147
Intermedio	21	254
Grande	42	392

Tabla 6. Oleaje calculado para el escenario de avalancha grande empleando el modelo Flow-3D

Item	Valor
Altura máxima de la ola (m sobre la superficie libre inicial)	35
Descarga pico del desborde (m^3/s)	5.3×10^4
Volumen total del desborde (m^3)	2.5×10^6

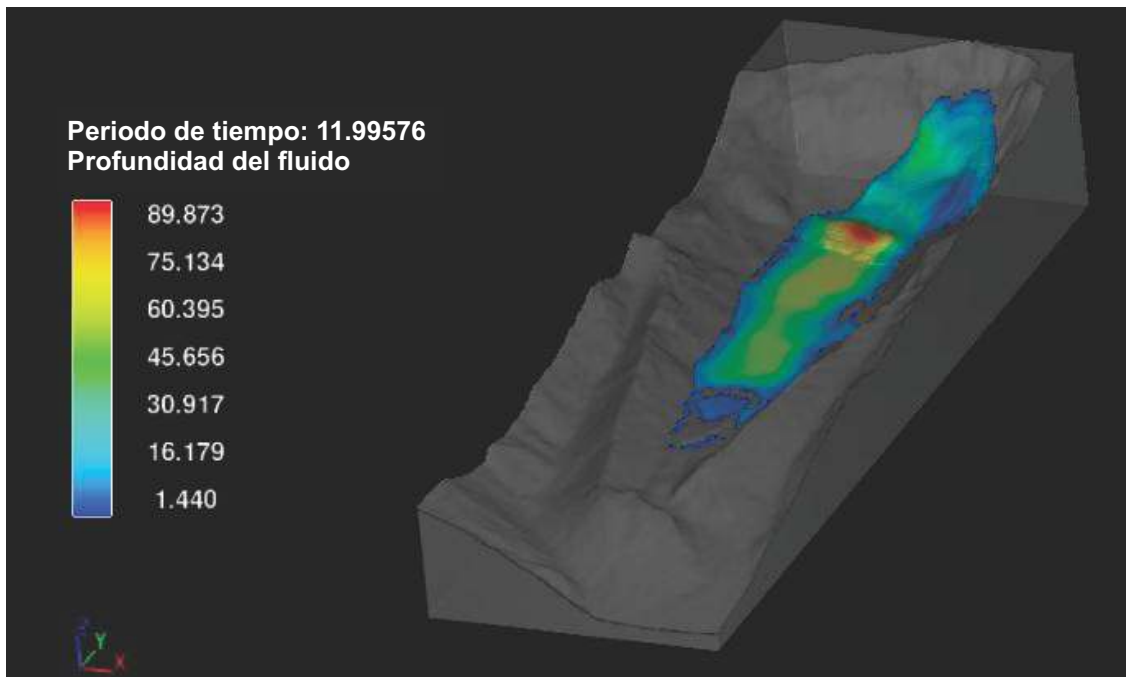


Figura 12. Ola para el escenario de avalancha grande representada por la profundidad del fluido justo después de que la avalancha ingresa a la laguna

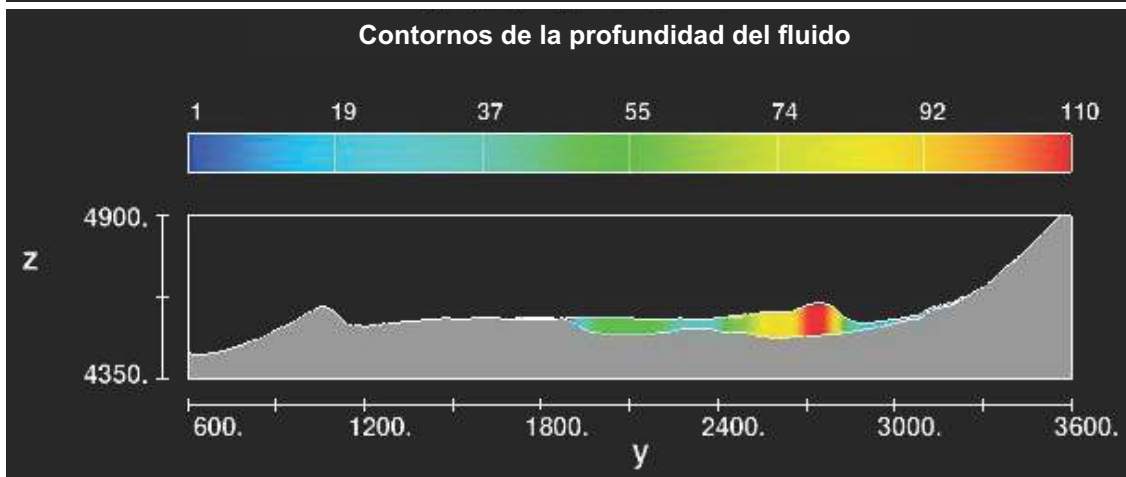
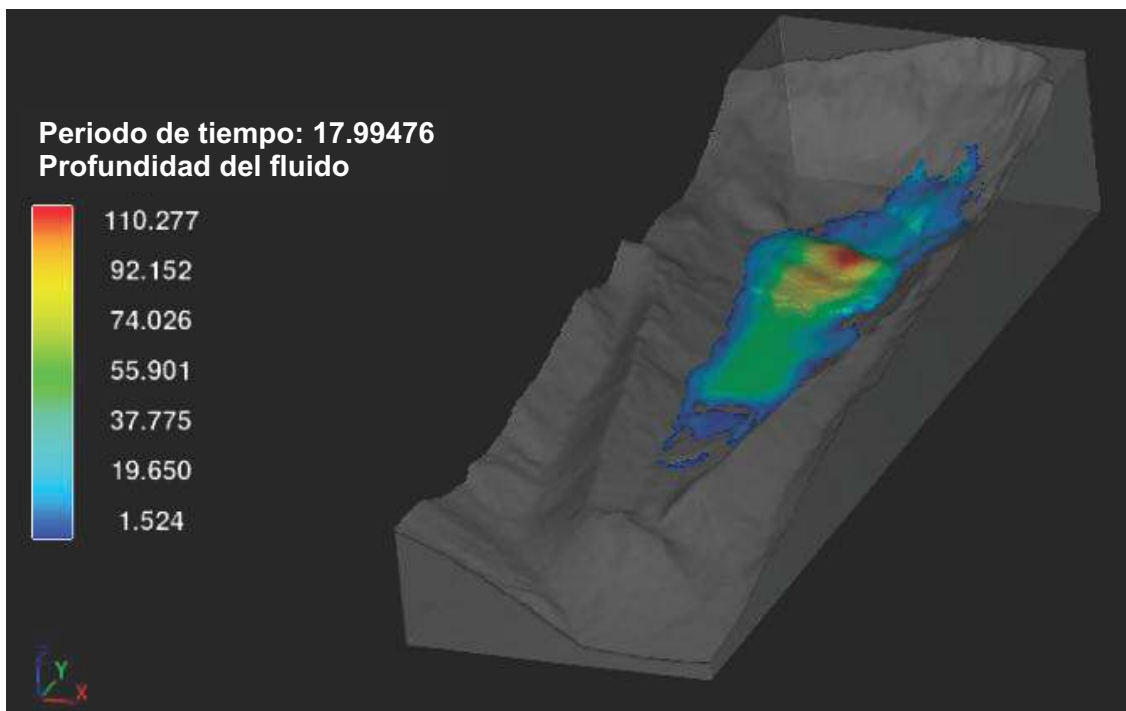


Figura 13. Ola para el escenario de avalancha grande en su máxima altura: (arriba) vista ortográfica y (abajo) perfil de la ola

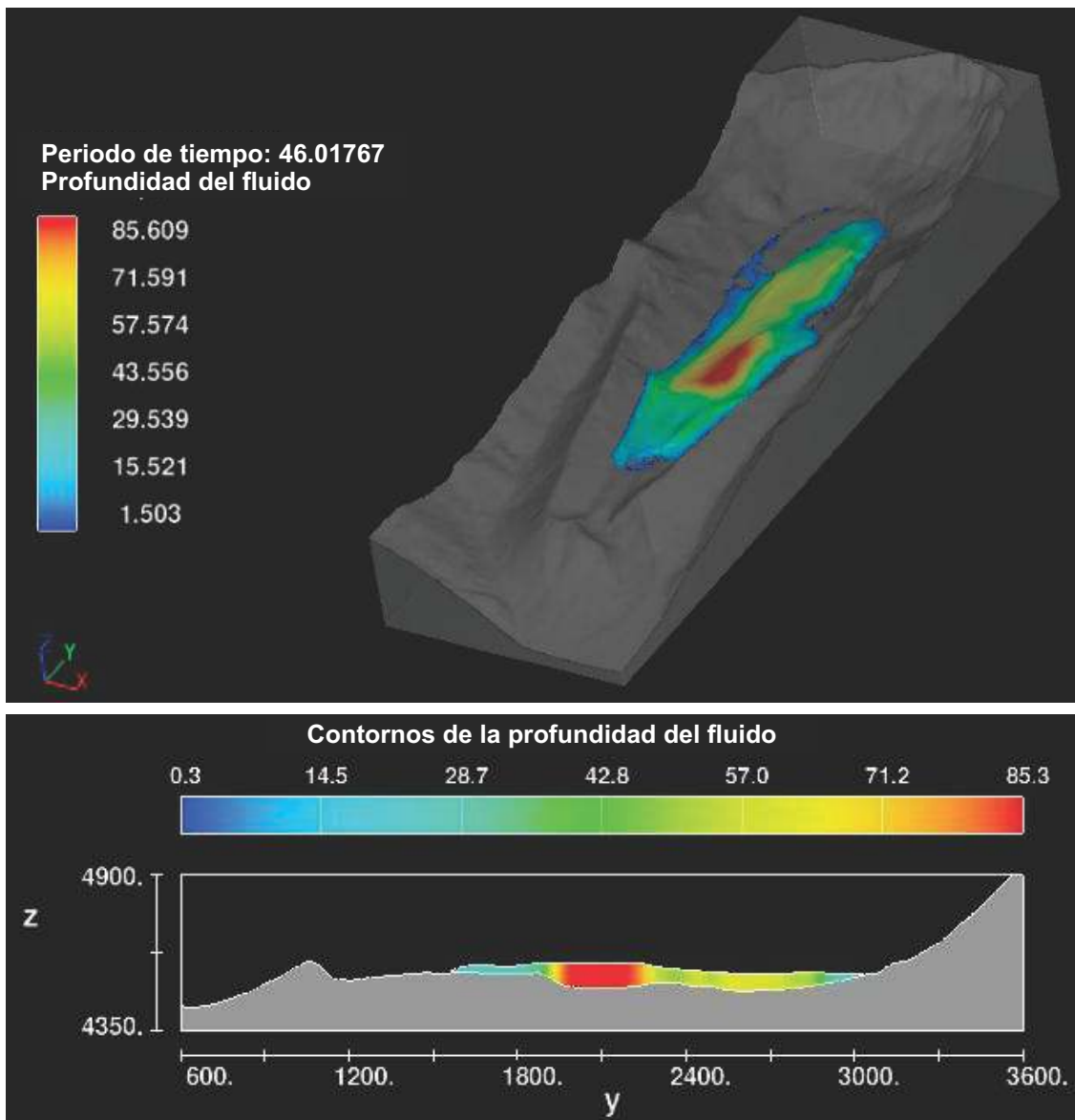


Figura 14. Ola para el escenario de avalancha grande en el punto de desborde de la morrena terminal

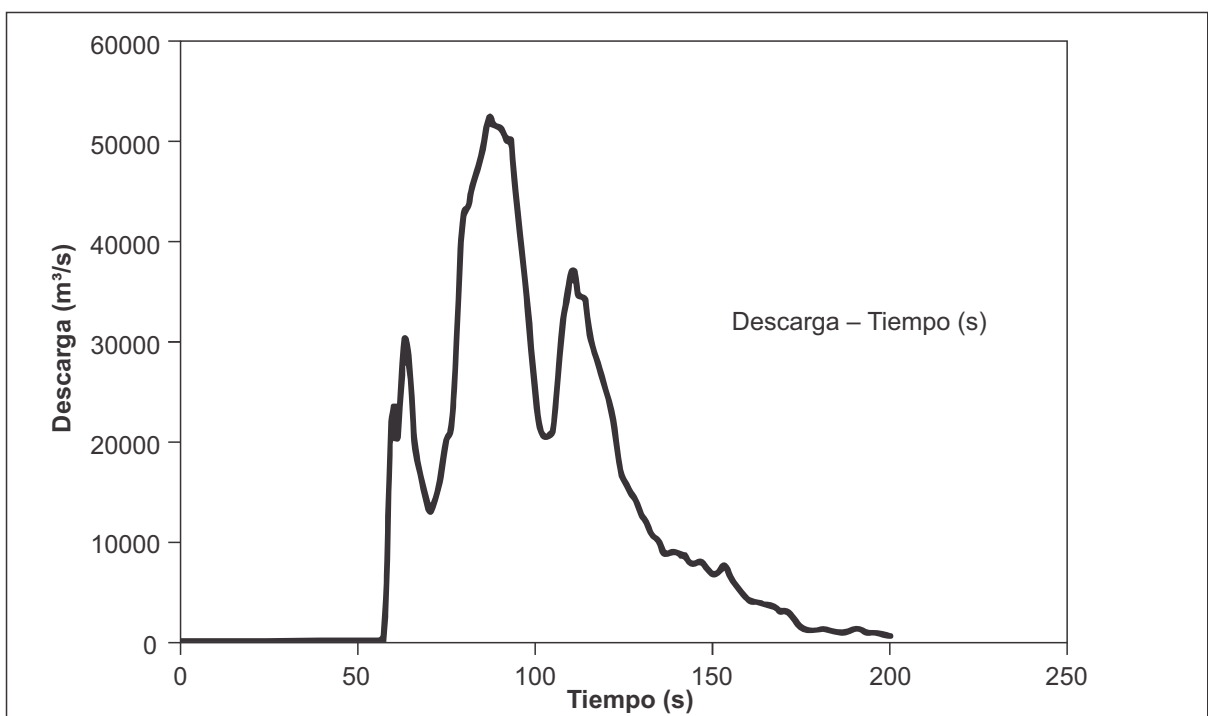


Figura 15. Hidrograma de descarga en la desembocadura de la laguna debido a desborde por ola para el escenario de avalancha grande

SIMULACIÓN DE LA BRECHA MORRÉNICA

Se generaron hidrogramas de descarga de la laguna Palcacocha para la rotura de la morrena usando MIKE-11. La Figura 16 muestra los hidrogramas de flujo de descarga correspondientes a los casos donde la profundidad de la brecha alcanza los 56 m y 22.5 m, respectivamente. Es más probable que ocurran eventos de caudales bajos ya que las capas más superficiales de la morrena son más susceptibles a la erosión (menor área de superficie y

menor cohesión material bajo auto-presión). El hidrograma de la brecha de 22.5 m ($Q_p = 5528 \text{ m}^3/\text{s}$ en 32 min.) coincide con el límite inferior del intervalo de confianza dado por el modelo empírico Froehlich. Cuando el hidrograma de desborde de la ola se combina con el hidrograma de brecha morrénica, el hidrograma combinado resultante del aluvión se determina tal como se muestra en la Figura 17.

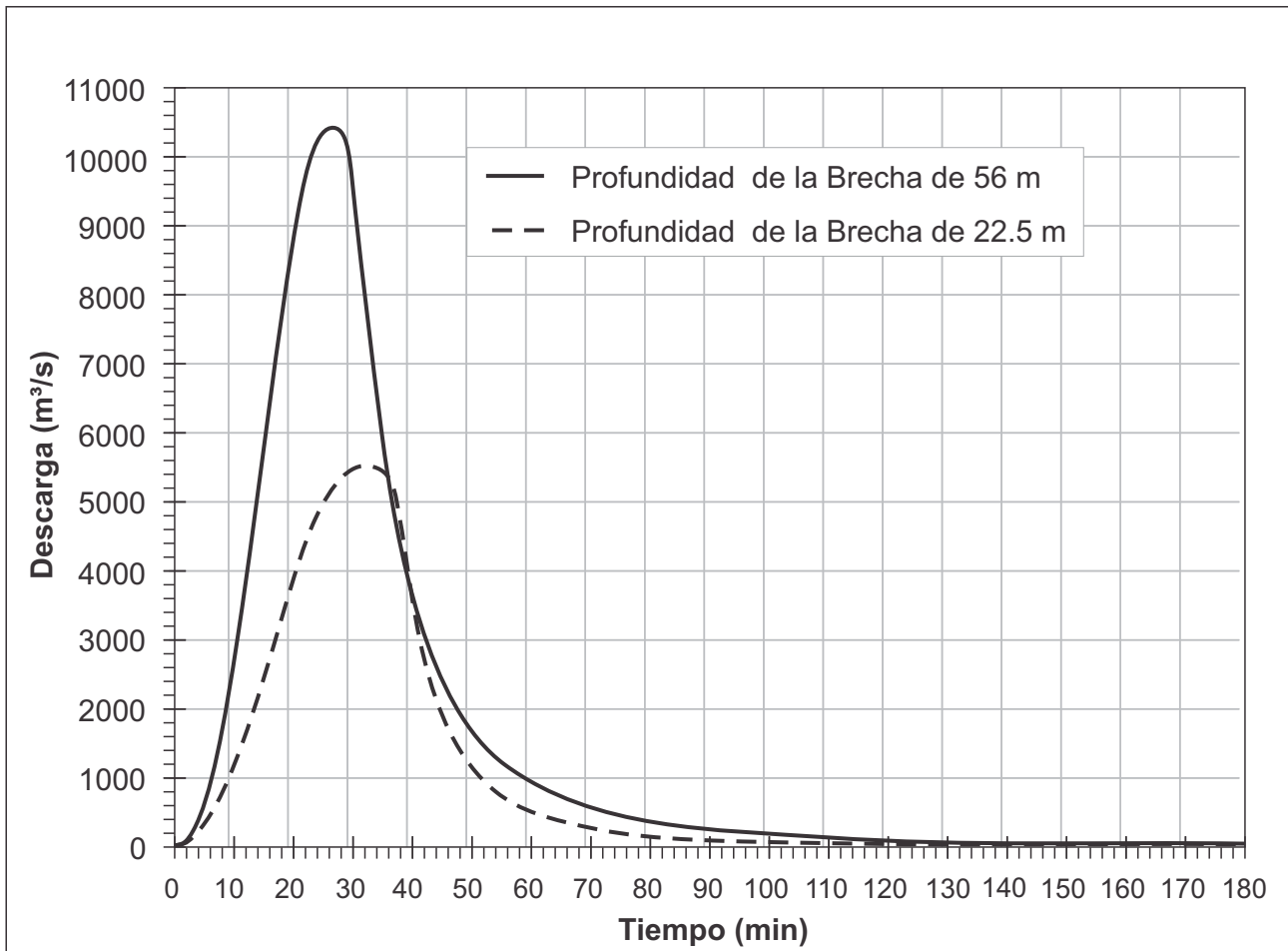


Figura 16. Hidrogramas de descargas potenciales máxima y mínima de la laguna Palcacocha debido a una brecha morrénica

La combinación de hidrogramas del desborde de la ola con el hidrograma de erosión de la morrena resulta en los hidrogramas combinados para las brechas de 22.5 y 56 m (Figura 17). Estos hidrogramas representan dos procesos consecutivos de naturaleza y escala diferentes. Mientras que el flujo de descarga del desborde de la ola es casi instantáneo, a la falla erosiva de la morrena le toma más de una hora drenar la mayor parte del agua de la laguna. Ambos fenómenos plantean diferentes tipos

de peligros: el poder destructivo de un volumen de agua relativamente pequeño liberado a velocidades extremadamente altas en el caso de la ola de desborde que ayuda a iniciar la erosión de la morrena, y el efecto más sostenido del volumen mucho mayor drenado por la brecha morrénica. Los impactos de estos hidrogramas combinados en inundaciones aguas abajo son explorados en la siguiente sección.

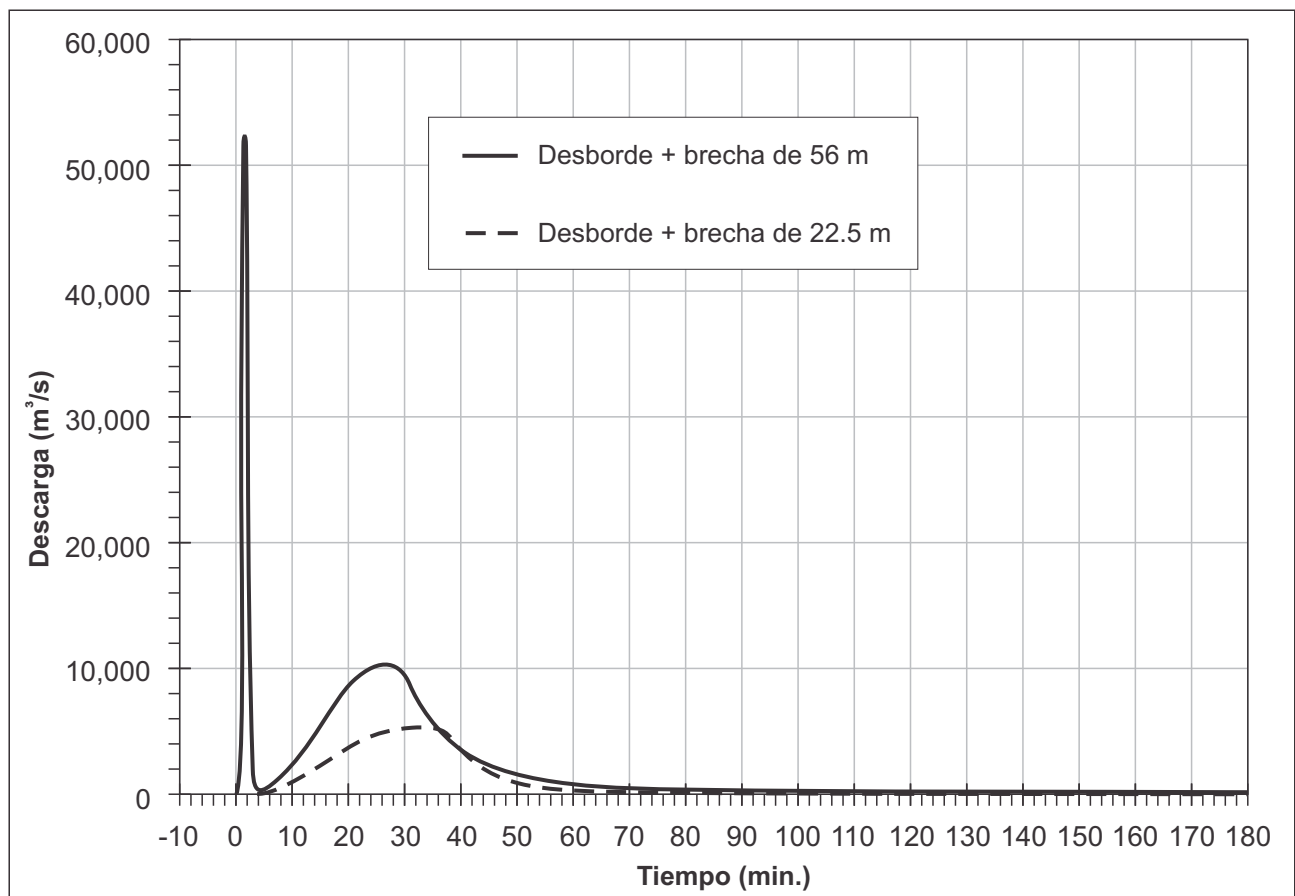


Figura 17. Hidrogramas combinados del desborde de la ola y las brechas de 56 m y 22.5 m

SIMULACIÓN DE LA INUNDACIÓN

La Figura 18 muestra las ubicaciones de las cinco secciones transversales aguas abajo de la laguna Palcacocha donde se presentan los hidrogramas de inundación de las simulaciones Flo-2D. La Tabla 7 proporciona detalles de las ubicaciones de las secciones transversales. Las Figuras 19 y 20 muestran los hidrogramas en las cinco secciones transversales aguas abajo de la laguna Palcacocha resultantes de los escenarios de brecha de 56 m y 22.5 m, respectivamente. La Tabla 8 proporciona detalles de los resultados en las secciones transversales. En la sección transversal 1, el hidrograma es todavía similar al hidrograma original en la laguna con el hidrograma de desborde de la ola que precede al hidrograma de erosión de la morrena. El hidrograma en la sección transversal 2, ubicado justo aguas arriba del punto donde el cañón del río Paria (quebrada Cojup) se angosta y se vuelve más abrupto, muestra que el flujo de la erosión de la morrena y la descarga de la laguna alcanza a la ola de desborde. En este punto, los volúmenes de los eventos se combinan y continúan aguas abajo como un solo evento. Este hecho se prevé ya que el río es relativamente ancho con laderas suaves entre la laguna y la segunda sección transversal y en este tramo la velocidad máxima es de solo 2-4 m/s. Los sedimentos producto de la erosión de la morrena serían depositados en esta sección antes de que la inundación continúe aguas abajo. La

sección transversal 3 está ubicada en la entrada del Parque Nacional Huascarán donde las grandes morrenas proporcionarían sedimentos a la inundación. Asimismo, debajo de este punto, los poblados comienzan a aparecer aumentando la exposición de las personas al aluvión.

La sección transversal 4 se ubica en la entrada de la ciudad. Toma poco más de una hora desde el inicio de la avalancha para que la inundación causada por la brecha de 56 m llegue a este sitio y 1.2 horas para la inundación causada por la brecha de 22.5 m. Los picos del hidrograma disminuyen cerca de 10% entre las secciones transversales segunda y cuarta. Los mayores cambios en la pendiente ocurren entre las secciones transversales 3 y 4, cuando el caudal se acelera. Como resultado, el flujo puede socavar las grandes morrenas laterales en este tramo añadiendo material al volumen de sedimentos en la crecida. El hidrograma en la sección transversal 5, muestra la descarga pico en el río Santa, cuando sale de la ciudad. El pico se ha atenuado considerablemente en este punto. La inundación llega a esta sección transversal luego de aproximadamente 1.3 y 1.6 horas para las brechas de 56 m y 22.5 m, respectivamente. Al flujo pico le toma unos 30 minutos para cruzar la ciudad.

Tabla 7. Ubicación de las secciones transversales en el hidrograma de inundación aguas abajo de la laguna Palcacocha.

Sección	Latitud (gra)	Longitud (gra)	Elevación (m)	Distancia hasta la salida de la laguna (m)
1	-9.4200	-77.3900	4,313	1,912
2	-9.4605	-77.4292	4,052	8,319
3	-9.4831	-77.4516	3,774	11,886
4	-9.5264	-77.5040	3,165	20,177
5	-9.5039	-77.5373	2,965	26,517

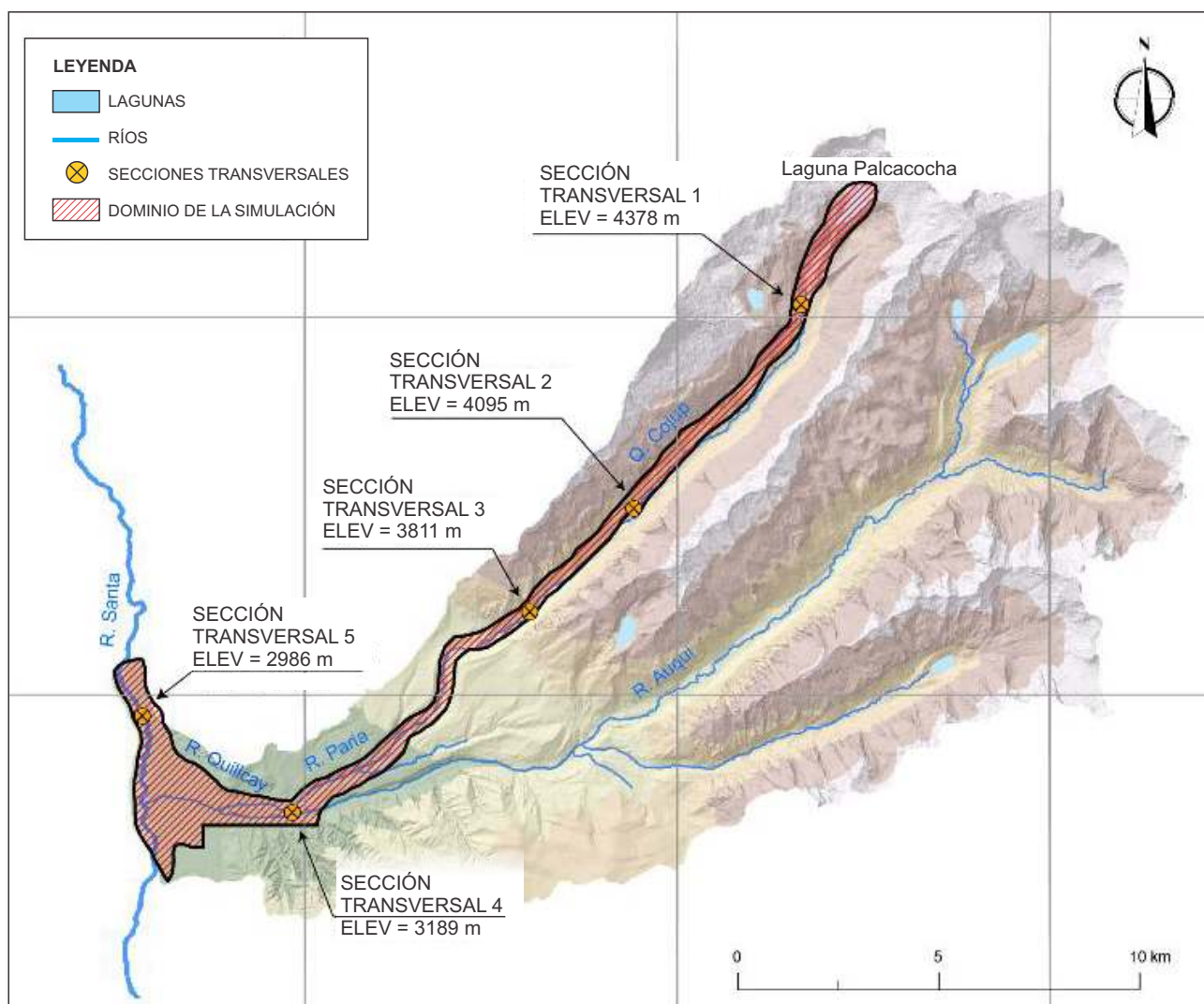


Figura 18. Secciones transversales para los resultados de la simulación en FLO-2D

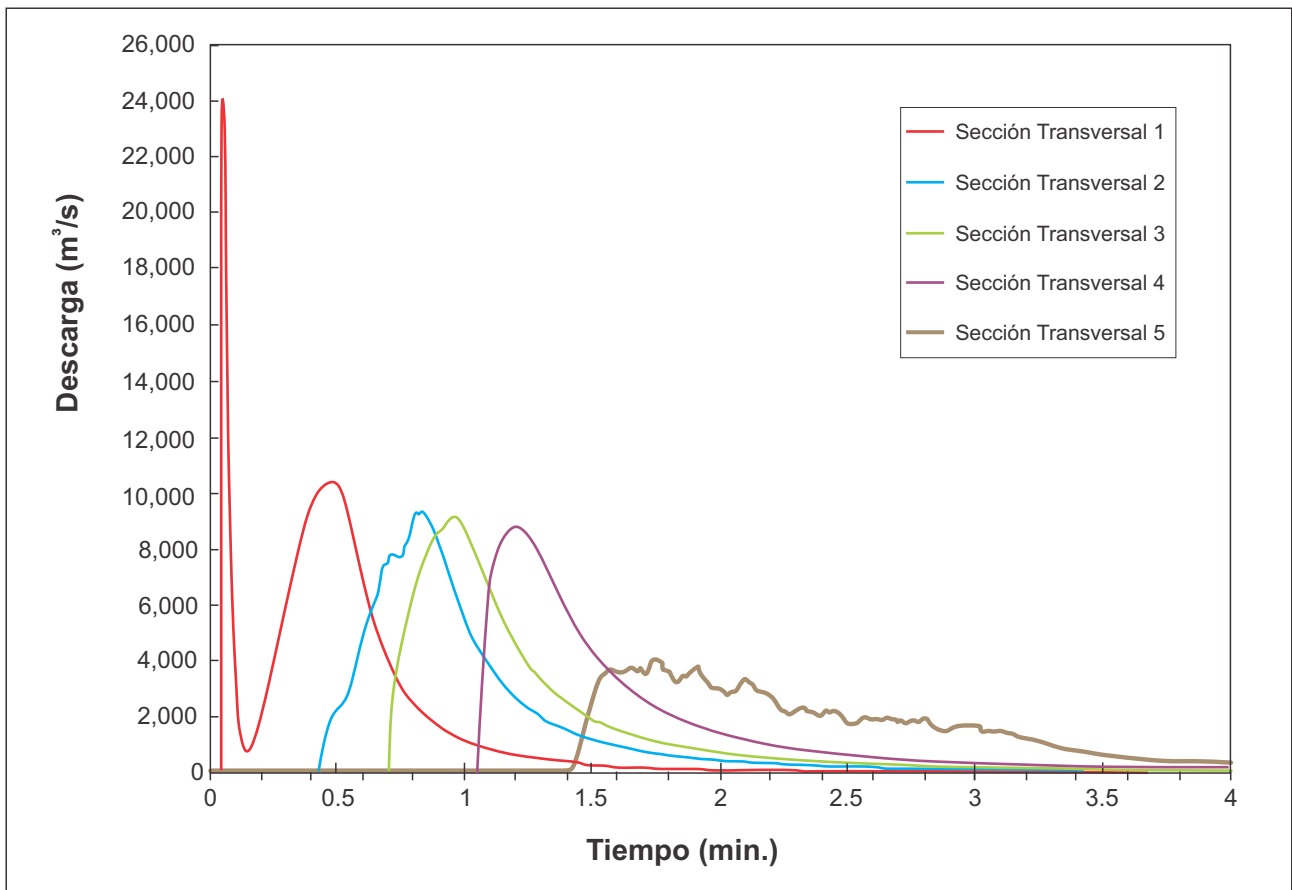


Figura 19. Hidrogramas en las secciones transversales para el colpaso de 56 m

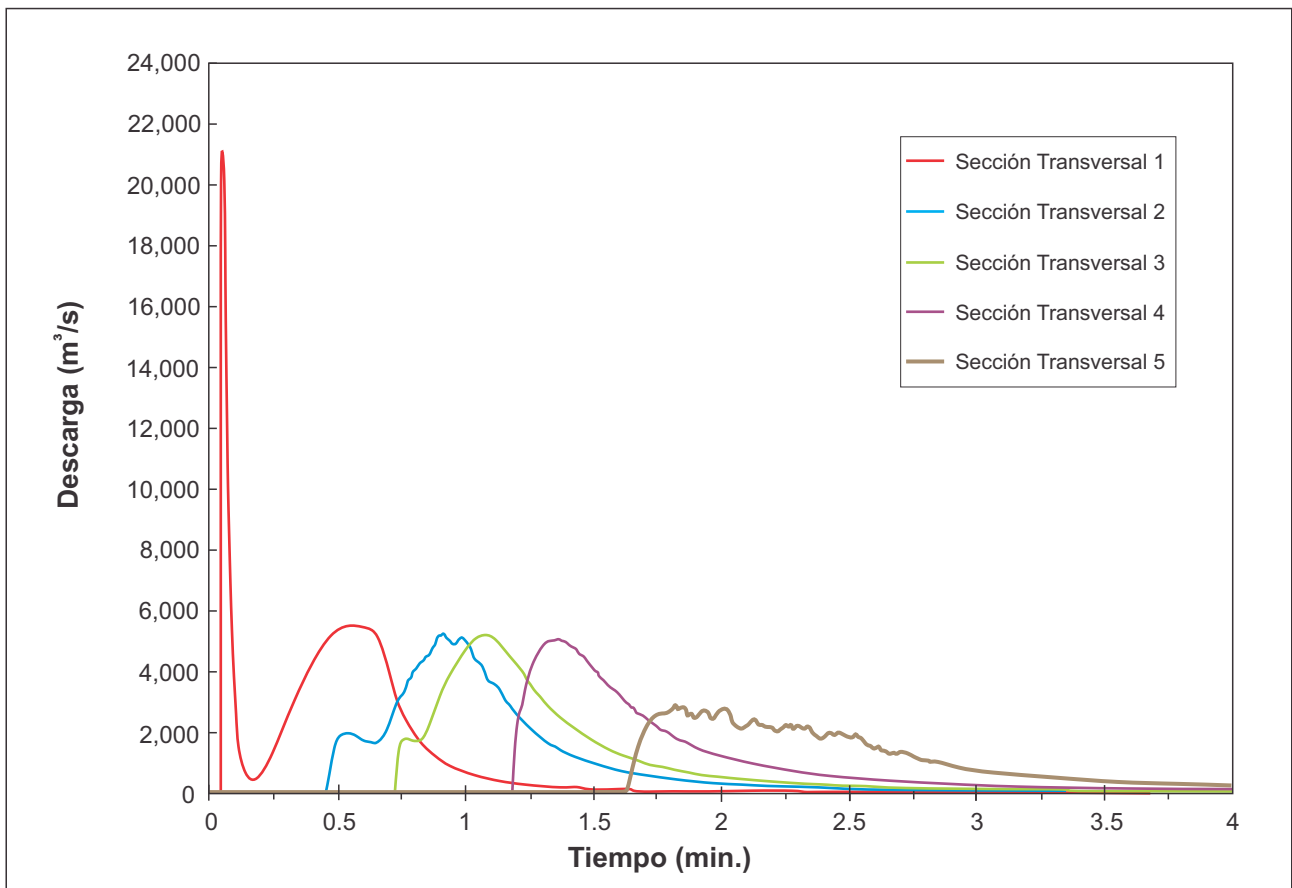


Figura 20. Hidrogramas en las secciones transversales para el colpaso de 22.5 m

Tabla 8. Resultados de simulación en Flo-2D en secciones transversales aguas abajo de la laguna Palcacocha.

Sección	Tiempo de llegada (h)	Tiempo pico (h)	Descarga pico (m ³ /s)	Volumen total (10 ⁶ m ³)
Brecha de 56 m				
1 - Ola de desborde	0.05	0.05	23,657	2.4
1 - Erosión de morrena	0.17	0.48	10,387	17.4
2	0.47	0.85	9,351	19.8
3	0.71	0.95	9,138	19.7
4	1.06	1.2	8,822	19.5
5	1.42	1.75	4,091	18.6
Brecha de 22.5 m				
1 - Ola de desborde	0.05	0.05	22,299	2.37
1 - Erosión de morrena	0.21	0.57	5,507	10.12
2	0.5	0.91	5,280	12.28
3	0.74	1.07	5,190	12.16
4	1.21	1.38	5,048	11.76
5	1.63	1.84	2,840	10.71

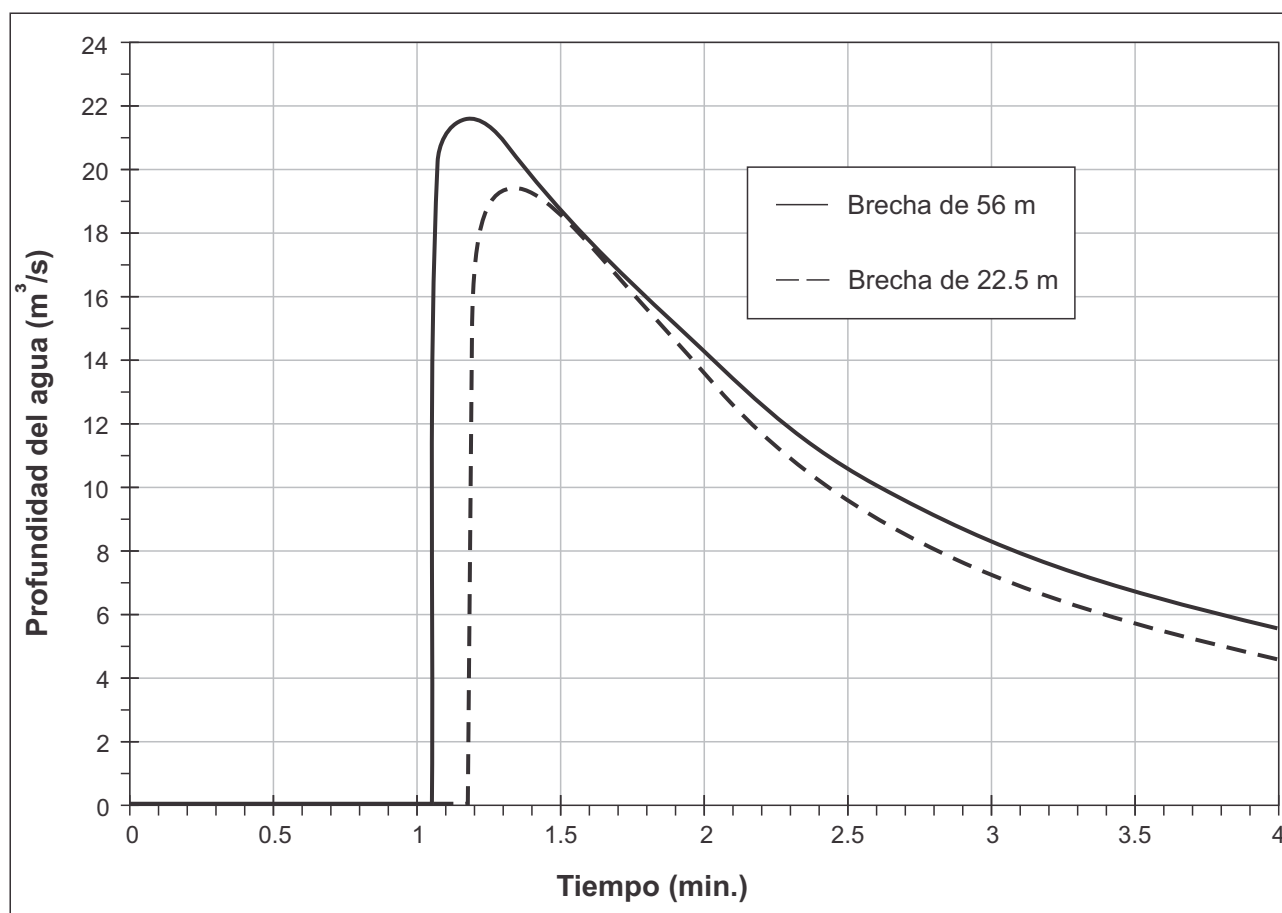


Figura 21. Profundidad de la inundación versus tiempo en la sección transversal 4 para las brechas de 56 m y 22.5 m

INUNDACIÓN EN HUARAZ

La profundidad de inundación máxima resultante en Huaraz para los eventos de 56 m y 22.5 m se muestra en las Figuras 22 y 23, respectivamente. Las áreas más profundas se encuentran cerca de los cauces de los ríos Quillcay y Santa. Las profundidades máximas de inundación se dan en el lado sur del río donde se ubica la mayor parte del co-

mercio en Huaraz. Tomando en cuenta la brecha de 56 m, dentro de la ciudad, el área donde las profundidades son pequeñas (<1 m) está limitada a 0.13 km² en una franja estrecha que varía de 20 a 60 metros de ancho en la periferia del área inundada. El área inundada a una profundidad entre 0.2-1 m cubre un área de 0.51 km² y el

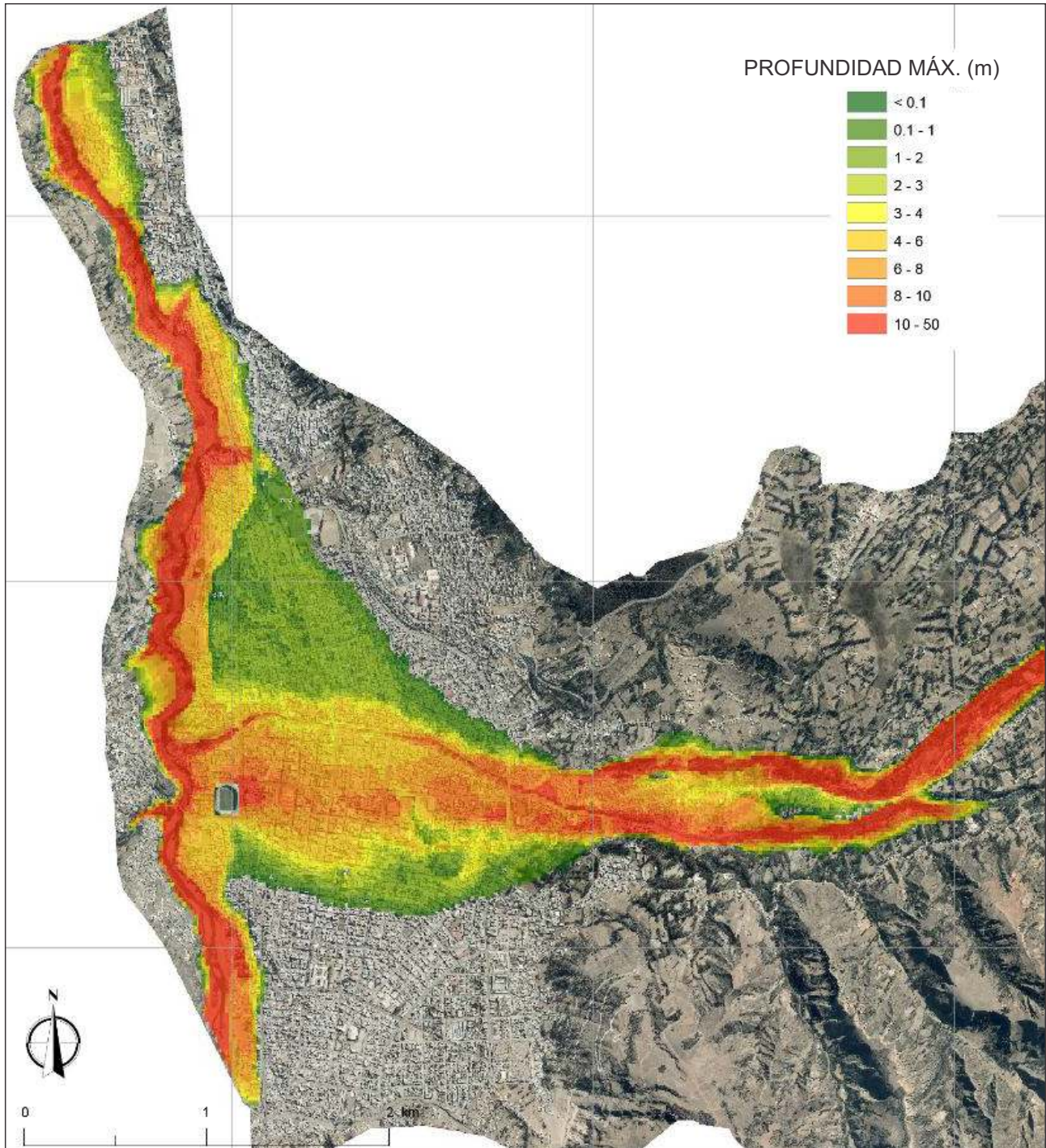


Figura 22. Profundidad del agua de la inundación en Huaraz según el hidrograma combinado de la brecha de 56 m

área inundada en profundidades superiores a 1 m, cubre un área de 4.5 km². El área cercana al cauce del río Quillcay muestra profundidades de 5-10 m en una franja de aproximadamente 350 m de ancho en el lado este de la ciudad y hasta 500 m de ancho en el lado oeste de la ciudad cerca del río Santa. Comparando los dos eventos, se puede observar que las áreas que han tenido profundidades de

inundación de 1-2 m en la brecha de 56 m, tienen profundidades de 0.1-1 m en el evento de 22.5 m. Igualmente, las áreas que muestran profundidades de 4-6 m en el evento de 56 m, se reducen a profundidades de 3-4 m en el evento de 22.5, y áreas con profundidades de 8-10 m se reducen a profundidades de 6-8 m en la brecha de 22.5 m.

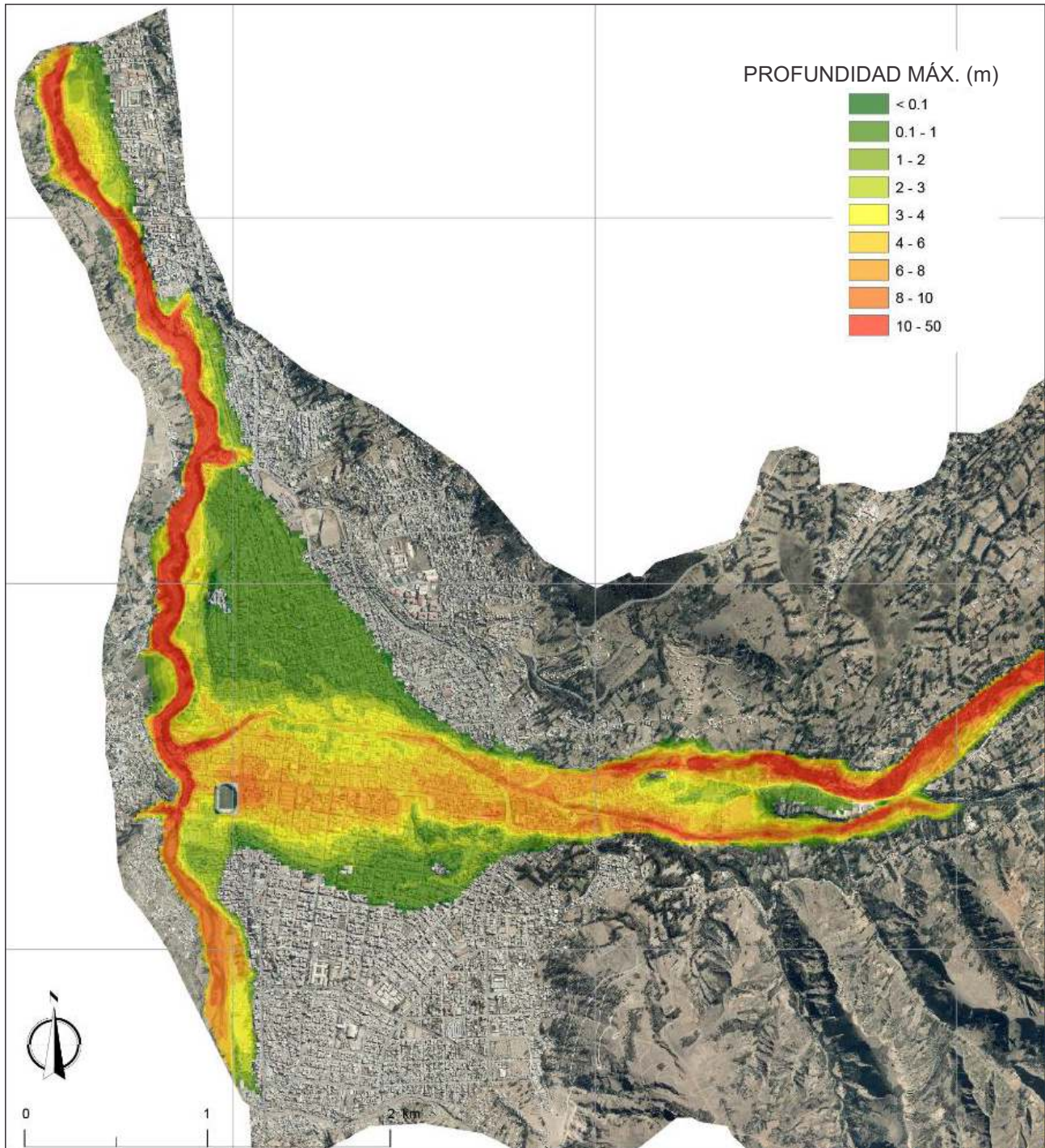


Figura 23. Profundidad del agua de la inundación en Huaraz según el hidrograma combinado de la brecha de 22.5 m.

Las velocidades máximas dentro de la ciudad se muestran en las Figuras 24 y 25 para los eventos de 56 m y 22.5 m, respectivamente. En forma similar a las profundidades de inundación, las velocidades máximas se dan a lo largo de los cauces de los ríos Quillcay y Santa. Considerando la brecha de 56 m, dentro de la ciudad, las velocidades mayores de 8 m/s (rojo en la Figura 24) se dan solo en el

cauce estrecho del río y en pequeñas áreas aisladas en la ciudad. Las velocidades entre los 5-8 m/s (amarillo) se dan en las áreas donde las profundidades de la inundación están entre los 5-10 m. En el área externa, velocidades de 0-2 m/s (azul y celeste) se dan en áreas con profundidades menores a 5 m.

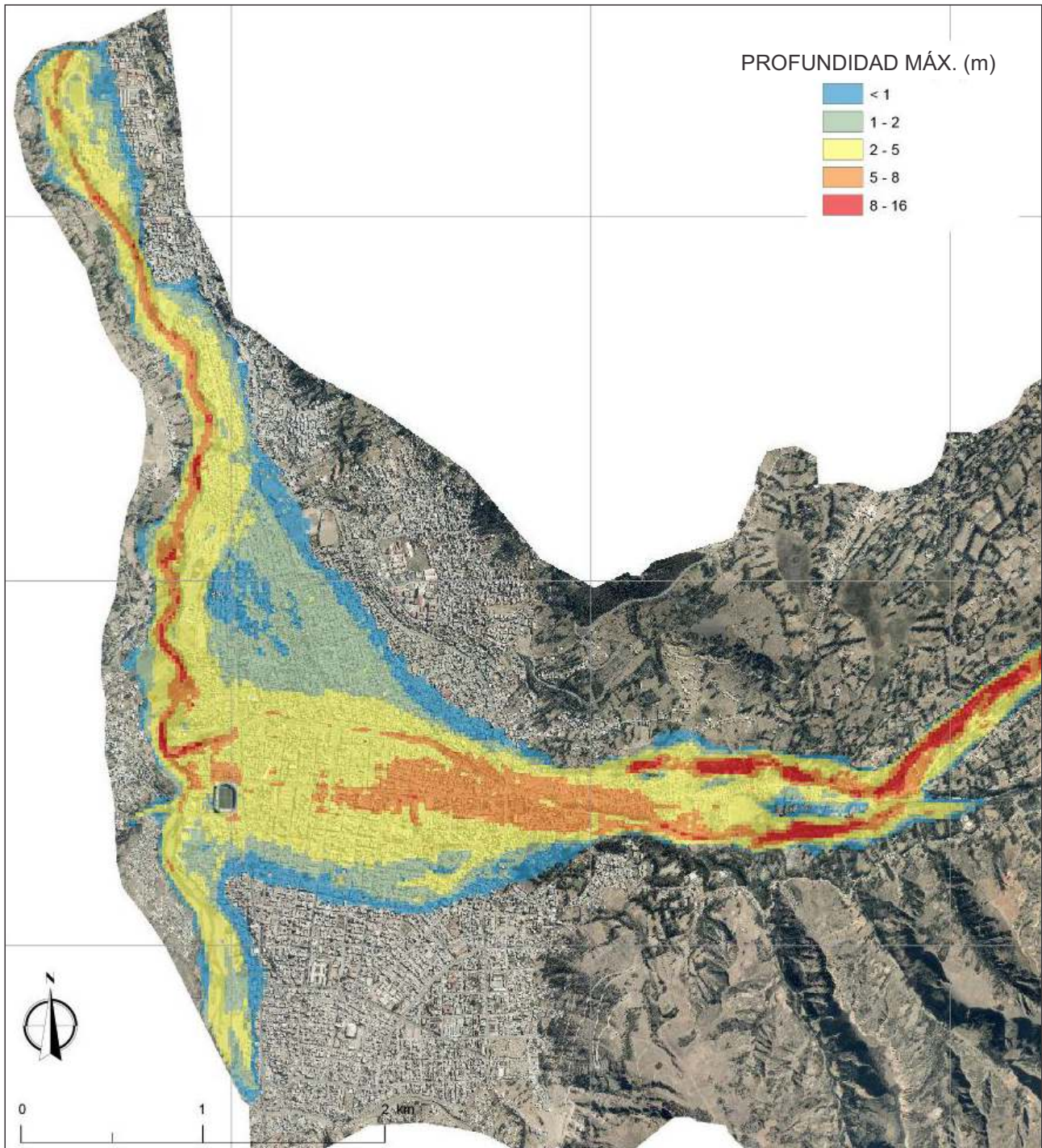


Figura 24. Velocidad máxima de las aguas de la inundación en Huaraz para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m

Las reducciones de las velocidades para la brecha de 22.5 m comparadas con el evento de 56 m siguen el mismo patrón de las profundidades de inundación discutidas anteriormente.

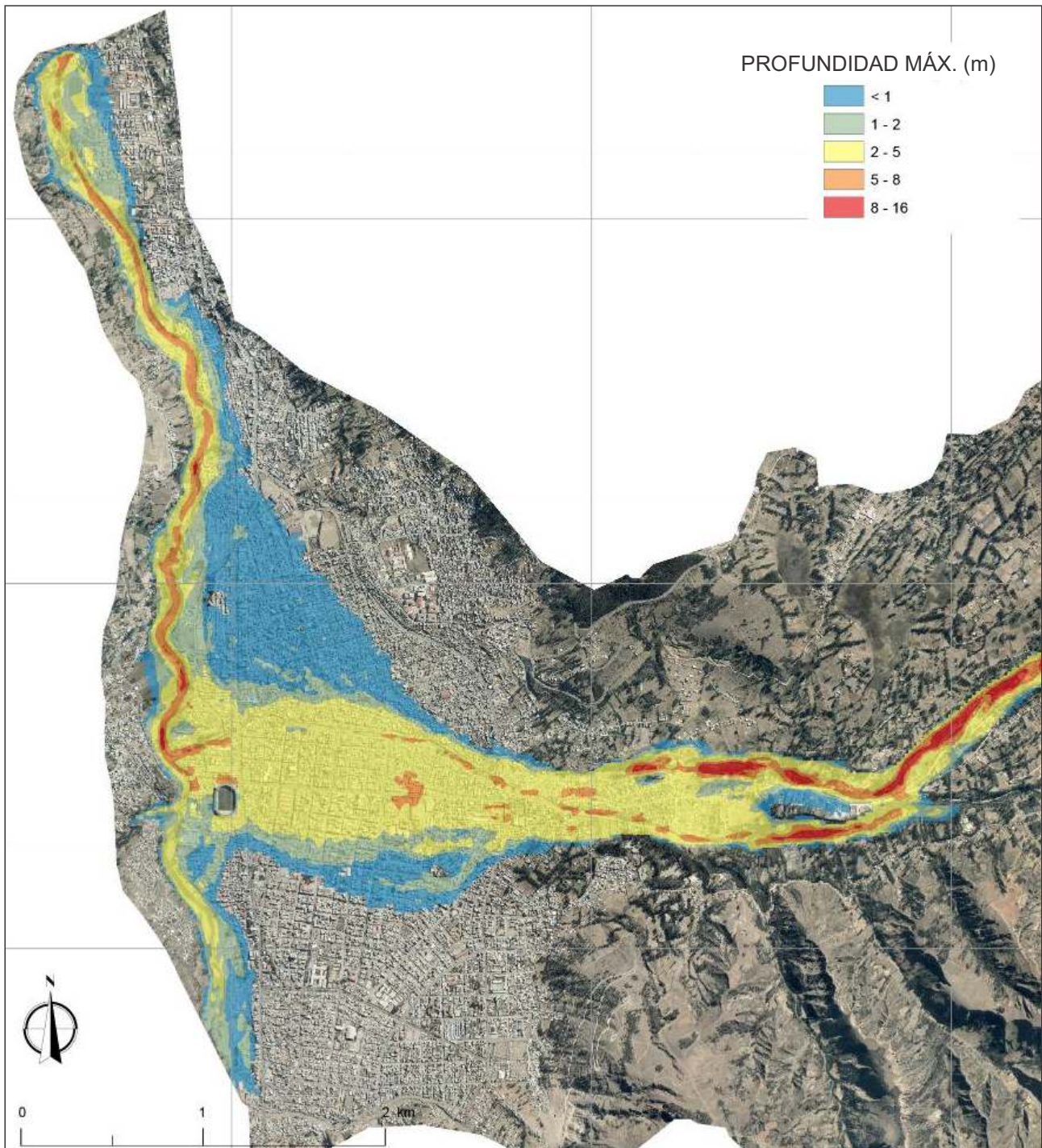


Figura 25. Velocidad máxima de las aguas de la inundación en Huaraz para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m

IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

El método de identificación de peligros descrito en la sección anterior, empleando la profundidad máxima de inundación y la velocidad máxima del agua, es usado para determinar el

nivel de peligro en diferentes puntos de la ciudad. Las Figuras 26 y 27 muestran los niveles de peligro estimados para los eventos de 56 m y 22.5 m, respectivamente.

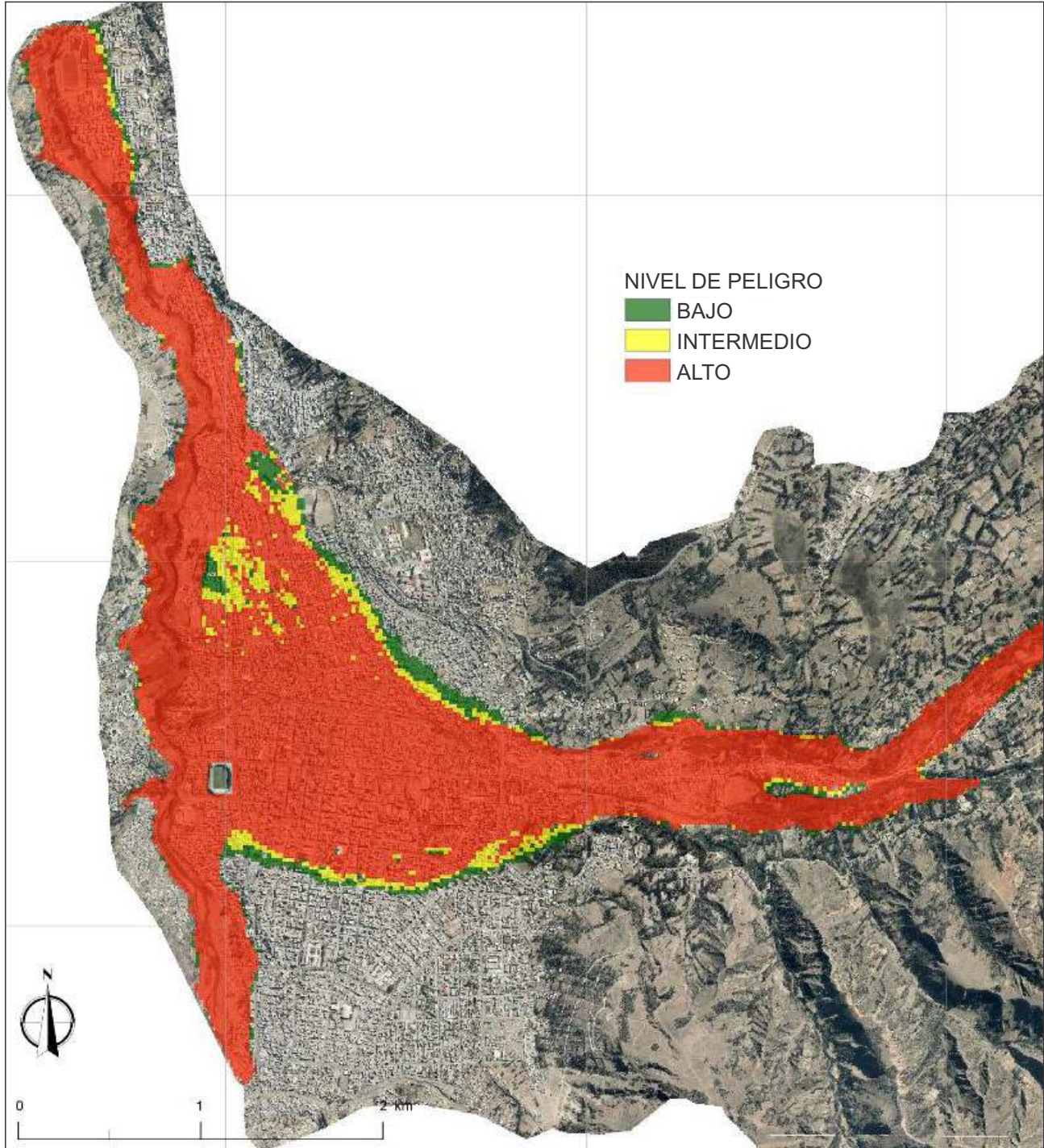


Figura 26. Nivel de peligro en Huaraz por el aluvión de la laguna Palcacocha para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m

Tal como se muestra en la Figura 26, casi todas las áreas inundadas dentro de la ciudad se encuentran en la zona de mayor peligro (rojo) para el evento de 56 m. Muy pocos lugares en el límite del área inundada se encuentran en las

zonas de peligro intermedio (amarillo) o bajo (verde). Para el evento de 22.5 m, existe una reducción de la zona de peligro máximo (rojo) y un incremento en la zona de peligro intermedio (amarillo) al norte del río Quillcay.

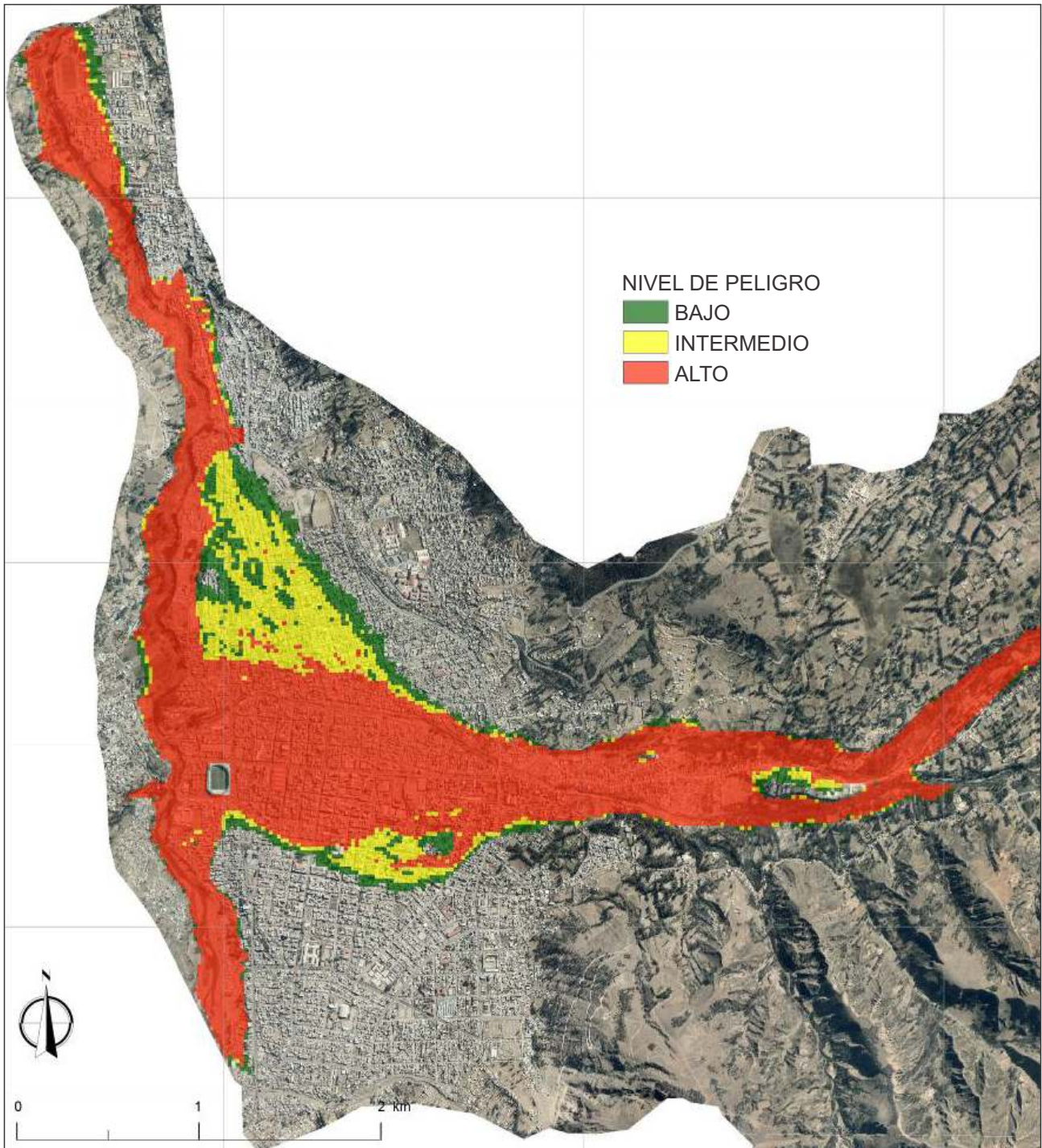


Figura 27. Nivel de peligro en Huaraz por el aluvión de la laguna Palcacocha para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m.

La metodología de peligro se basa en la intensidad de la inundación y no considera el tiempo que tienen las personas para escapar de la zona de peligro. En las Figuras 28 y 29, se

muestra cómo avanza la inundación en la ciudad para los eventos de 56 m y 22.5 m, respectivamente. Para el evento de 56 m, alrededor de 1 hora después de que se produce la ola

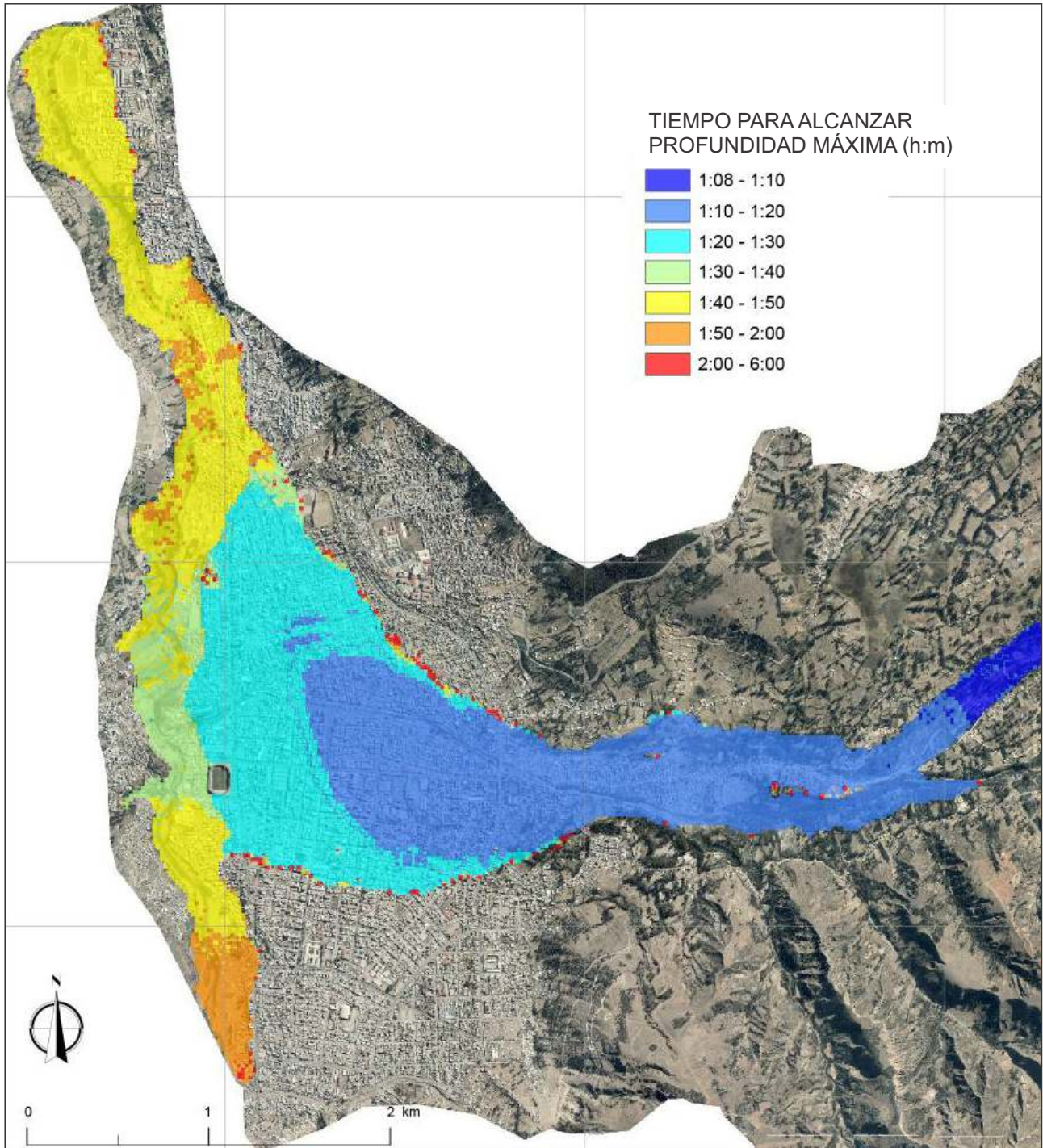


Figura 28. Tiempo para alcanzar la profundidad máxima de inundación para el escenario de avalancha grande con una brecha de 56 m.

inducida por la avalancha en la laguna, la inundación llega a la ciudad y el pico máximo llega 6 a 8 minutos después. Además, la inundación cruza la ciudad de este a oeste en

unos 20 minutos expandiéndose al norte y sur a medida que avanza por la ciudad. Este escenario es similar para la brecha de 22.5 m, pero la inundación se retrasa unos 10 minutos.

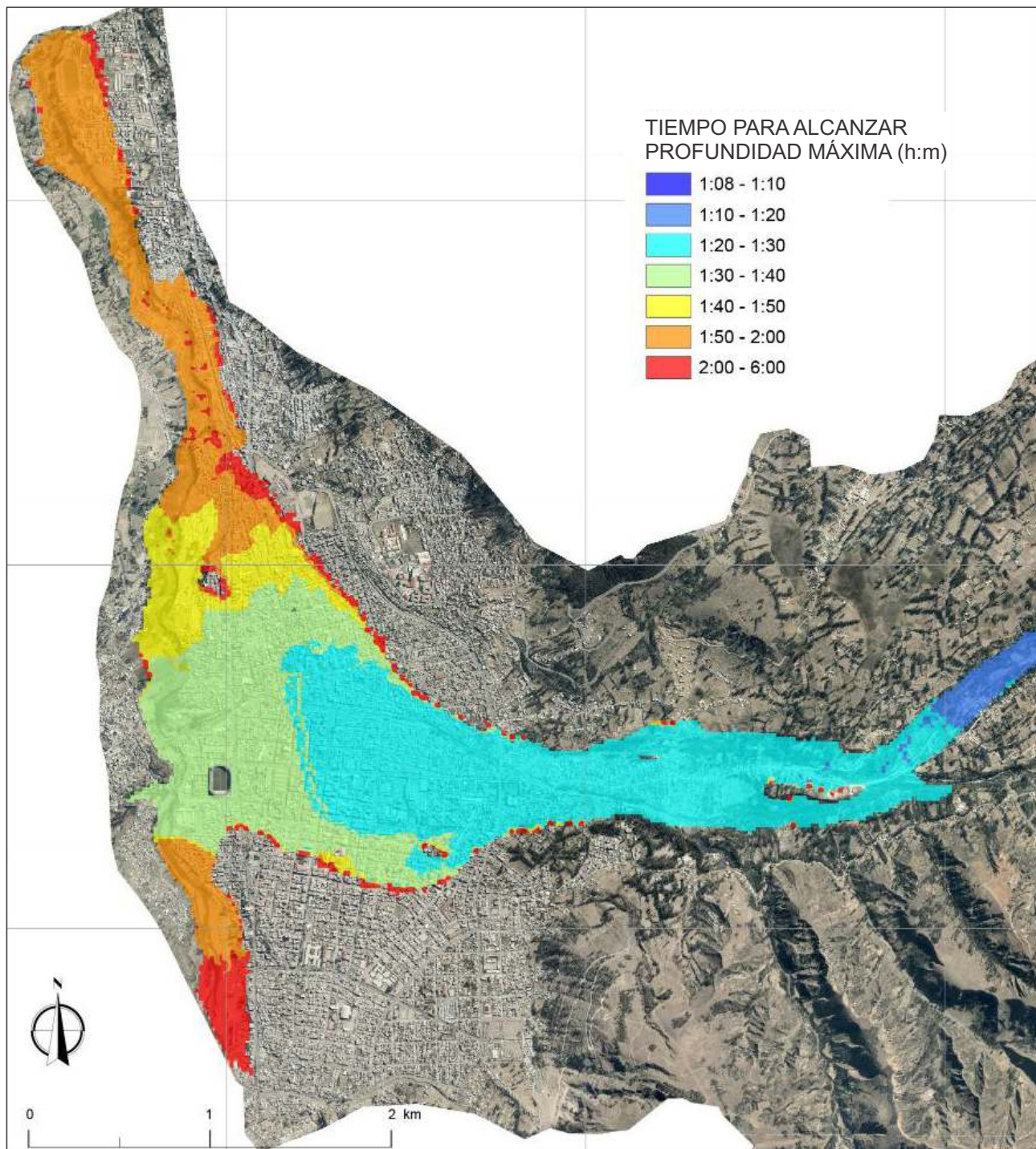


Figura 29. Tiempo para la profundidad máxima de inundación para el escenario de avalancha grande con una brecha de 22.5 m.

CONCLUSIONES

Se simuló la cadena de procesos desencadenada por una avalancha en la laguna Palcacocha con el fin de evaluar el nivel de peligro para la ciudad de Huaraz. Se llevaron a cabo simulaciones de avalancha para determinar la altura y la velocidad del material de la avalancha que entra a la laguna y estas simulaciones mostraron una altura de avalancha de 20 m y una velocidad de 50 m/s que ingresan a la laguna. Se empleó un modelo hidrodinámico tridimensional para simular el movimiento a través de la laguna de la ola de impulso resultante y el desborde de la morrena terminal. El hidrograma de la descarga de la ola de desborde liberó un volumen de agua de $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$. La erosión de la morrena resultante del desborde fue simulada para proporcionar un hidrograma combinado del agua y detritos liberados. Se simularon dos escenarios de erosión de la morrena: un evento muy desfavorable de una brecha de 56 m y uno más pequeño de 22.5 m. El

hidrograma de descarga combinado liberó un volumen de $19.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el evento de 56 m y $12.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ para el evento de 22.5 m. Estos hidrogramas fueron usados como información para un modelo de inundación bidimensional (agua y detritos), y los hidrogramas fueron canalizados aguas abajo llegando a la ciudad de Huaraz en 1.06 y 1.20 horas después de ocurrida la avalancha para los eventos de 56 m y 22.5 m, respectivamente. La inundación en la ciudad es extensa en ambos eventos, con profundidades que sobrepasan un metro en varias áreas, especialmente cerca del cauce del río Quillcay y con una velocidad de inundación que sobrepasa 1 m/s en gran parte de esta zona. Debido a la profundidad de la inundación y la velocidad del flujo, la mayor parte del área de la ciudad que experimente la inundación tendrá un nivel de peligro muy alto, poniéndose en riesgo vidas y propiedades.

REFERENCIAS

- Ball, G.H. and D.J. Hall (1965) *ISODATA, a Novel Method of Data Analysis and Pattern Classification*. Stanford Research Institute, Menlo Park, Ca.
- Bartelt, P., Y. Buehler, M. Christen, Y. Deubelbeiss, M. Salz, M. Schneider, L. Schumacher (2013) *RAMMS: Rapid Mass Movement Simulation: A numerical model for snow avalanches in research and practice. User Manual v1.5 – Avalanche*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf.
- Burns, P., A. Nolin (2014) Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010, *Remote Sensing of Environment* 140:165–178
- Carey, M. (2010) *In the Shadow of Melting Glaciers: Climate Change and Andean Society*, Oxford Univ. Press, New York.
- Carey, M., C. Huggel, J. Bury, C. Portocarrero, W. Haeberli (2012) An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: Lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru, *Climatic Change* 112:733–767.
- Chander, G. and B. Markham (2003) Revised Landsat-5 Tm Radiometric Calibration Procedures and Post Calibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41:2674–2677.
- Chander, G., B.L. Markham, D.L. Helder (2009) Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment* 113:893–903.
- Chow, V. T. (1959) *Open Channel Hydraulics*. Caldwell, New Jersey, USA: The Blackburn Press.
- Christen, M., P. Bartelt, U. Gruber (2005) Numerical calculation of snow avalanche runout distances. In: Soibelman, L.; Pena-Mora, F. (eds) *Computing in Civil Engineering. Proc. of the 2005 International Conference*, July 12-15, 2005. Cancun, Mexico. 11 p.
- Christen, M., P. Bartelt, J. Kowalski, L. Stoffel (2008) Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. In: *International Snow Science Workshop 2008, Proceedings*. September 21-27. Whistler, BC, CAN. 709-716.
- Christen, M., J. Kowalski, P. Bartelt (2010) RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology* 63, 1–14.
- DHI - Danish Hydraulics Institute (2001) MIKE 11 Reference manual, Appendix A. Scientific background.
- Diario La República (2010-04-20). Se declara en emergencia la laguna Palcacocha en Huaraz. Accedido el 24-04-2010, www.larepublica.pe/regionales/20/04/2010/declaran-en-emergencia-la-laguna-palcacocha-en-huaraz.
- Emmer, A. and V. Vilímek (2013) Review Article: Lake and breach hazard assessment for moraine-dammed lakes: an example from the Cordillera Blanca (Peru), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1551–1565.

- Emmer, A. and V. Vilímek (2014) New method for assessing the potential hazardousness of glacial lakes in the Cordillera Blanca, Peru, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 11, 2391–2439
- Evans, S.G. and J.J. Clague (1988) Catastrophic rock avalanches in glacial environments. *Proc. Fifth Int. Symp. on Landslides*, Vol. 2, pp. 1153–1158.
- Fiebigler, G. (1997) Hazard Mapping in Austria. *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rockfall Engineering* 134, Vol. 61.
- Fischer, L., R. S. Purves, C. Huggel, J. Noetzli, and W. Haeberli (2012) On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 241–254.
- Flo-2D (2009) *Flo-2D User's Manual*, FLO-2D Software, Inc., Nutrioso, AZ
- Flow Science (2012) *FLOW-3D Documentation: Release 10.1.0*, Flow Science, Inc.
- Forzieri, G., M. Degetto, M. Righetti, F. Castelli, and F. Preti (2011) Satellite Multispectral Data for Improved Floodplain Roughness Modelling. *J. Hydrology* 407:41–57.
- Forzieri, G., G. Moser, E.R. Vivoni, F. Castelli, and F. Canovaro (2010) Riparian Vegetation Mapping for Hydraulic Roughness Estimation Using Very High Resolution Remote Sensing Data Fusion. *J. Hydraulic Engineering* 136:855–867.
- Fread, D. L. (1979) *DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model*. National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, MD.
- Froehlich, D. C. (1995) Peak outflow from breached embankment dam. *J. Water Resources Planning and Management*, 121(1), 90–97.
- Frey, H., W. Haeberli, A. Linsbauer, C. Huggel, and F. Paul (2010) A multi-level strategy for anticipating future glacial lake formation and associated hazard potentials. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 339–352.
- García, R., J.L. López, M.E. Noya, et al. (2003) Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela. *Third International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Davos, Switzerland.
- García, R., J.L. López, M.E. Noya, M.E. Bello, N. González, G. Paredes, and M.I. Vivas (2002) *Hazard maps for debris and debris flow events in Vargas State and Caracas*. Avila Project Report. Caracas, Venezuela, (In Spanish).
- Haeberli, W. (2013) Mountain permafrost — research frontiers and a special long-term challenge. *Cold Regions Science and Technology* 96: 71–76.
- Haeberli, W., J. Noetzli, L. Arenson, R. Delaloye, I. Gärtner-Roer, S. Gruber, K. Isaksen, C. Kneisel, M. Krautblatter, M. Phillips (2010) Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology* 56 (200), 1043–1058 (special issue).
- Hamandawana, H., F. Eckardt, and S. Ringrose (2006) The Use of Step-wise Density Slicing in Classifying High-resolution Panchromatic Photographs. *International Journal of Remote Sensing* 27:4923–4942.
- Hegglin, E., and C. Huggel (2008) An integrated assessment of vulnerability to glacial hazards. *Mountain Research and Development*, 28, 299–309.
- Heller, V., W. H. Hager, and H. E. Minor (2009) *Landslide generated impulse waves in reservoirs—Basics and computation*. VAW-Mitteilung, Vol. 211, R. Boes, ed., ETH Zurich, Zurich.
- Horizons - Horizons South America S.A.C. (2013) *Informe Técnico del Proyecto, Consultoría Para El Levantamiento Fotogramétrico Detallado De La Sub Cuenca Del Río Quillcay Y La Ciudad De Huaraz Para El Proyecto, Implementación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático y Gestión de Riesgos en la Subcuenca Quillcay (IMACC-QUILLCAY) - BID-MINAM (PE-T 1168)*, Ministerio Del Ambiente A Travel Del Fonam – Administrador De Los Recursos Del BID, Lima, Peru.
- Hossain, A.K.M.A., Y. Jia, and X. Chao (2009) Estimation of Manning's Roughness Coefficient Distribution for Hydrodynamic Model Using Remotely Sensed Land Cover Features. 2009 17th International Conference on Geoinformatics. IEEE, pp. 1–4.
- Huggel, C., N. Salzmann, S. Allen, J. Caplan-Auerbach, L. Fischer, W. Haeberli, C. Larsen, D. Schneider, R. Wessels (2010) Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 368, 2435–2459.
- Instituto Nacional de Defensa Civil. (2011) *Informe de peligro N° 003-12/05/2011/COEN-SINADECI/15:00 horas (Informe N° 01): Peligro por aluvión en el departamento de Ancash*. Huaraz-Perú: COEN-SINADECI.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report -Working Group I contribution to the IPCC 5th Assessment*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Julien, P. Y. (2010) *Erosion and Sedimentation*, second edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Julien, P. Y. and C. A. Leon (2000) Debrisfloods and Debris Flows Classification, Rheology and Structural Design. In *Invited paper at the International Workshop on Mudflows and debris flows*, Caracas, Venezuela, November 27- December 1.

- Kattleman, R. (2003) Glacial Lake Outburst Floods in the Nepal Himalaya: A Manageable Hazard? *Natural Hazards* 28: 145–154.
- Laenen, A., K. M. Scott, J. E. Costa, L. L. Orzol (1987) Hydrologic hazards along Squaw Creek from a hypothetical failure of the glacial moraine impounding Carver Lake near Sisters, Oregon. *U.S. Geological Survey, Open-File Report* 87-41.
- National Institute of Civil Defense of Peru (2011) *Report of Hazard* 003-12/05/2011. Lima.
- MacDonald, T. C. and J. Langridge-Monopolis (1984) Breaching characteristics of dam failures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(5), 567-586.
- O'Brien, J.S. (2003) *FLO-2D User's Manual (Version 2003.06)*, FLO-2D, Nutrioso, AZ
- O'Connor, J. E., J. H. Hardison III, J. E. Costa (2001) Debris Flows from Failures of Neoglacial-Age Moraine Dams in the Three Sisters and Mount Jefferson Wilderness Areas, Oregon. *U.S. Geological Survey professional paper*, (1606).
- OFEE, OFAT, ODEFP (Switzerland) Ed. (1997) *Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*, (OFEE), (OFAT), (OFEPF), Bienne.
- Peng, M., L. M. Zhang (2012) Breaching parameters of landslide dams. *Landslides* 9:13–31.
- Portocarrero, C. (2014) *The Glacial Lake Handbook: Reducing Risk from Dangerous Glacial Lakes in the Cordillera Blanca, Peru*, United States Agency for International Development, Washington, DC.
- Raetzo, H. Raetzo, O. Lateltin, D. Bollinger, J. Tripet (2002) Hazard assessment in Switzerland – Codes of Practice for mass movements, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 61(3), 263–268.
- Richardson, S. D. and J.M. Reynolds (2000) An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65/66, 31–47.
- Rickenmann, D. (1999) Empirical Relationships for Debris Flows. *Natural Hazards*, 19, 47–77.
- Rivas, D., D. McKinney, B. Hodges (2014) Predicting outflow induced by dam moraine failure in glacial lakes: the Lake Palcacocha case from an uncertainty perspective. *J. of Hydrology* (in review).
- Rosenzweig C, G Casassa, DJ Karoly, A Imeson, C Liu, A Menzel, S Rawlins, TL Root, B Seguin, P Tryjanowski (2007) Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 79–131.
- Rouse, J.W., D.W. Deering, and J.A. Schell (1973) *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (green Wave Effect) on Natural Vegetation*. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- Schneider, D., C. Huggel, A. Cochachin, S. Guillén, J. García (2014) Mapping hazards from glacial lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Adv. Geosci.*, 35, 145–155, 2014.
- UGRH – Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (2009) Autoridad Nacional de Agua (ANA) de Perú.
- UGRH – Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (2010) *Área de Inventario de Glaciares y Lagunas, Autoridad Nacional del Agua*, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, Huaraz.
- Walder, J. S., J. E. O'Connor (1997) Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. *Water Resour. Res.* 33(10): 2337-2348.
- WGMS – World Glacier Monitoring Service (2012) *Fluctuations of Glaciers 2005-2010 (Vol. X)*. Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S.U., Hoelzle, M., Paul, F. and W. Haeberli (eds.), ICSU (WDS) / IUGG (IACS) / UNEP / UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland: 336 pp. Publication based on database version: doi: 10.5904/wgms-fog-2012-11.
- Xu, Y., L. M. Zhang (2009) Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2009.135:1957-1970.

NOTA DEL EDITOR

Este documento fue presentado en marzo 2014 en varias reuniones en Lima y Huaraz a un conjunto de técnicos de las instituciones relacionadas con la gestión de riesgos, principalmente INDECI y CENEPRED, así como a otras instituciones técnico – científicas involucradas que conforman la Mesa de Palcacocha de la Presidencia de Consejo de Ministros: DGCCDRH-MINAM, MEF, ANA, SENAMHI, IGP, INGEMMET, DGOT-MINAM, Gobierno Regional de Ancash, Mancomunidad Municipal Waraq, Municipalidades de Huaraz e Independencia, Parque Nacional Huascarán-SERNANP, resultando de su evaluación algunas conclusiones y recomendaciones:

- No existen estudios geofísicos y geotécnicos de la morrena terminal de la Laguna Palcacocha. Luego de la batimetría realizada en 2009 (Unidad de Glaciología y RRHH – ANA), sólo se cuenta con el Informe Técnico N°A6631 publicado por INGEMMET en 2013, en el que se presentan los resultados de los sondeos mediante GPR practicados a las morrenas laterales de Palcacocha hasta una profundidad de 20 metros, sin que se observe la existencia de la roca madre, y el Informe Técnico Colegiado de julio 2013, coordinado por la Autoridad Local del Agua Huaraz.
- El proyecto IMACC ha solicitado colaboración institucional para ejecutar el estudio geofísico de la morrena terminal, para lo cual ha preparado unos términos de referencia.
- Los estudios faltantes se encuentran contemplados en el proyecto de prevención definitivo, cuyo perfil está siendo elaborado por el Gobierno Regional de Ancash.
- El presente estudio de modelamiento solo consideró el peligro de avalancha por desprendimiento de roca y hielo. Sin embargo no se descarta que la laguna pueda desbordarse por un movimiento sísmico debido a la existencia de la falla activa de la Cordillera Blanca, tal como lo señala el Informe Colegiado de julio 2013.
- El modelamiento se realizó con los resultados de un levantamiento fotogramétrico y LIDAR con resolución de menos de un metro, lo que genera una alta confiabilidad de la información de este modelamiento. En este sentido, el modelo validado por las instituciones técnicas correspondientes podría ser un instrumento de planificación y gestión de riesgos con el cual las autoridades de Huaraz e Independencia puedan implementar medidas para disminuir el riesgo de un aluvión en esta zona. Asimismo, podría servir de base para actualizar el mapa de peligros elaborado por el Programa “Ciudades Sostenibles” en el 2003.

Huaraz y Lima, mayo 2014

MODELO DE INUNDACIÓN POR POTENCIAL ALUVIÓN DESDE LA LAGUNA PALCACOCHA, HUARAZ, PERÚ

