

## MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DE LAHARES EN EL VOLCÁN VILLARRICA, CHILE.

*Daniel Navarro.<sup>1</sup>, Diego Caamaño A.<sup>2</sup> y Robert King<sup>3</sup>*

### RESUMEN:

El volcán Villarrica es un estratovolcán perteneciente a la Zona Volcánica Sur (ZVS) y considerado uno de los más activos en ella. Sólo en el siglo XX se registraron 8 erupciones de gran magnitud siendo la del año 1971 la última actividad importante de ese siglo. Este evento provocó la fusión entre el material candente y la nieve disponible en la cima del volcán dando origen a siete lahares que se desplazaron ladera abajo en diferentes direcciones. Este fenómeno natural se ha manifestado comúnmente en este macizo eruptivo y conlleva un alto nivel de riesgo a los poblados que lo rodean tal cual se indica en el Mapa de Riesgo Volcánico SERNAGEOMIN elaborado el año 2000.

Este estudio considera la modelación numérica de 2 de los 7 lahares generados por la erupción del volcán Villarrica el año 1971, y que ocurrieron en el sector poniente de Pucón, en los Cauces de los Ríos Pedregoso y Turbio. El software utilizado fue HEC-RAS 5.0.3, que incorpora una componente de cálculo bidimensional e incluye una interfaz de trabajo compatible con un modelo de elevación digital (DEM).

Para la simulación del lahar, se consideró un rompimiento de una presa ubicada en la isoterma cero, y dividiendo el dominio de modelación en dos áreas; a) el reservorio aguas arriba de la estructura que representa el volumen de nieve derretido por la erupción, y b) la zona de escurrimiento que obedece a la ladera del volcán y al valle por el cual se espera la trayectoria del flujo lahárico.

La modelación se calibró caracterizando a) el caudal máximo generado en los eventos mediante el método teórico descrito en Misuyama et al. (1992), y b) la delimitación de la zona de inundación del evento en estudio sobre la base de información obtenida de fotografías aéreas.

Los resultados muestran que el sector sureste del poblado actual de Pucón sería afectado por flujos laháricos en caso de producirse un evento de las mismas características a las ocurridas el año 1971. Además, el software indicó velocidades de hasta 30m/s en la ladera del volcán atenuándose éstas a su llegada al valle presentando magnitudes inferiores a 5m/s en las cercanías del lago Villarrica. Así mismo, las profundidades de los flujos modelados fluctúan entre 8 y 12m.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [dnavarro@ing.ucsc.cl](mailto:dnavarro@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [dcaamano@ucsc.cl](mailto:dcaamano@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

**ABSTRACT:**

The Villarrica volcano is a stratovolcano belonging to the South Volcanic Zone (ZVS) and is considered as one of the most active volcanoes. Only in the XX century 8 eruptions of great magnitude were recorded, with the 1971 eruption being the last vigorous activity of that century and also caused the melting of the available snow on the top of the volcano, generating lahars which moved downhill causing great damage in its paths. This natural phenomenon has commonly manifested itself on this eruptive massif and carries a high level of risk to the surrounding populations (Mapa de Riesgo Volcánico SERNAGEOMIN, 2000).

In this study, 2 of the 7 lahars generated by the 1971 Villarrica volcanic eruption were modeled. in, Both occur in the western sector of Pucón, in the streams of the Pedregoso and Turbio Rivers. The software used was HEC-RAS 5.0.3 (Beta version), which incorporates a two-dimensional calculation component and includes a working interface compatible with a digital elevation model (DEM).

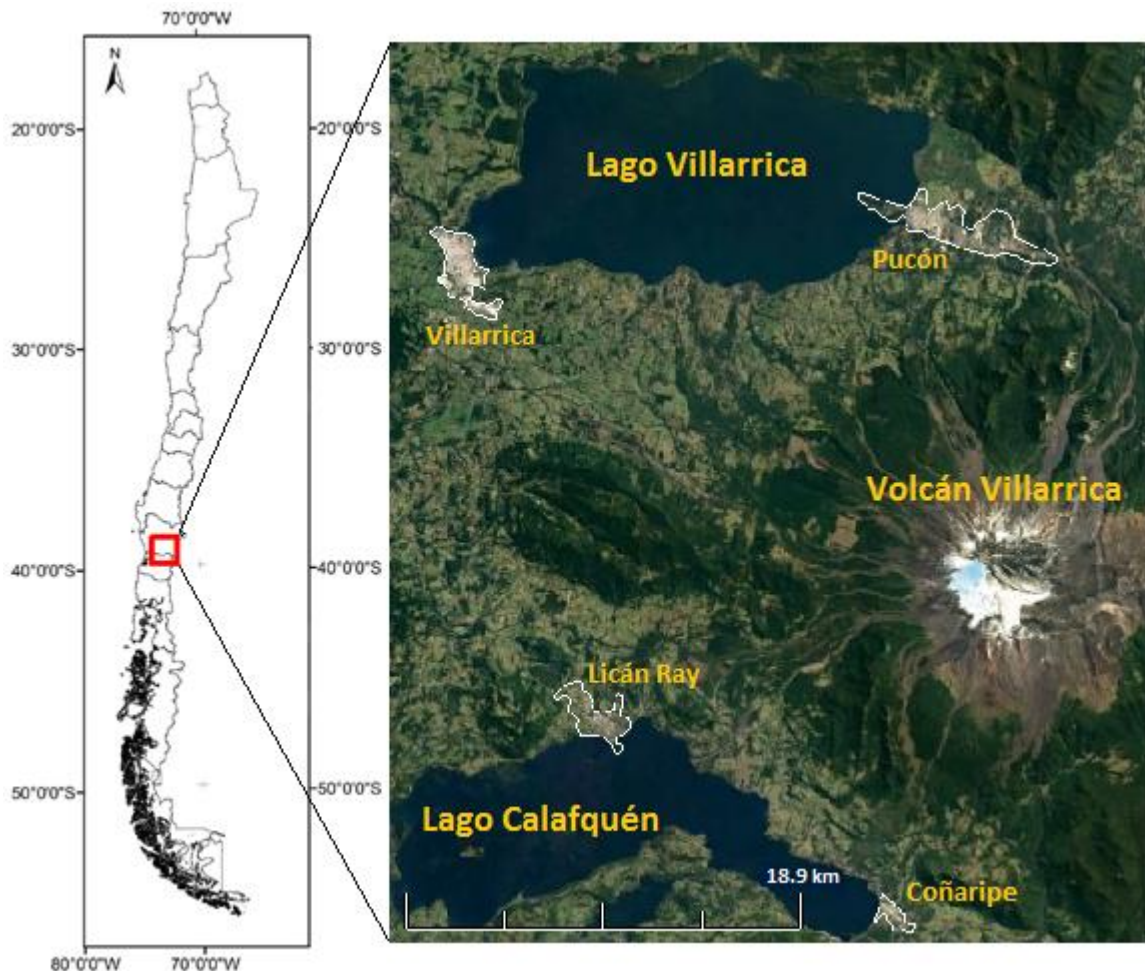
For the lahar simulation, a rupture of a hydraulic structure (i.e dam) located in the zero isotherm was considered, connecting it with 2 areas; one upstream of the structure representing the reservoir and another downstream to perform the flow-defining hydraulic calculation.

The modeling was calibrated using as reference the theoretical maximum flow rate of  $9789\text{m}^3/\text{s}$ , which was obtained by the method described in Misuyama et al. (1992) and that relates the volume with the maximum flow.

The results show that the southeastern sector of the current town of Pucón would be affected by lahar flows in the occurrence of an event of the same characteristics as those occurred in 1971. In addition, the software has estimated speeds of up to 30m/s on the hillside of the volcano attenuating to its arrival to the valley with magnitudes that do not surpass 5m/s when approaching the Villarrica lake. Likewise, the depths in the greater part of both channels border the 8 to 12m.

## 1. INTRODUCCIÓN

El volcán Villarrica ( $39.4208^{\circ}$  S,  $71.9392^{\circ}$  W) corresponde a un estratovolcán de 2847 msnm. Se encuentra situado en el límite de las provincias de Cautín, región de la Araucanía, y Valdivia Región de Los Ríos, Chile (Figura 1).

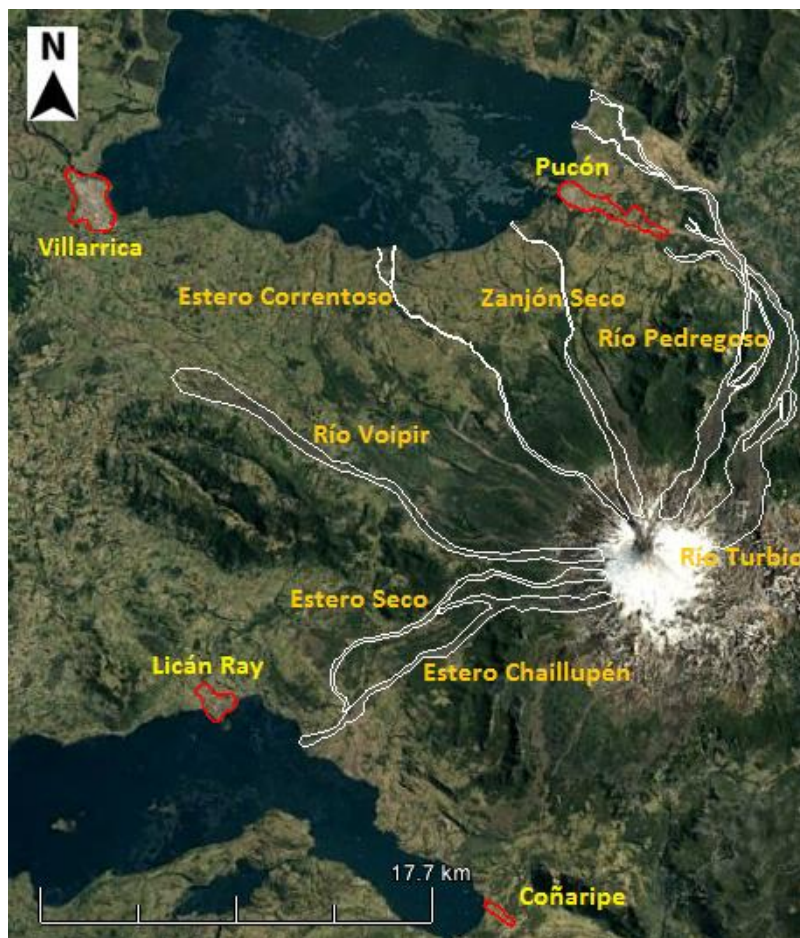


**Figura 1:** Mapa de ubicación nacional e imagen satelital del volcán Villarrica año 2006. (Modificada de Google Earth).

El volcán se ubica Cerca de varios poblados, por ejemplo, a 28.5km de la ciudad de Villarrica, a 16km de Pucón, a 20km de Licán Ray y a 18km de Coñaripe (Figura 1); además de otras localidades de menor envergadura, que también se ven amenazadas por el volcán.

La torre eruptiva del volcán Villarrica posee registros documentados de 59 lahares desde 1558 hasta 1984, convirtiéndolo en el volcán más activo de los Andes (Petit-Breuilh y Lobato, 1994). Una de las erupciones generadoras de lahares más importantes en el siglo XX es la ocurrida en el año 1971 (Castruccio et al, 2005).

A las 23:45 horas del 29 de diciembre de 1971, culminó la fase efusiva del volcán Villarrica iniciada el 29 de octubre de ese año. Comenzando el ciclo eruptivo con la apertura de 2 fisuras de 4 km cada una, provocando la inyección de cortinas Hawaianas de lava (Proyecto Observación Visual Volcán Villarrica, 2008). Se produce con ello la fusión inmediata del casquete de hielo y nieve, generando 7 flujos laháricos alrededor de las 4:00 horas. Las áreas inundadas de cada uno los lahares generados se pueden identificar en la imagen satelital del año 1984 (Figura 2). Los eventos laháricos causaron destrucciones de puentes, caminos, terrenos agrícolas y la muerte de al menos 15 personas.



**Figura 2:** Identificación de las zonas de inundación de los lahares generados en la erupción del año 1971. (Modificada de Google Earth).

Se analizarán dos flujos laháricos generados en el evento de 1971, y que corresponden a los dos más cercanos a la ciudad de Pucón, ocurridos en los cauces de los Ríos Pedregoso y Turbio (i.e. ladera Norte-Este).

Según Naranjo y Moreno (2004), la erupción de 1971 produjo caudales de 10.000 a 20.000 m<sup>3</sup>/s. Los flujos fueron voluminosos en los Ríos Turbio y Pedregoso, con profundidades que sobrepasaron los 10m de alto, y con una velocidad promedio de 10m/s. Un efecto claro de éstos dos flujos fue la destrucción del puente Turbio construido de concreto reforzado y con una altura de 10m, emplazado a un kilómetro aguas abajo de la confluencia de los Ríos Pedregoso y Turbio como parte integral del camino internacional de la Ruta 199.

La simulación numérica se realizó con la herramienta HEC-RAS 5.0.3 (versión Beta). Este software, fue creado por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa de los Estados Unidos (U.S. Army corps of Engineers) y recientemente incluye una componente de cálculo Bidimensional (HEC-RAS 5.0 2D Modeling Users Manual).

HEC-RAS ha sido diseñado para representar el comportamiento de escurrimientos en sistemas abiertos (i.e. forzados por la gravedad) y de características hidrostáticas (i.e. componentes de aceleración vertical despreciables). Es decir, es una herramienta pensada y diseñada para ser aplicada en ríos de pendientes de hasta 10%. En este estudio se pretende determinar si la herramienta, a pesar de las limitaciones antes descritas, es capaz aproximar un flujo lahárico a través de simular el derretimiento de nieve por medio de un rompimiento de una estructura hidráulica (i.e. presa) situada en la isoterma cero.

Los resultados esperados consisten en la determinación de las zonas de inundación, y las velocidades y profundidades del escurrimiento.

## 2. MÉTODO

Los volúmenes de ambos lahares fueron estimados en el trabajo realizado por Naranjo y Moreno (2004), y cuyas magnitudes se representan en la Tabla 1. Éstos se calcularon por medio del método descrito en Misuyama et al. (1992) y que relaciona el volumen de nieve derretido con el caudal máximo generado por cada uno de los lahares ( $Q_m$ ), considerando un 66% de sólidos (ecuación 1).

**Tabla 1:** Volúmenes considerados para la simulación.

Cauce	Evento	Volumen ( $10^6$ ) [m <sup>3</sup> ]	Fuente
Río Pedregoso	1971	32.6	Naranjo y Moreno (2004)
Río Turbio	1971	32.6	Naranjo y moreno (2004)

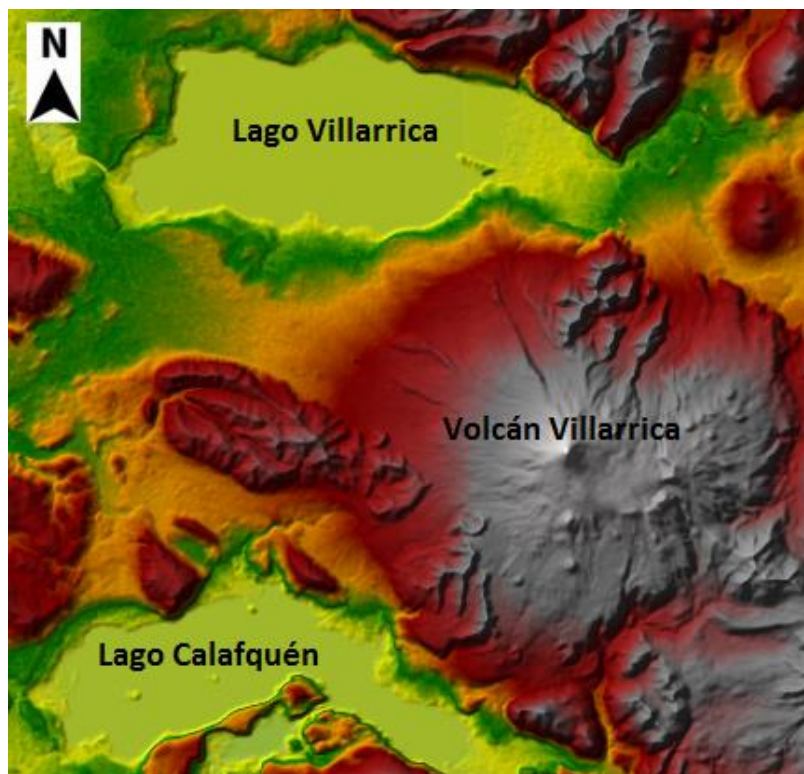
$$Q_m = 0,0135 \cdot Volumen^{0,78} \quad (1)$$

En la tabla 2, se muestran los caudales máximos que la teoría indica alcanzaron ambos lahares en estudio;

**Tabla 2:** Caudales máximos teóricos obtenidos de la ecuación 1.

Cauce	Caudal máximo [m <sup>3</sup> /s]
Río Pedregoso	9787
Río Turbio	9787

El Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizado posee una resolución de 30m por 30m, se obtuvo a partir de una imagen satelital ASTER proporcionada por la NASA, y; cuya descarga es gratuita desde [reverb.echo.nasa.gov](http://reverb.echo.nasa.gov). La Figura 3 muestra el DEM ya procesado a través de la interfaz gráfica disponible en la versión utilizada de HEC-RAS.

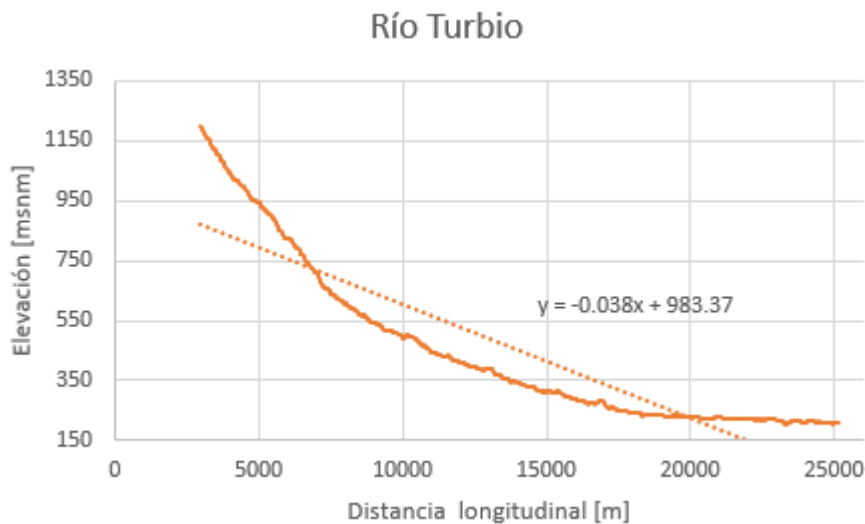


**Figura 3:** DEM de la zona de interés en la interfaz gráfica de HEC-RAS.

El rápido proceso de derretimiento que da origen a los lahares se representó en HEC-RAS 5.0.3 (versión Beta) a través de la simulación del rompimiento instantáneo de una presa que contenía un volumen equivalente al volumen derretido por el lahar. La base de la presa se ubicó en la isoterma cero, asumiendo que desde dicha cota el flujo corresponde a la entrada del agua derretida desde la parte superior del volcán. Consecuentemente se determinó que la altura de la isoterma cero varía entre 2100 y 1600 msnm considerando la variación de ésta entre los años 1984 y 2016. La información indicada se obtuvo de las imágenes disponibles en Google Earth y registradas en distintos periodos de cada año. Por lo tanto, para el caso del Río Turbio se definió en 1900 msnm de altura como el valor más representativo, y 150m más bajos se determinó la cota para la isoterma cero que alimentará el lahar en el Río Pedregoso (i.e. 1750 msnm). La estructura simulada (i.e. presa) conecta a dos áreas que en modelo ofrecen diferentes propósitos; a) zona aguas arriba de la presa y que representa el reservorio de nieve derretida indicados en la Tabla 1; y b) una segunda área correspondiente a la zona de escurrimiento ubicada aguas abajo de la estructura (i.e. que define la trayectoria del flujo).

HEC-RAS posee un set limitado de parámetros para la calibración siendo la respuesta mucho más sensible al valor de la rugosidad definido por el parámetro “n” de Manning. En la literatura se encuentra una extensa variedad de valores de n (Roughness Characteristics of Natural Channels, 1967). En este estudio se adoptaron los valores de rugosidad correspondientes a cauces en laderas sin vegetación y con pendientes pronunciadas (i.e. n varía entre 0.03 y 0.1). Con respecto a las laderas del volcán se fijaron valores correspondientes a 0.04 que fue el valor representativo considerado para ambos cauces.

Debido que no se conoce a priori la distancia que alcanzará el flujo del lahar (i.e. por ejemplo, si alcanza el lago o no), se utilizará altura normal de escurrimiento como condición de borde en la última sección de aguas abajo. Para ello se precisa estimar la pendiente longitudinal del cauce. Consecuentemente, se utilizó el software de posicionamiento global Global Mapper, y se realizaron perfiles longitudinales para caracterizar la pendiente media del valle comenzando desde la cota 1200 msnm hasta el Lago Villarrica (i.e. 209 msnm). La figura 4 muestra el caso realizado para el Río Turbio y la tabla 3 el resumen de los resultados para ambos cauces.

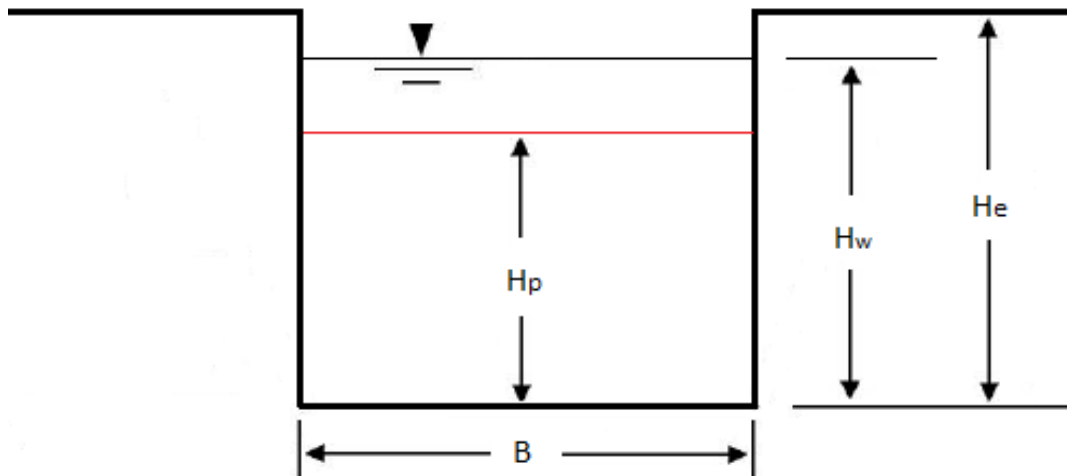


**Figura 4:** Perfil longitudinal del Río Turbio en el valle.

**Tabla 3:** Pendiente de los lahares en el valle.

Cauce	Pendiente
Río Turbio	0.038
Río Pedregoso	0.042

Para el rompimiento de presa se asignaron parámetros a la estructura, los que se muestran en la **figura 5**. Posteriormente, en la tabla 4 se muestran los valores de dichos parámetros.



**Figura 5:** Descripción de los parámetros de la brecha de rotura en la presa.

**Tabla 4:** Valores de los parámetros de la brecha de rotura en la presa utilizados en ambos modelos.

	Río Pedregoso	Río Turbio
B (m)	4	3
He (msnm)	2150	2220
Hw (msnm)	1895	2127
Hp (msnm)	1830	1950

Dónde:

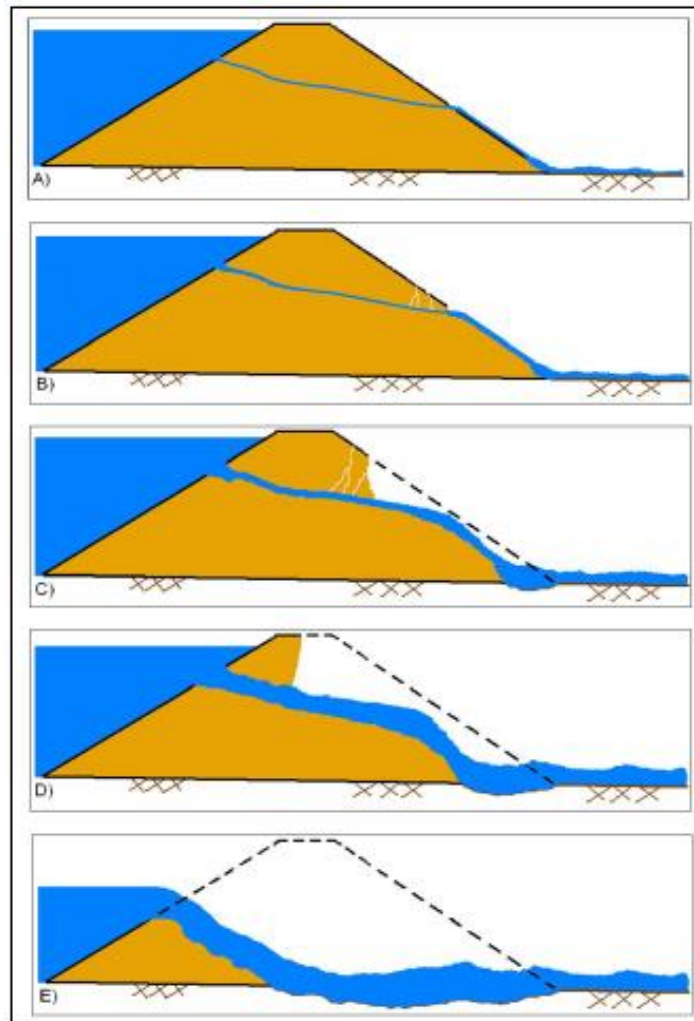
B= Ancho de la brecha.

He= Altura de la estructura.

Hw= Altura de agua que contiene el embalse.

Hp= Altura donde comienza a romperse la estructura.

HEC-RAS posee 2 métodos de rompimiento de presa; 1) el flujo sobrepasa la altura de la estructura antes de comenzar el rompimiento; y b) el flujo es contenido en su totalidad por la estructura (Figura 5), este último corresponde al método utilizado, principalmente por permitir encausar el flujo en un sector determinado y permite una calibración más simple del caudal máximo teórico (tabla 2). En la figura 6 se muestra el tipo de rompimiento utilizado para ambos modelos.



**Figura 6:** Ejemplo del proceso de rompimiento tipo tubería. (HEC-RAS 5.0 Reference manual).

La estabilidad y precisión de la simulación se logra seleccionando un paso de tiempo computacional adecuado, para ello se utilizó la condición de Courant, cuyo método se describe en la ecuación 2;

$$C = V_w * \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2)$$

Dónde:

$C$  = Número de Courant.

$V_w$  = Velocidad máxima de la onda de inundación (m/s).

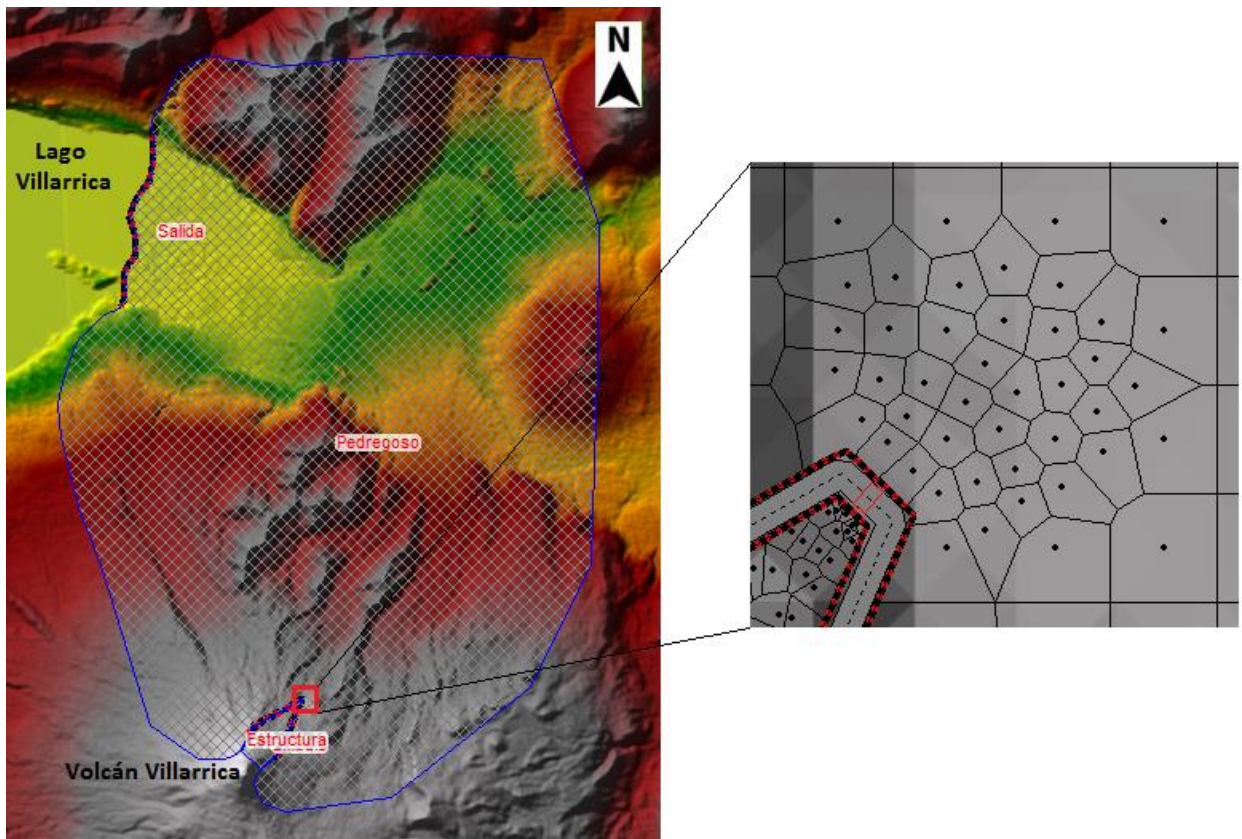
$\Delta t$  = Tiempo computacional (s).

$\Delta x$  = Distancia entre cuadrículas (m).

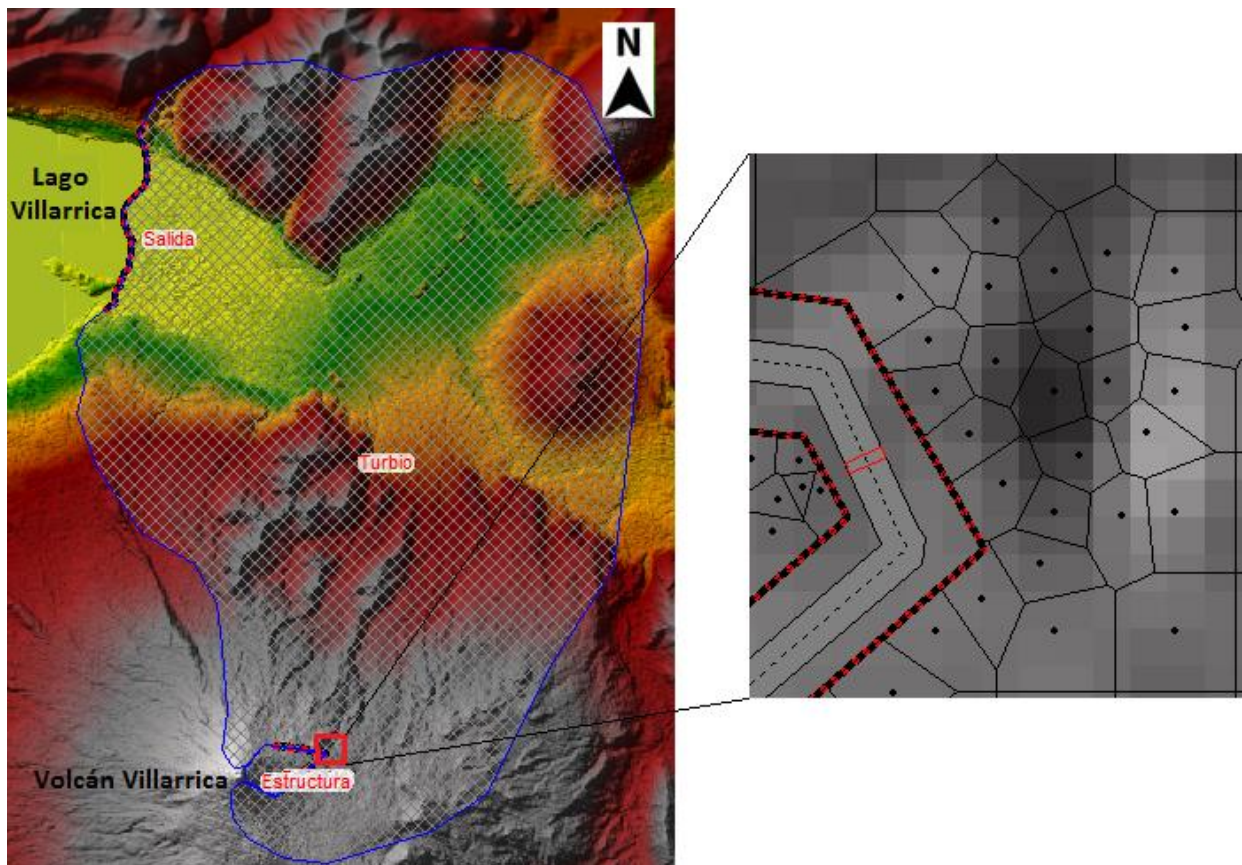
El valor óptimo que se recomienda para el número adimensional  $C$  es menor o igual a 1. Luego, la ecuación 2 puede reescribirse de la siguiente forma;

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_w} \quad (3)$$

Entonces, se generó la discretización espacial del dominio a través de una malla de elementos hexagonales. Se realizó un análisis de sensibilidad considerando diferentes tamaños de malla para el Río Pedregoso de 15m por 15m y 45m por 45m. En la figura 7 y 8 se muestran las mallas para ambos cauces.



**Figura 7:** Malla 30m por 30m utilizada en Río Pedregoso.



**Figura 8:** Malla 30m por 30m utilizada en Río Turbio.

En la modelación se impuso que se resolviera la Ecuación de Onda Dinámica 2D por sobre las ecuaciones de Onda Difusa 2D que trae por defecto, esto por tener mayor rango de aplicabilidad y obtener mejores resultados al modelar el rompimiento de una presa y los cambios de regimen. Ambas ecuaciones se resuelven mediante el algoritmo de Volúmenes Finitos Implícitos que puede manejar situaciones de flujo en regímenes Subcrítico, Supercrítico y Mixto de forma más estable. Las ecuaciones que resuelve HEC-RAS en su componente de cálculo bidimensional son similares a las que resuelve en 1D y corresponden principalmente a la Conservación de Masa (asume que el flujo es incompresible) y Momento (ambas direcciones longitudinal y transversal, x e y). Apreciables en las ecuaciones 4, 5 y 6.

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

La ecuación 4 es la expresión general de conservación de masa, Dónde t es el tiempo, u y v son las componentes en la dirección x e y respectivamente y q es un término que depende del tipo de flujo. (HEC-RAS 5.0 Reference Manual).

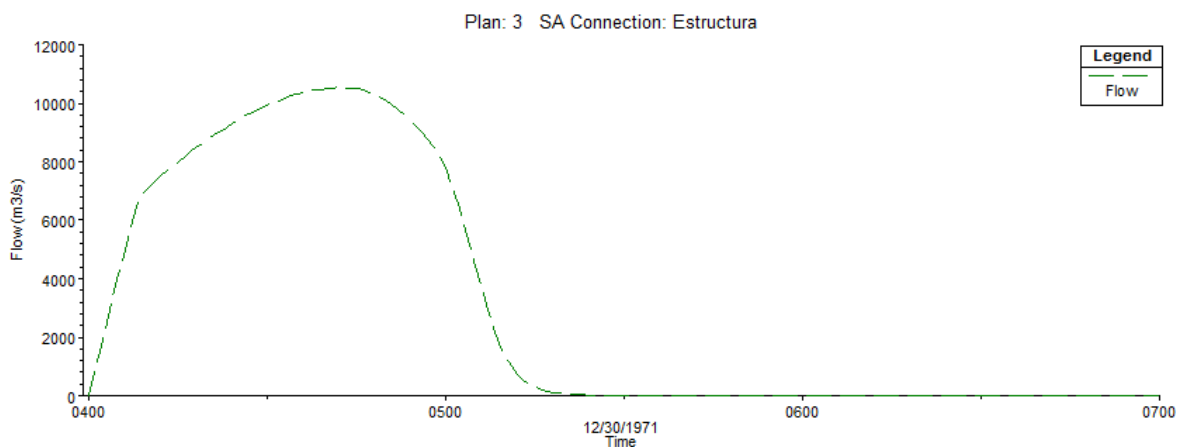
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (5)$$

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

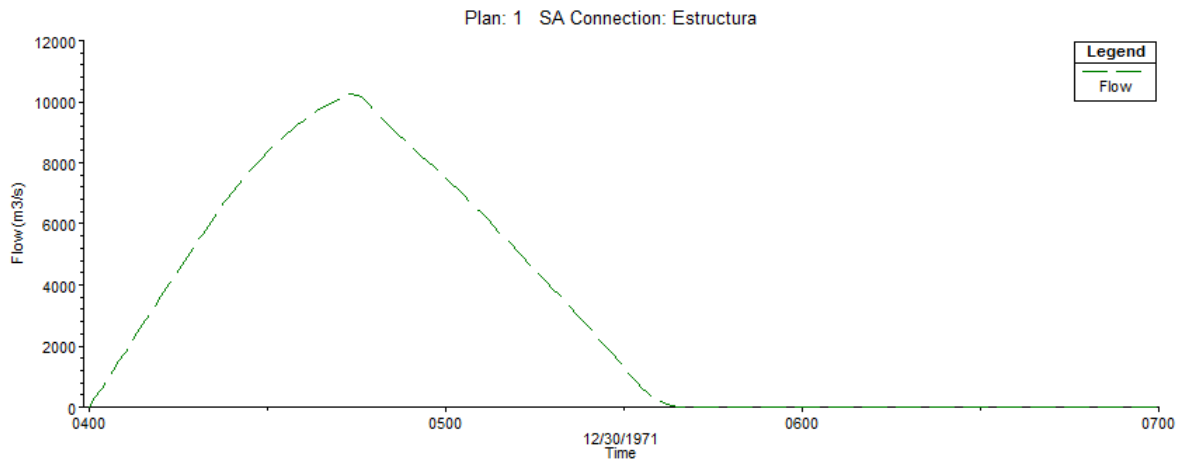
Las ecuaciones 5 y 6 corresponden a las expresiones generales de las ecuaciones de Momento en las direcciones x e y del plano cartesiano, respectivamente. Dónde u y v son las velocidades en las direcciones cartesianas, g es la aceleración de gravitatoria,  $v_t$  es el coeficiente de viscosidad horizontal,  $c_f$  es el coeficiente de fricción interna y f es el parámetro de Coriolis. (HEC-RAS 5.0 Reference Manual).

### 3. RESULTADOS

Puesto que a priori la velocidad máxima de la onda es desconocida, entonces para resolver la ecuación 3 se asumió un  $V_w$  igual a 30m/s y un  $\Delta x$  de 30m. Se obtiene al resolver la ecuación 3 un paso computacional  $\leq 1$  segundo, obteniéndose los hidrogramas de salida indicados en la Figura 9.



(a)

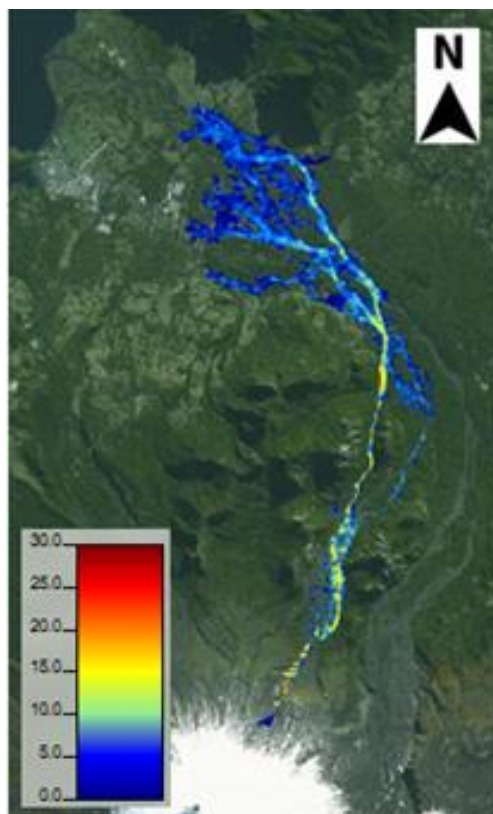


(b)

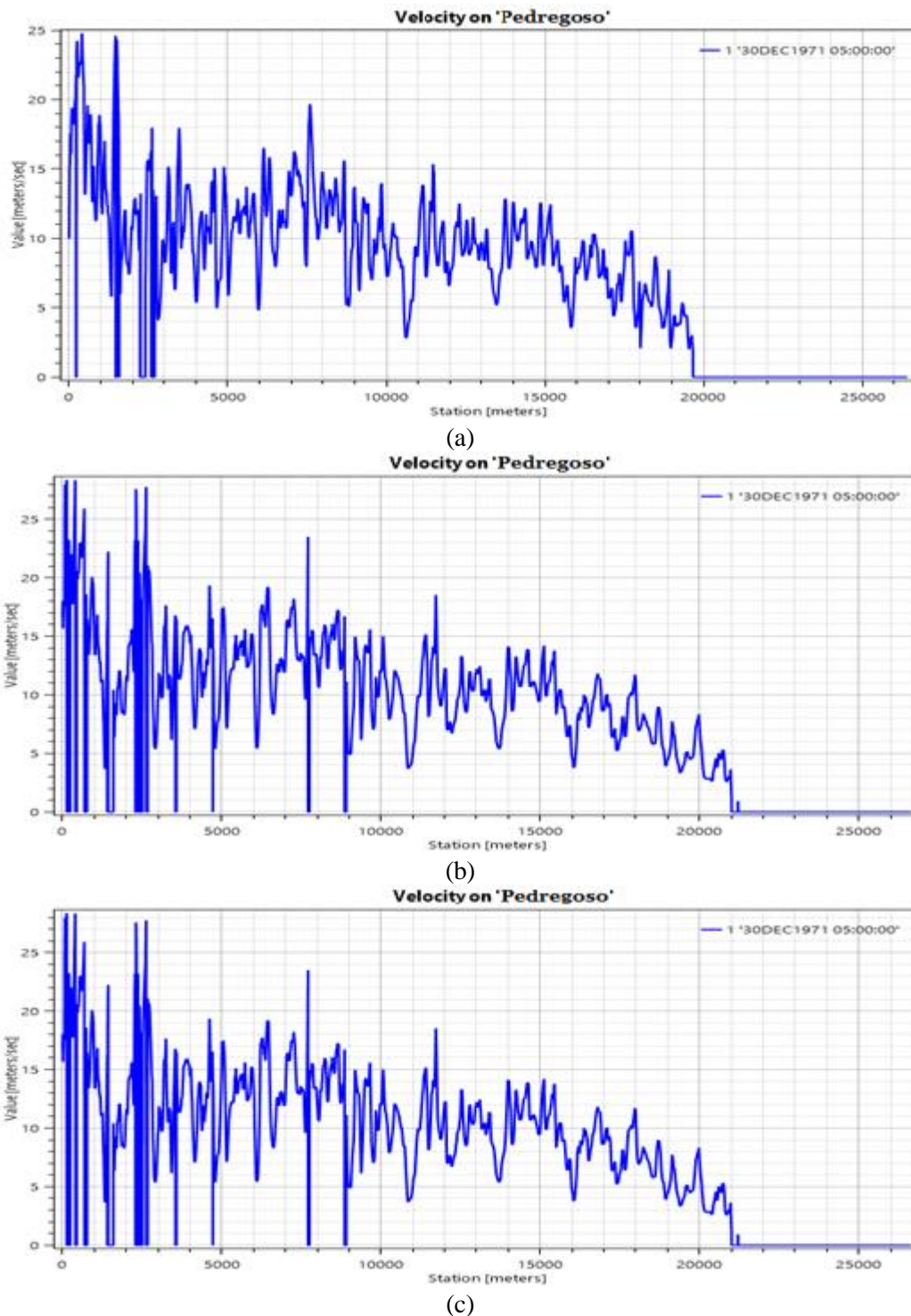
**Figura 9:** (a) Hidrograma Río Pedregoso. (b) Hidrograma Río Turbio.

La figura 9, muestra los hidrogramas para los cauces en estudio que han sido calibrados a través del caudal teórico, mostrado en tabla 2. Como la calibración se realizó a través de prueba y error se tuvo variables distintas para cada lahar, principalmente en el ancho de la abertura de la brecha como se muestra en tabla 4 y el tiempo de formación del mismo que para el caso del Río Pedregoso fue de 1 hora y para el Río Turbio de 1.5 horas.

Debido a que se utiliza un software que resuelve el flujo de manera dinámica entonces se muestran resultados en el tiempo más desfavorable, es decir, con las mayores velocidades y profundidades. En la figura 10 se muestra una vista en planta de las velocidades en el Río Pedregoso para la malla de 30m y en la figura 11 se aprecian las velocidades para la prueba de sensibilidad realizada a los distintos tamaños de la malla en el mismo cauce.



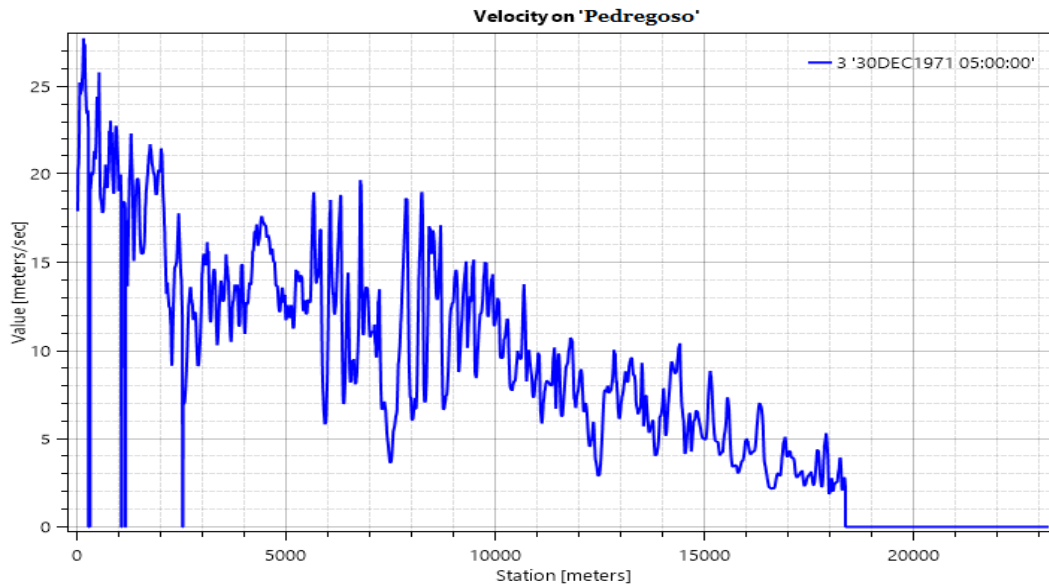
**Figura 10:** Vista en planta de velocidades en el Río Pedregoso después de 60 minutos de propagación, malla 30m estructurada con un tiempo computacional 1 segundo.



**Figura 11.** (a) Velocidades en Río Pedregoso después de 60 minutos de propagación, malla 15m estructurada con un paso computacional 1 segundo. (b) Velocidades en Río Pedregoso después de 60 minutos de Propagación, malla 30m estructurada con un paso computacional 1segundo. (c) Velocidades en Río Pedregoso después de 60 minutos de propagación, malla 45m estructurada con un paso computacional 1 segundo.

De la figura 11, se aprecia que el tiempo computacional recomendado por el método de Courant no logra eliminar las inestabilidades en la ladera del volcán en los primeros 10.000m. Por otro lado, de la misma figura se observa que disminuyendo el tamaño de la malla se reducen las inestabilidades.

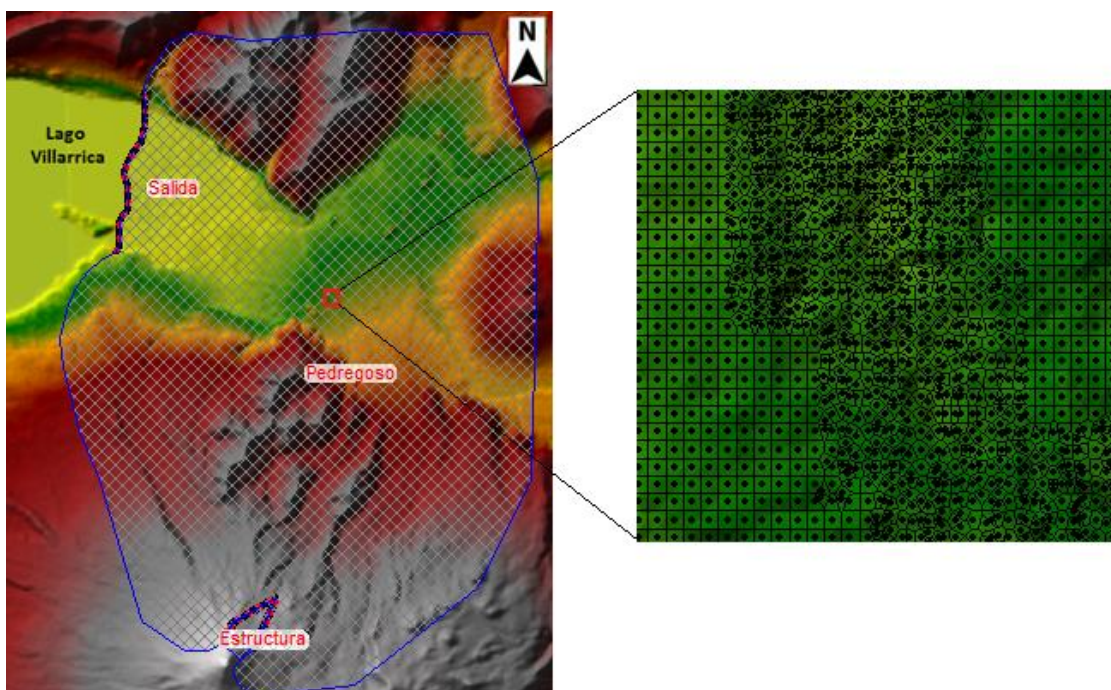
Con el fin de eliminar las inestabilidades que se muestran en la figura 11, se utilizó un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos para una malla estructurada 30m para el mismo cauce. El resultado del perfil longitudinal de velocidades se muestra en la figura 12.



**Figura 12:** Perfil de velocidad en el Río Pedregoso para una malla estructurada de 30m con un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos.

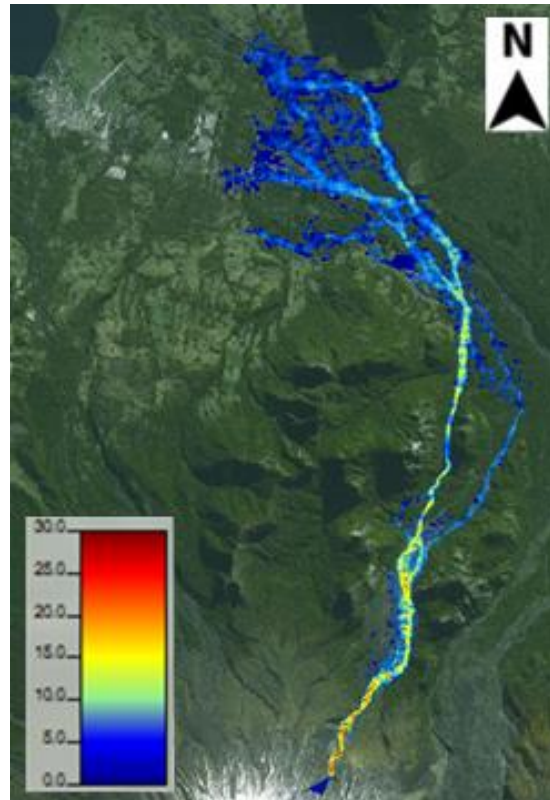
En la figura 12 se logra identificar que al disminuir de 1 segundo a 0.2 segundos el paso de tiempo computacional se disminuye considerablemente las inestabilidades que se apreciaban en la figura 11, aunque no se eliminan del todo.

Como aún se registran inestabilidades en el perfil de velocidad en el Río Pedregoso, se realizó una malla no estructurada en el área donde pasó el flujo en las modelaciones anteriores. Este refinado en la malla de 30m se efectuó para ambos cauces, es decir, para los Ríos Pedregoso y Turbio. En la figura 13 se ilustra un sector refinado para el Río Pedregoso.

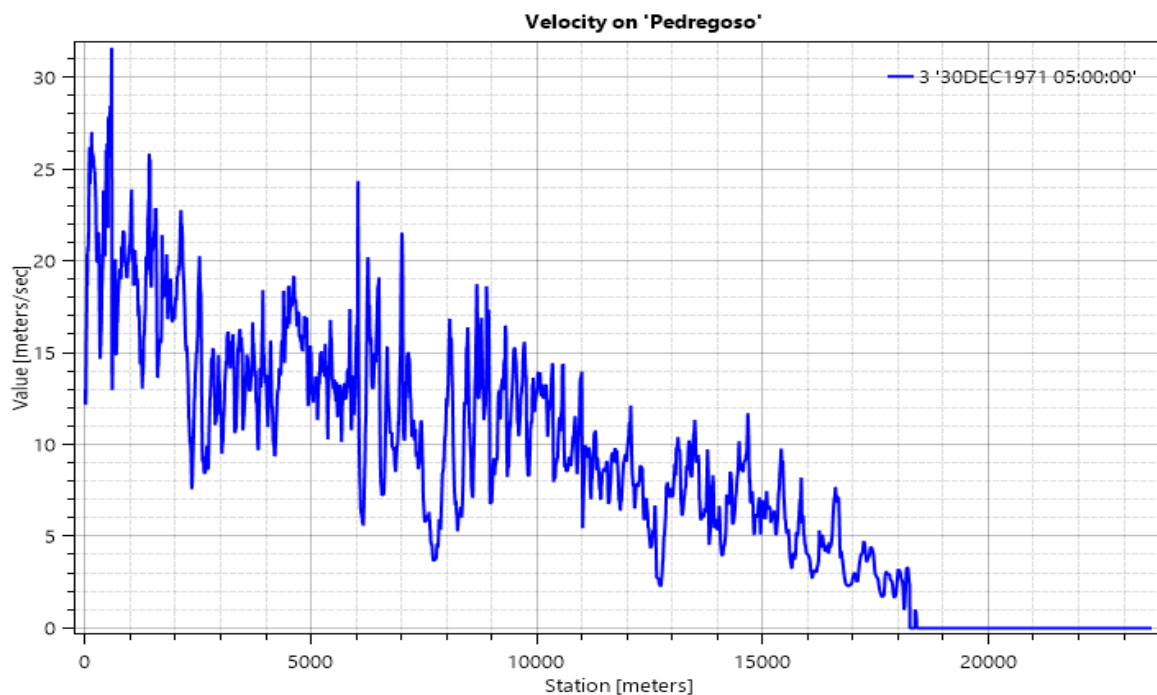


**Figura 13:** Malla no estructura en el área donde se estima que pasa el flujo en el Río Pedregoso.

De esta forma los modelos finales fueron realizados con una malla no estructurada con un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos para ambos lahares. En las figuras 14 y 15, respectivamente, se muestran las velocidades de los flujos en los Ríos Pedregoso y Turbio. Consecutivamente, en las figuras 16 y 17 se aprecian las profundidades de dichos flujos.

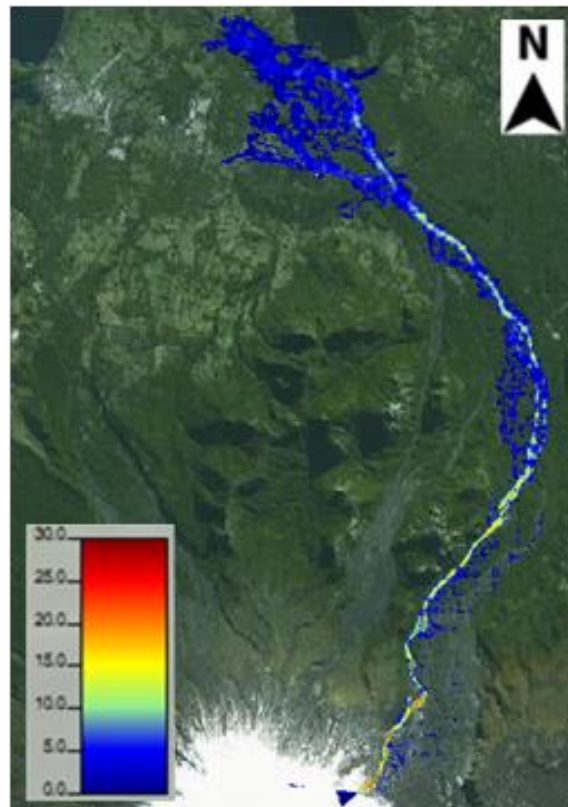


(a)

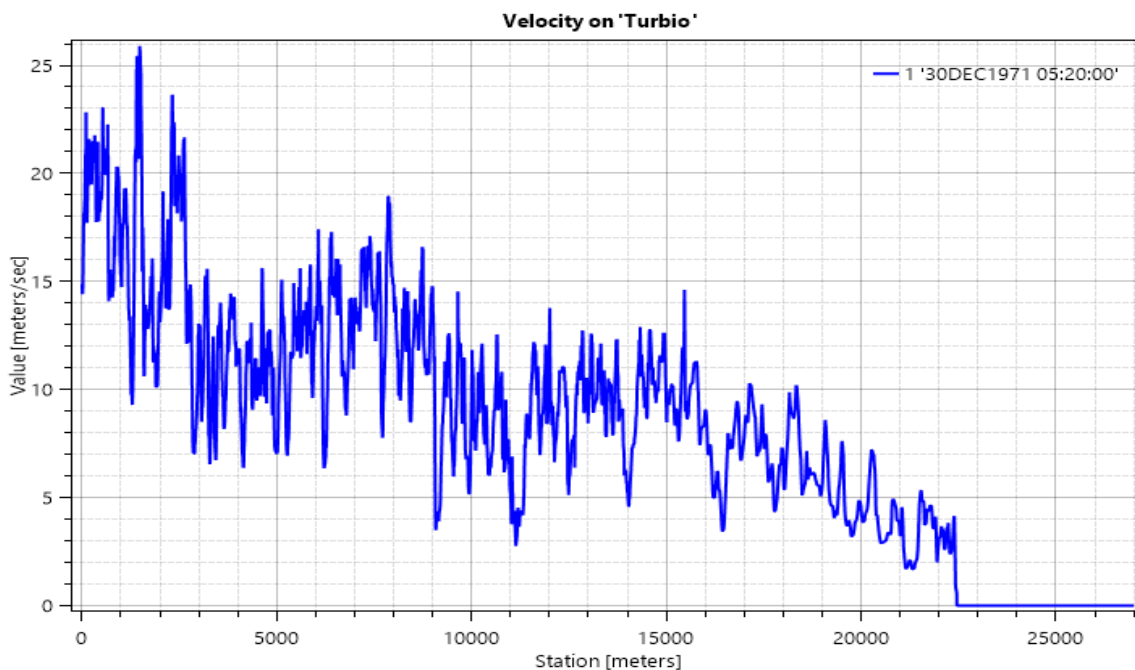


(b)

**Figura 14:** (a) Vista en planta de velocidades en el Río pedregoso después de 60 minutos de la propagación con una malla de 30m refinada y un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos.  
 (b) perfil longitudinal de velocidades en el Río pedregoso.



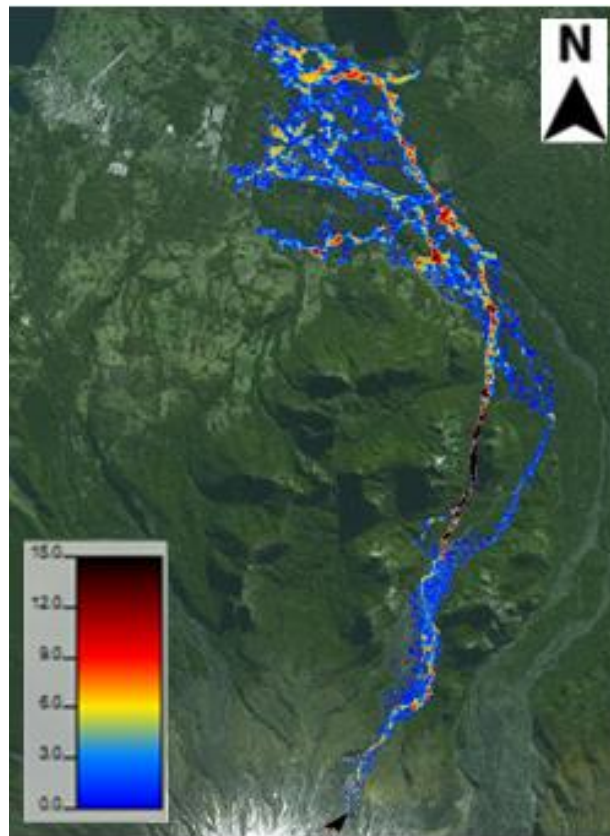
(a)



(b)

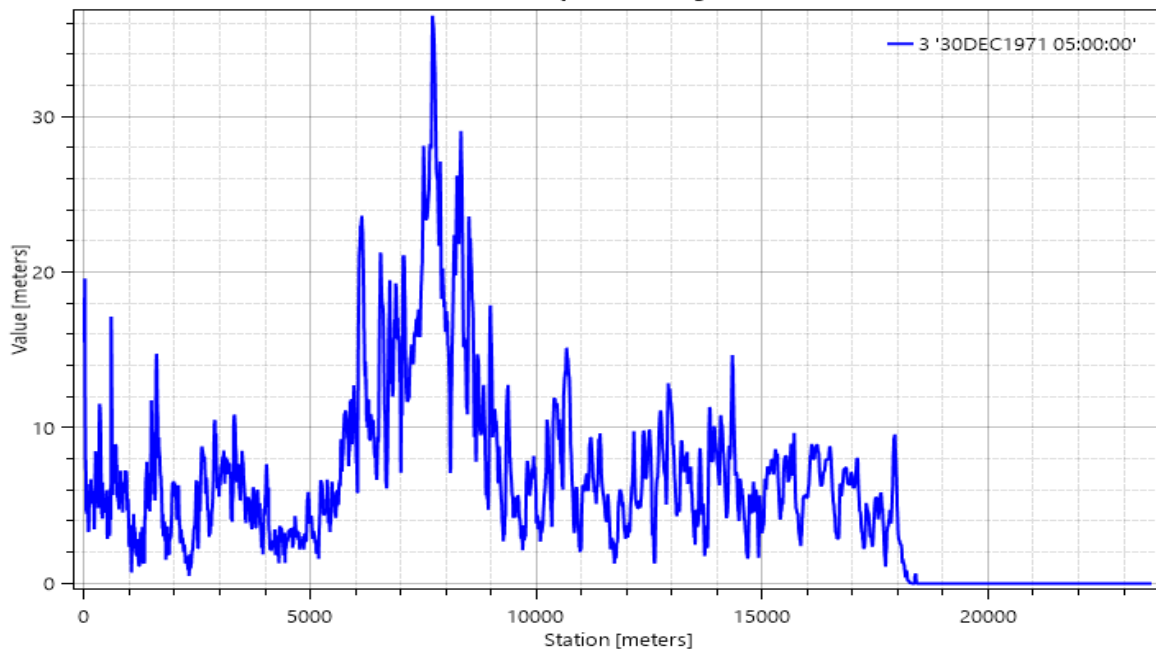
**Figura 15:** (a) Vista en planta de velocidades en el Río Turbio después de 80 minutos de la propagación con una malla 30m refinada y un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos.  
 (b) Perfil longitudinal de velocidades en el Río Turbio.

Los tiempos de viaje de los lahares muestran que el flujo en el Río Pedregoso llega al sector sureste de Pucón en 45 minutos y para el caso del Río Turbio en 67 minutos. Se debe considerar que la ubicación de la presa es diferente en su altitud para ambos modelos y el recorrido en la ladera del Río Turbio es mayor que en el Río Pedregoso.



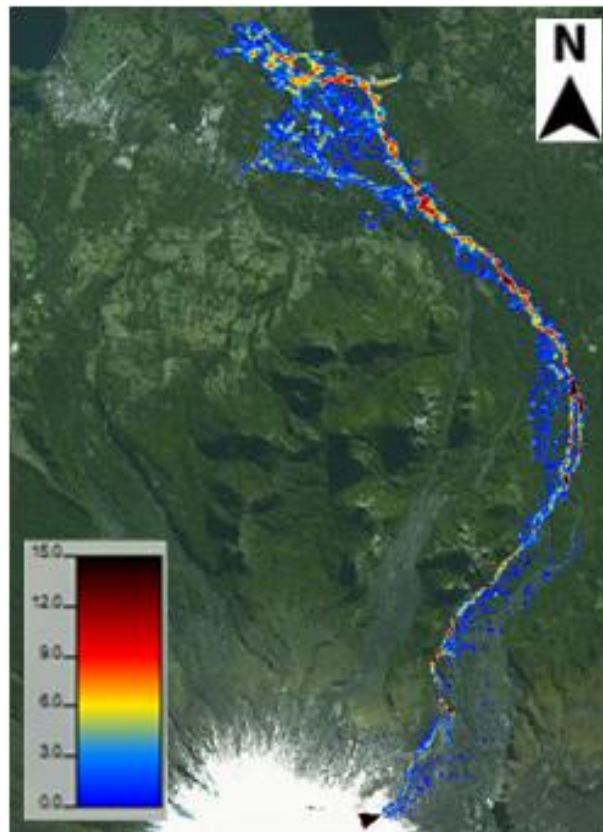
(a)

Depth on 'Pedregoso'

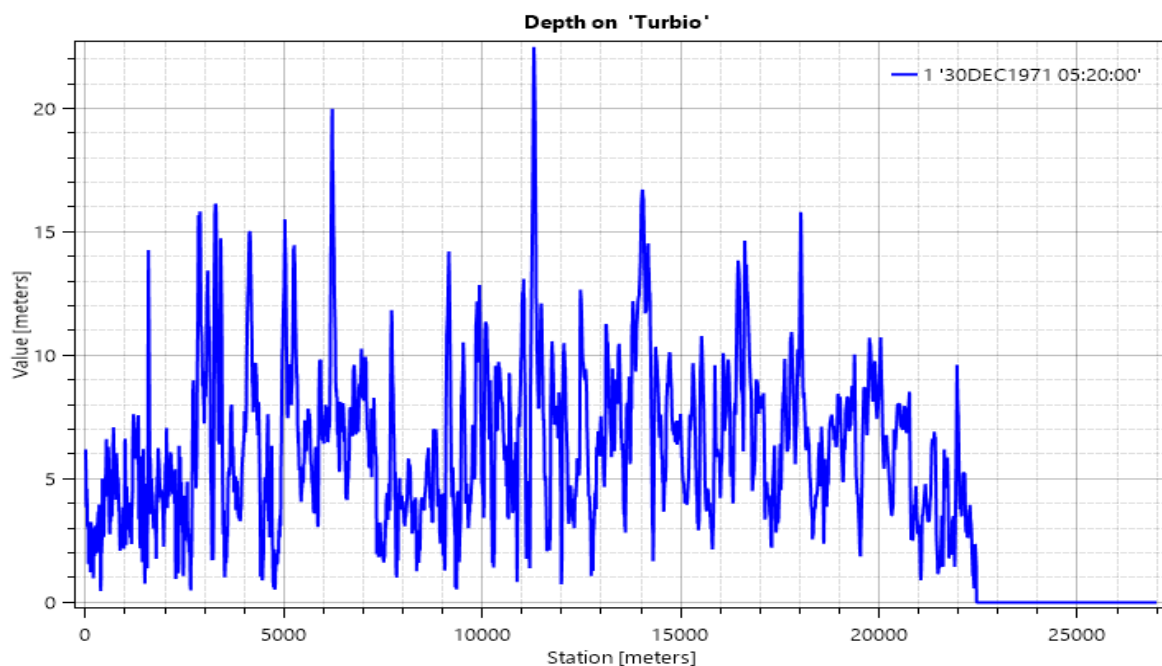


(b)

**Figura 16:** (a) Vista en planta de profundidades en el Río Pedregoso después de 60 minutos de la propagación con una malla de 30m refinada y un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos.  
(b) Perfil longitudinal de profundidades en el Río Pedregoso.



(a)



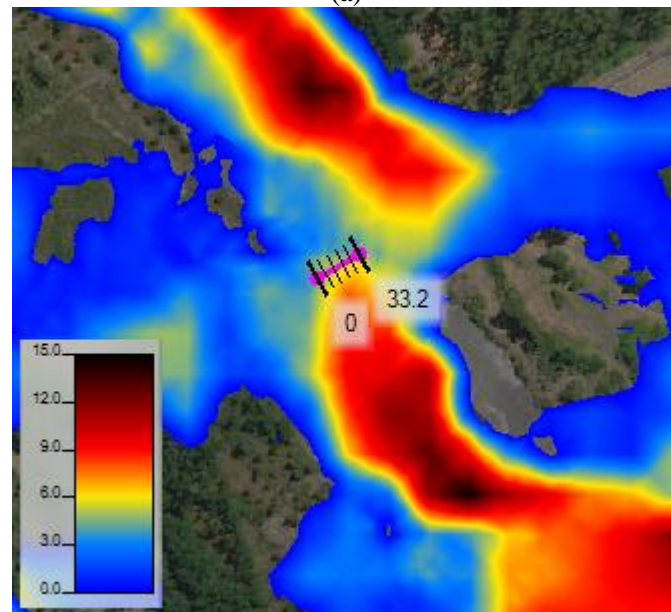
(b)

**Figura 17:** (a) Vista en planta de profundidades en el Río Turbio con una malla de 30m refinada y un paso de tiempo computacional de 0.2 segundos. (b) Perfil longitudinal de profundidades en el Río Turbio.

Una de las pruebas reales de la violencia de los lahares que se han representado en este trabajo es la destrucción del puente Turbio que posee un largo cercano a los 25m y una altura de 10m por sobre el lecho del río. En la figura 18 se muestra la zona donde se emplaza esta estructura y el resultado de las profundidades que arrojó el modelo.



(a)

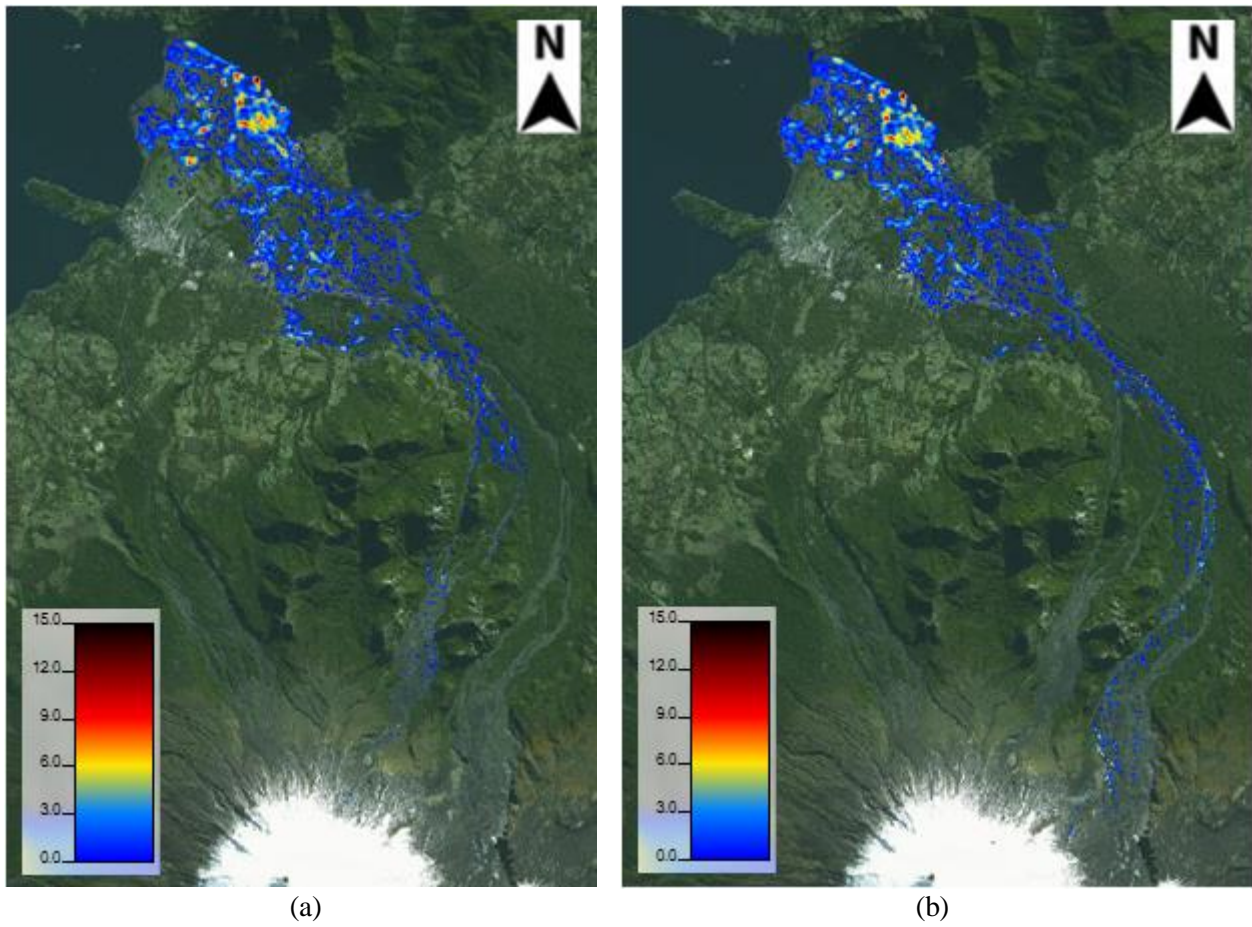


(b)

**Figura 18:** (a) Ubicación del perfil de profundidades en el puente Turbio.  
 (b) Vista en planta de profundidades en el sector del puente Turbio para el lahar más desfavorable (Río Turbio).

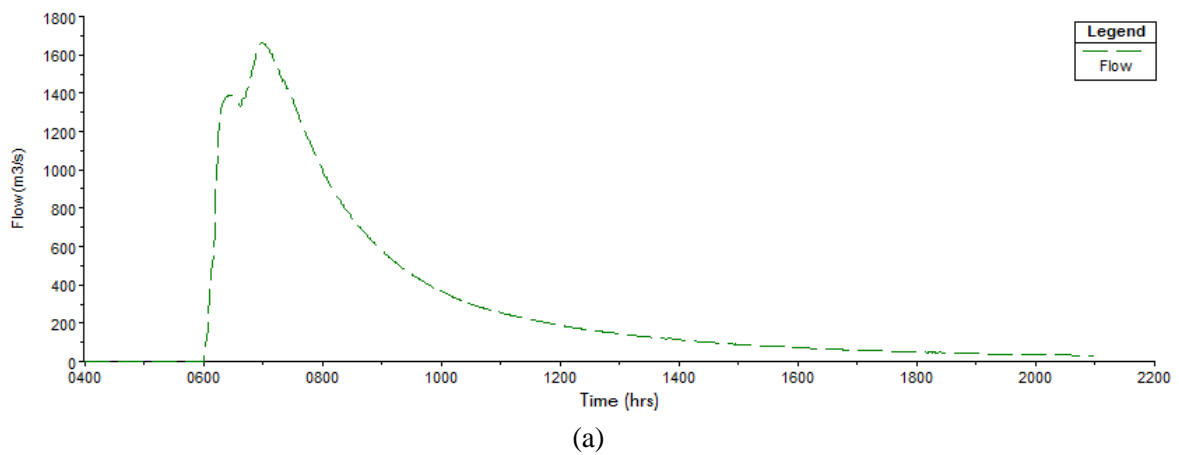
En la figura 18 (a) y (b) se observa un segmento de color púrpura, que ayuda a ilustrar la ubicación del puente.

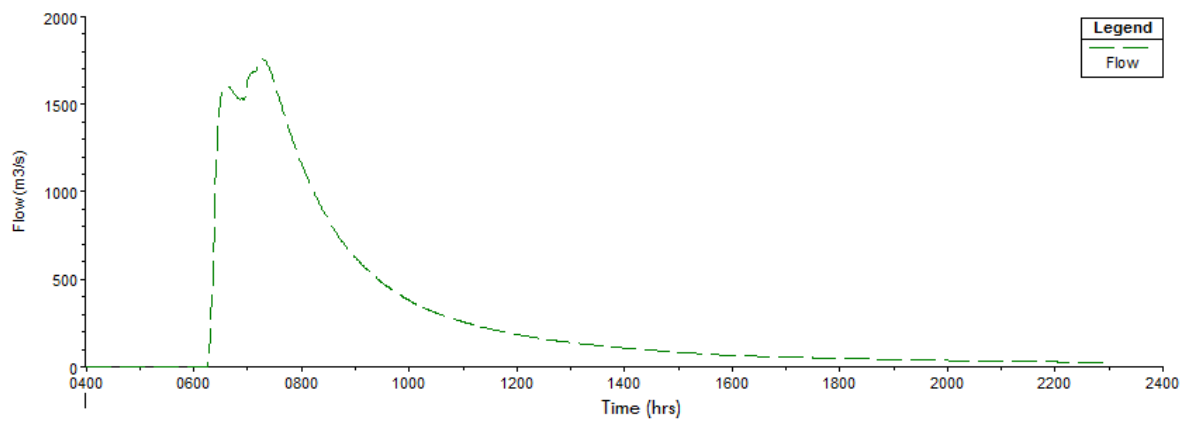
Como se han mostrado los resultados donde el modelo es más desfavorable, queda desvelar la zona de inundación en las cercanías al lago Villarrica. En la figura 19 se muestra la zona de inundación final que ha estimado el software para cada uno de los lahares.



**Figura 19:** (a) Zona de inundación del lahar en el Río Pedregoso. (b) Zona de inundación del lahar en el Río Turbio.

Como el flujo logra llegar al lago Villarrica como se observa en la figura 19, se muestra un resultado adicional que entrega el software y corresponden a los hidrogramas de salida (i.e. flujo drena al lago Villarrica) aprecia en la Figura 20.



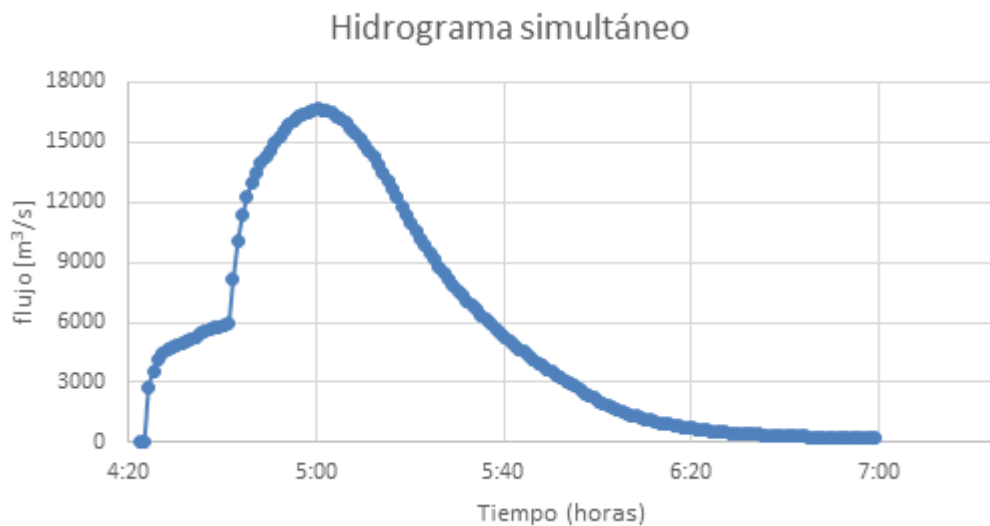


(b)

**Figura 20:** (a) Hidrograma de salida para el Río Pedregoso. (b) Hidrograma de salida para el Río Turbio.

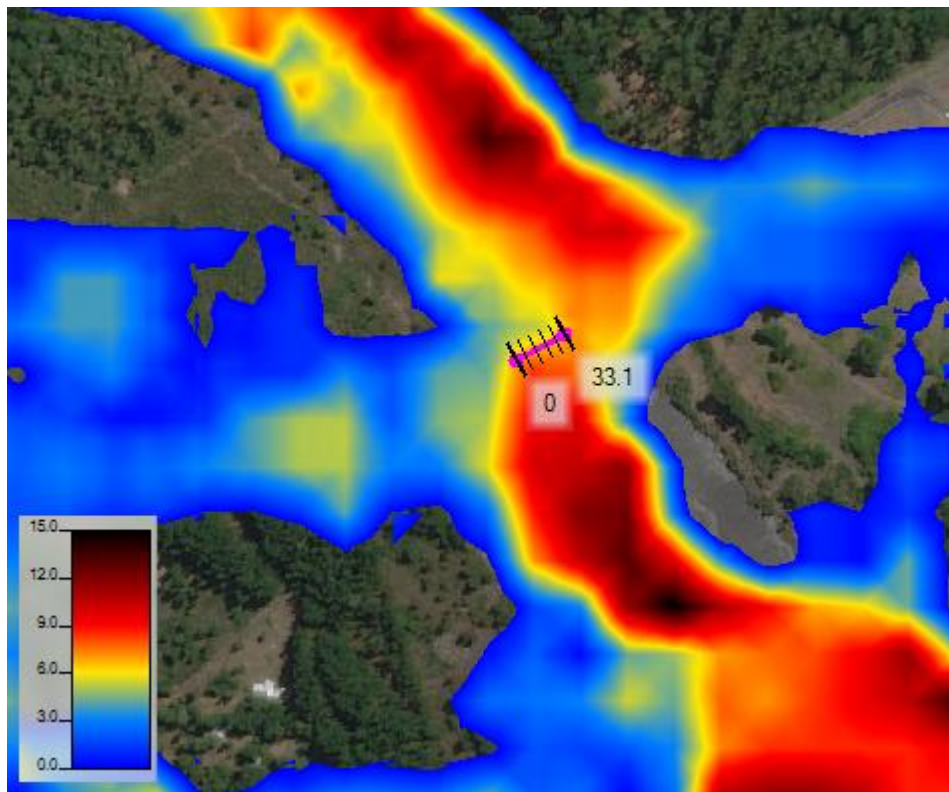
Los hidrogramas de salida que se aprecian en la figura 20, indican que el flujo comienza a drenar al lago Villarrica después de 2 horas de la simulación en el caso del Río Pedregoso y 2 horas y 15 minutos para el Río Turbio. Por otro lado, El volumen final que HEC-RAS registra a la llegada al lago es de casi 18 millones de  $m^3$  para el Río Pedregoso y de cerca de 18.5 millones de  $m^3$  para el Río Turbio. Esto permite estimar que el 45% y el 43% de los volúmenes totales quedaron depositados en el terreno, respetivamente.

Los eventos laháricos en estudio ocurrieron en simultaneo, luego para generar un modelo que represente el efecto de ambos, se registraron los hidrogramas en el sector donde confluyen; es decir, a 1km aguas arriba de la ubicación del puente Turbio. En la figura 21 se muestra el hidrograma resultante de la superposición de los hidrogramas individuales de cada uno de los lahares.

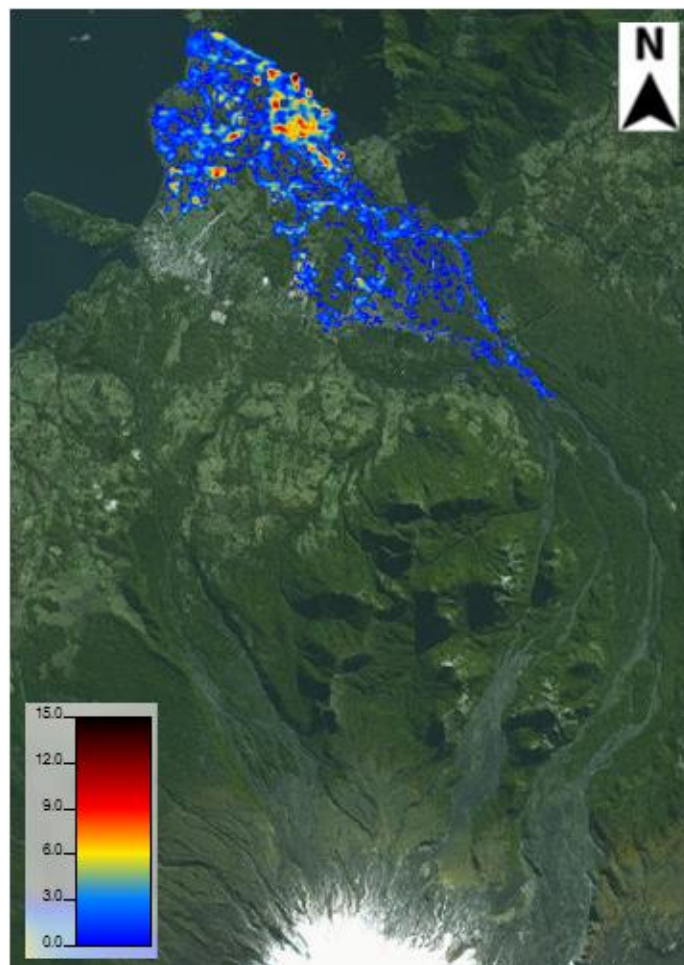


**Figura 21:** Hidrograma resultante de la superposición de los hidrogramas individuales.

Con el hidrograma mostrado en la figura 21, se generó un nuevo modelo con el objetivo de simular el efecto de los lahares en simultaneo y con ello ver como varían los resultados al considerar un solo flujo. De esta forma, se obtuvo un nuevo paso del flujo en el sector del puente Turbio y consecutivamente una nueva zona de inundación en el valle, esto se apreciable en las figuras 22 y 23, respectivamente.



**Figura 22:** profundidades del flujo en la zona del puente Turbio.



**Figura 23:** Zona de inundación en el valle del lahar simultáneo.

#### 4. CONCLUSIONES

Los hidrogramas mostrados en la figura 9, indican que; aunque tengan un caudal máximo similar sus formas son distintas. Esto se atribuye a la topografía que hay aguas arriba de las estructuras, las cuales generan niveles de embalse diferentes, aunque tengan el mismo volumen de agua haciendo variar la energía potencial en éstos. Por otro lado, se genera un valor agregado utilizar esta versión de HEC-RAS que crea internamente un hidrograma, lo que otorga una escasa participación del modelador para manipular el flujo de entrada y con ello los resultados.

Los resultados indican que para todos los modelos realizados; es decir, para los casos de lahares individuales y simultáneos estarían inundando el sector sureste del poblado actual de Pucón según figuras 19 y 23, convirtiendo esta área en zona de peligro en caso de generarse un evento de las mismas características a las ocurridas en el año 1971. además, para el caso del modelo que une ambos lahares su zona de inundación sería mayor que los lahares individuales en el sector Norte-Este de Pucón.

La planicie de inundación que abarcan los flujos simulados indican que el Río Turbio afecta un área mayor que el Río pedregoso con  $29.5\text{km}^2$  y  $26\text{km}^2$ , respectivamente. Por otro lado, los flujos muestran una buena similitud en la ladera del volcán con respecto a la interpretación de la figura 2, sin embargo, la calidad de la solución disminuye en el valle en que las variaciones de la topografía son menores y consecuentemente, no promediabiles en celdas de  $30\text{m} \times 30\text{m}$ . Esto sugiere utilizar una menor discretización espacial en el valle que en la ladera, y la consecuente adquisición de modelos de elevación digital más precisos.

Las profundidades indicadas en la figura 18 (b) muestran que los lahares simulados individualmente no sobrepasan la altura del puente Turbio (10m). por otro parte, al considerar que los flujos de ambos lahares se juntan y consecuentemente ocurren en simultáneo generando resultados de profundidades que sobrepasan la altura del puente como se muestra en figura 22. Por otro lado, para ambas figuras en discusión se aprecia que aguas abajo del puente el flujo se desplaza hacia la derecha, no correspondiendo según la imagen satelital montadas en ambas figuras (18 (b) y 22), indicando a) error en el DEM que considera como parte del terreno el puente analizado, o b) el DEM pierde la resolución espacial en ese sector. Por otra parte, HEC-RAS simula agua limpia a diferencia de un flujo lahárico real donde la componente solida no es despreciable y podría haber sido la causante de la destrucción del puente Turbio por sobre el efecto de la altura del flujo.

Como se muestra en la figura 19 los lahares logran drenar al lago Villarrica, generando que la condición de borde aguas abajo de los modelos fuese controlada por la altura de agua de la superficie del lago por sobre la altura normal de escurrimiento asumida en los modelos. Aún considerado lo anterior, se optó por la condición de altura normal de escurrimiento por los siguientes motivos; a) como el eje hidráulico sería sensible a la altura del lago una variación en este podría generar cambios significativos de los resultados de los modelos. Y b) al considerar la altura normal como condición de borde a la llegada al lago se compensa no considerar en los cálculos la componente solida que genera un aumento en la densidad del flujo y consecuentemente un aumento en su energía generando que la superficie del lago no controle el eje hidráulico del lahar.

Para una modelación exitosa utilizando HEC-RAS 5.0.3 es necesario realizar una malla no estructurada en el sector donde el flujo pasa junto con utilizar un paso de tiempo computacional muy pequeño para garantizar estabilidad. Esto trae como consecuencia un tiempo de cálculo superior a las 45 horas en un computador de escritorio estándar. Además, de invertir mucho tiempo de trabajo en la realización y calibración de los modelos. Lo anterior genera una desventaja al utilizar este software con un rompimiento de una estructura hidráulica para predecir eventos laháricos en futuras erupciones del volcán Villarrica u otros Volcanes, especialmente cuando se necesite determinar tiempos de respuesta para la evacuación temprana de los poblados que se vean amenazados por estos flujos. Sugiriendo modelaciones preventivas considerando un monitoreo permanente de la isoterma cero del volcán de interés para determinar el volumen de nieve disponible y con ello construir sobre la base de distintas modelaciones, tiempos de respuesta para futuros eventos.

## 5. REFERENCIAS

- Barnes, Harry H.** (1967). Roughness Characteristics of Natural Channels. (Geological Survey Water-Supply Paper). 213 p.
- Castruccio, A., & Clavero, J.** (2006). Nuevos antecedentes sobre los lahares generados en la erupción de 1971, en el flanco occidental del volcán Villarrica (39.5°S). *XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta*.
- Castruccio, A., Clavero, J., & Rivera, A.** (2005). Lahares generados por la erupción de 1971 en el flanco oeste del volcán Villarrica (39.5°S). *XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata*.
- Erupción de 1971 (2008). Proyecto Observación Visual Volcán Villarrica, 10 páginas.
- González, O.**, (1995). Volcanes de Chile. Instituto Geográfico militar. 640 p.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., & Ou, G.** (1992). Prediction of debris flow. *In: Proc Interprevent Int Symp (Bern) 4*, p. 99–108.
- Moreno, H.** (2000). Mapa de Peligro del Volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería. Documentos de Trabajo, No. 17,1 mapa escala 1:75.000. Santiago.
- Naranjo, J., & Moreno, H.** (2004). Laharic debris-flows from Villarrica Volcano. In Villarrica volcano (39.5 S), Southern Andes, Chile (Lara, L.; Clavero, J.; editors). *Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 61. Chile.*, p. 28-38.