

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**MODELACIÓN 2D DE FLUJOS ALUVIONALES. APLICACIÓN A LA QUEBRADA
LA MESILLA, PROVINCIA DE HUASCO.**

GERARDO ZEGERS R.¹
ALEX GARCÉS C.²
SANTIAGO MONTSERRAT M.³

RESUMEN

En el presente estudio se exponen los resultados de un modelo bidimensional con FLO 2D realizado para la quebrada La Mesilla, provincia de Huasco. El objetivo de este estudio es caracterizar las áreas inundadas y característica de los aluviones provocados por el evento de crecida ocurrido el 25 de marzo de 2015. Utilizando los parámetros reológicos propuestos por D'Agostino and Tecca (2006) para una zona con sedimentos de similares características, se construyó un modelo de aluviones para la zona, el cual fue validado con áreas de inundación tomadas de Google Earth, después del evento de precipitaciones, y con un video tomado del flujo aluvional para la quebrada Acerillas, con el que se validaron las alturas y velocidades de escurrimiento. Aplicando este modelo a la quebrada La Mesilla, en la cual se generaron grandes daños para el 25M, se estudió las características del flujo aluvional con dos topografías distintas, Lidar (curvas de nivel cada 1m) y Alos-Palsar (resolución 12,5 x12,5m). Utilizando la topografía Lidar con algunas correcciones, se obtuvo una área de inundación un poco mayor a la esperada, alturas de escurrimiento del orden de 60 cm y velocidades del orden de 2-4 m/s en el flujo preferencial. Con la topografía Alos-Palsar se obtuvieron resultados similares a la topografía Lidar, mostrando que estas imágenes satelitales, que se encuentran disponibles en internet, son una buena herramienta para realizar un diagnóstico inicial y definir zonas de riesgo aluvional.

¹Ingeniero de investigación y desarrollo, AMTC, Universidad de Chile – gerardo.zegers@amtc.uchile.cl

²Ingeniero de investigación y desarrollo, AMTC, Universidad de Chile – agarcesc@ing.uchile.cl

³Investigador Asociado, AMTC, Universidad de Chile – santiago.montserrat@amtc.cl

INTRODUCCIÓN

Entre 24 de marzo y el 26 de marzo de 2015 (en adelante 25M) ocurrieron intensas lluvias en el norte del país que generaron daños aluvionales en distintas zonas, particularmente en la provincia de Huasco, región de Atacama. En el presente estudio se propone una metodología para estudiar las inundaciones causadas por el evento de precipitaciones del 25M aplicada a la quebrada La Mesilla, ubicada en la cuenca del río El Carmen en el sector de San Felix. En el sector de San Felix, y en particular la quebrada La Mesilla, se produjeron daños significativos durante los eventos aluvionales del 25M. La Figura 1 muestra dos imágenes satelitales de la quebrada La Mesilla, una antes y otra después del 25M. Como se aprecia en estas figuras, antes de éste evento el cono aluvional estaba completamente cubierto de viñas. El cauce natural de la quebrada (marcado con una línea blanca) se ve interrumpido por los viñedos no existiendo conexión de la quebrada con el río El Carmen. En la imagen satelital posterior al 25M se observa que gran parte de estas plantaciones fueron destruidas por las crecidas aluvionales, las que abarcaron gran parte de la quebrada. En la imagen posterior al evento del 25M, se observa una canalización que conecta la quebrada con el río, la cual fue construida posterior al evento del 25M.



Figura 1 – Izquierda: Imagen satelital 10/4/2013. Derecha : Imagen satelital 10/12/2016

Para estudiar la crecida aluvional en la quebrada La Mesilla se utilizará un modelo bi-dimensional (FLO-2D) capaz de reproducir el flujo de fluidos no-Newtonianos sobre topografías reales. Los parámetros del modelo serán validados en una quebrada aledaña (Acerillas) en donde se cuenta con un video tomado por un poblador de la zona utilizando su teléfono móvil. Para la modelación se cuenta con una topografía Lidar de detalle, con curvas de nivel cada 1 m. Además, se utilizará una topografía satelital ALOS PALSAR de 12.5m x 12.5m disponible en internet (<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>).

METODOLOGÍA

Hidrología

Los caudales necesarios para la modelación hidráulica del evento del 25 de marzo se obtuvieron de un modelo hidrológico, construido utilizando el software HEC-HMS, a nivel de subcuencas y quebradas. Este modelo, desarrollado en base a la información geomorfológica de la cuenca y forzantes meteorológicas disponibles, busca representar adecuadamente las crecidas de origen pluvial al interior del sistema. Lo anterior permite estimar caudales en quebradas de interés sin control fluviométrico ni estimaciones previas. Para lograr esto, el modelo es calibrado en base a los registros existentes, particularmente para el evento de la tormenta de marzo de 2015. La metodología empleada y caudales resultantes se presentan en Gomez et al. (2017).

Propiedades de los flujos aluvionales

Los flujos aluvionales están constituidos principalmente por una mezcla de agua y sedimentos que deslizan por una pendiente por acción de la fuerza de gravedad. A su paso, el flujo puede además incorporar troncos, ramas o trozos de estructuras o basuras que encuentra a su paso. El movimiento está condicionado por los esfuerzos que surgen debido a la interacción de las partículas sólidas entre sí y con el medio fluido, así como por los esfuerzos que se originan debido a los efectos viscosos o turbulentos en la fase líquida (Iverson, 1997; Montserrat, 2005).

Una de las variables más relevantes en el comportamiento de un flujo detrítico es la concentración volumétrica de sedimentos, C_V , definida como la razón entre el volumen de sedimentos y la suma de los volúmenes de fluido y sedimentos. Esta razón se presenta en la ecuación (1).

$$C_V = \frac{Vol_{Sedimentos}}{Vol_{Sedimentos} + Vol_{fluido}} \quad (1)$$

El caudal detrítico resulta de la suma del caudal líquido y el caudal de sedimento seco, por lo que puede ser estimado en función de C_V como (O'Brien y García, 2009):

$$Q_D = \frac{1}{1 - C_V} Q_L \quad (2)$$

donde Q_L es el caudal líquido estimado por la modelación hidrológica.

La densidad de la mezcla aluvional (ρ_m) se relaciona directamente con la concentración de sedimentos:

$$\rho_m = C_V \rho_s + (1 - C_V) \rho \quad (3)$$

donde ρ y ρ_s representan la densidad del fluido y sólidos respectivamente.

Además de la concentración total de sedimentos, la concentración de finos también juega un rol importante. La mezcla de agua y sedimento fino forman un fluido equivalente con características reológicas distintas a la del agua (Iverson, 1997; Montserrat, 2005). Flujos con una alta

concentración de sedimento fino tienden a comportarse como fluidos plásticos con bajas tasas de deformación, mientras que en mezclas con bajas concentraciones de sedimento fino los esfuerzos turbulentos dominan el flujo (O'Brien y Julien, 1988). Por esta razón, para la modelación de flujos detríticos se recomienda estudiar la reología de las mezclas agua-sedimento fino. Para este estudio, la cantidad de sedimento fino presente en las mezclas aluvionales puede ser estimada a partir de las calicatas excavadas en las quebradas y en el eje del río El Carmen.

Modelo hidráulico

Para la modelación de los flujos aluvionales se utiliza el modelo bidimensional FLO-2D. Este modelo está basado en los procesos físicos que simula el tránsito de crecidas en canales o superficies no confinadas (O'Brien y García, 2009). Es un modelo de conservación de volumen, donde la progresión de la onda de crecida está controlada por la topografía y resistencia al flujo. Las ecuaciones básicas que resuelve el modelo son la ecuación de continuidad y ecuación de momentum, ambas promediadas en la vertical. El modelo es capaz de simular reologías no Newtonianas típicas de flujos aluvionales, utilizando un modelo reológico llamado "cuadrático". La reología cuadrática combina componentes asociados a los esfuerzos de fluencia, viscosos, dispersivos (colisiones) y turbulentos (O'Brien et al., 1993; O'Brien y García., 2009; Naef et al., 2006). En función de esta reología cuadrática, la pendiente de fricción (promediada en la vertical), S_f , puede ser estimada como:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_t^2 V^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (4)$$

donde, τ_y es el esfuerzo de fluencia, γ_m representa el peso específico de la mezcla agua-sedimentos, h es la altura del flujo, K un parámetro de resistencia laminar, η la viscosidad dinámica de la fase fluida, V la velocidad del flujo y n_t es el coeficiente de Manning convencional.

La viscosidad dinámica y el esfuerzo de fluencia han mostrado ser una función de la concentración volumétrica de limos, arcillas y, en algunos casos, arenas finas. Sin embargo, no dependen de sedimentos más gruesos arrastrados por la corriente (O'Brien et al., 1993; O'Brien y García, 2009). O'Brien y García (2009) proponen las siguientes relaciones empíricas para calcular la viscosidad y esfuerzo de fluencia en función de la concentración volumétrica de sedimentos:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (5)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (6)$$

donde $\alpha_{1,2}$ y $\beta_{1,2}$ son coeficientes empíricos definidos de manera experimental (O'Brien et al., 1993; O'Brien y García, 2009).

Con respecto al número de Manning, se estimó un valor de $n=0,05$ en el sector alto de la quebrada y $n=0,07$ en el sector del cono aluvial. Estos valores son representativos de la granulometría de la quebrada y obstrucciones presentes en el cono aluvial

Concentración de sedimentos

Según O'Brien y García (2009), la concentración de sedimentos en aluviones varía desde mínimos cercanos a 20% - 35% y alcanza máximos cercanos a 50%. Generalmente el máximo de sedimentos ocurre un poco antes del máximo caudal, asociado a frentes de onda que transportan barro y detritos. Para este estudio, y dado que muchas de las quebradas modeladas son pequeñas y de bajos tiempos de concentración, se supondrá que el máximo en la concentración de sedimentos coincide con el máximo caudal.

Para la modelación se supuso un valor mínimo de $C_V=30\%$ para caudales menores a la mitad del caudal líquido máximo, un máximo de $C_V=55\%$ asociado al máximo caudal y $C_V=20\%$ luego del máximo debido a la gran cantidad de sedimentos removidos. En la Figura 2 se muestra el hidrograma de crecida (obtenido de Gomes et al., 2017) y curva de concentración volumétrica de sedimentos para La Mesilla. Fredes (2016) estima un volumen de depósitos de 204.100 m^3 para La Mesilla. Considerando una porosidad del 50%, se obtienen 102.000 m^3 de sedimentos depositados en la quebrada. La metodología propuesta entrega un total de sedimentos transportados por la crecida de 260.000 m^3 , lo que equivale a ~ 2.5 veces el sedimento depositado en la cuenca, lo que se encuentra del orden de los sedimentos reportados por Fredes (2016), considerando que parte de los sedimentos fueron transportados por la crecida hacia el río.

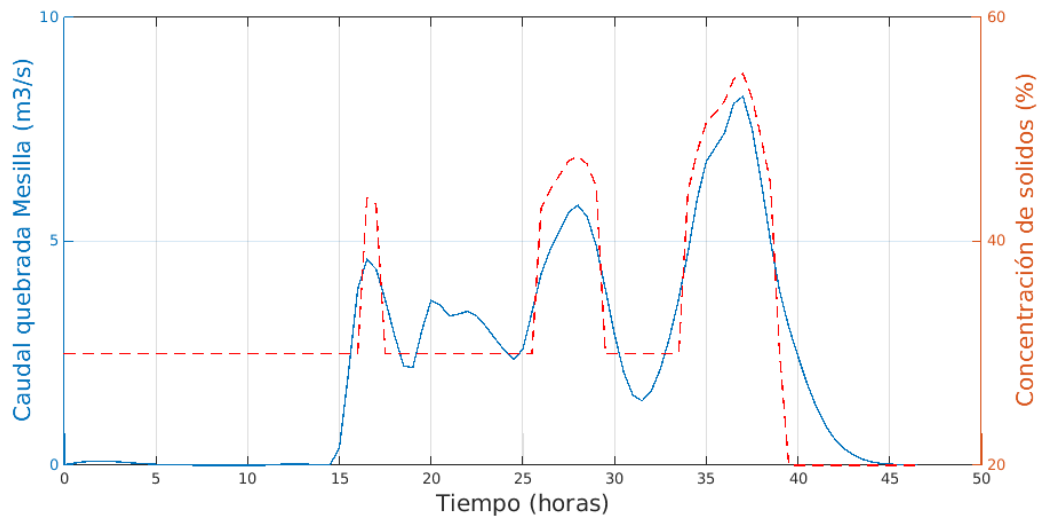


Figura 2 - Hidrograma de crecida y curva de concentración volumétrica en función del caudal. Quebrada La Plata

Topografía

Se dispone de una topografía Lidar (Figura 3) que se realizó después del evento 25M con curvas de elevación cada 1m, en esta figura se puede ver la alta resolución de esta topografía, además se tiene una topografía satelital Alos-Palsar que se tomó antes del 25M (Figura 4), con resolución 12,5 x 12,5 m.

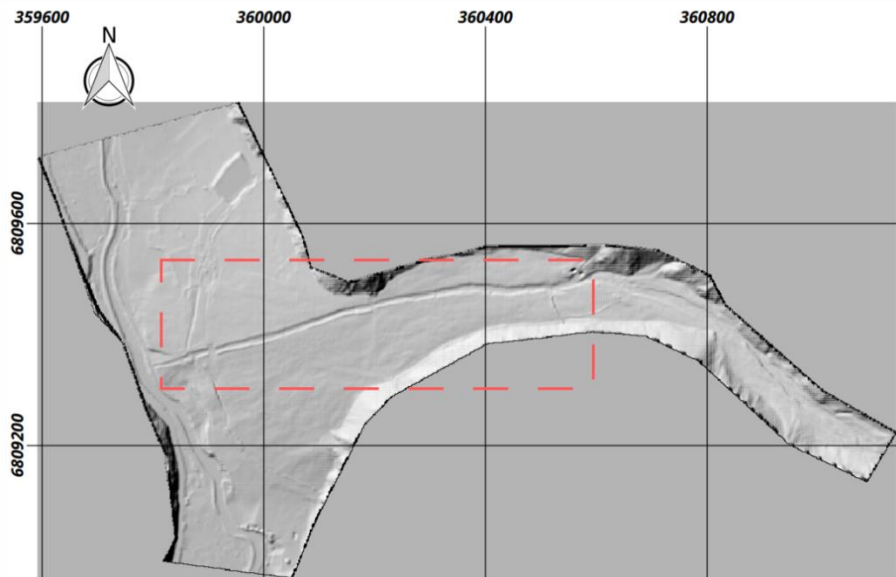


Figura 3 - Topografía Lidar Zona roja enmarca canal construido después del 25M.

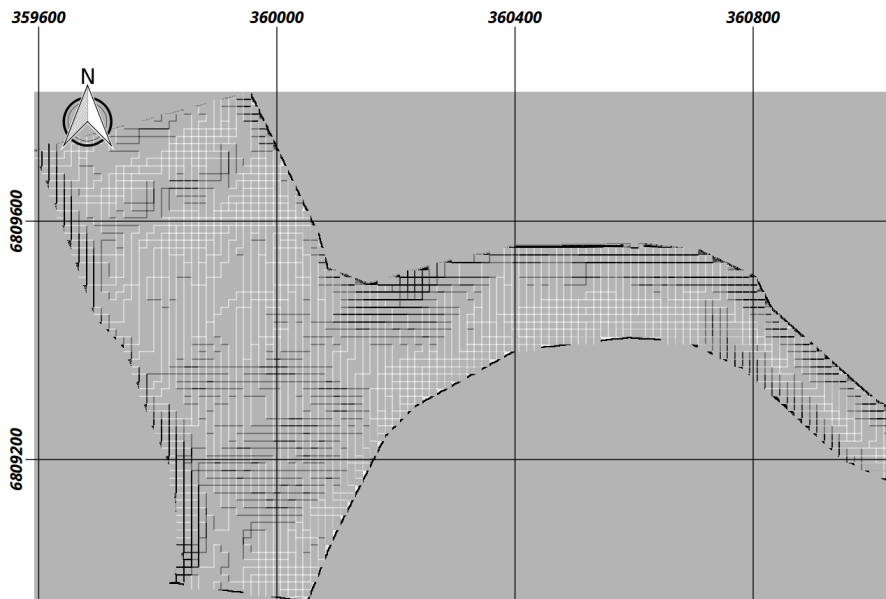


Figura 4 - Topografía ALOS-PALSAR

Validación del modelo reológico

Se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a los valores $\alpha_{1,2}$ y $\beta_{1,2}$ y se observó que estos parámetros tienen poco efecto sobre el área de inundación y afectan bastante las propiedades del escurrimiento (altura y velocidad), por lo que la determinación de estos parámetros es fundamental para poder cuantificar los daños y el diseño de medidas de mitigación. Si bien en el manual del modelo FLO-2D existen referencias de los valores de $\alpha_{1,2}$ y $\beta_{1,2}$ (O'Brien y García, 2009), estos están basados principalmente en ensayos reológicos de mezclas de agua y fracciones finas de sedimento como limos y arcillas (O'Brien et al. 1988). Los valores de $\alpha_{1,2}$ y $\beta_{1,2}$ obtenidos de ensayos reológicos muestran una gran dispersión. Además, valores de η y τ_y calibrados para aluviones reales muchas veces resultan mayores a los obtenidos de ensayos reológicos que consideran sólo las fracciones finas de sedimento (Sosio 2007 et al., 2007; D'Agostino and Tecca, 2006). Por esta razón, y en función de los antecedentes disponibles, se optó por utilizar valores calibrados para eventos reales en Italia (D'Agostino and Tecca, 2006), debido a que uno de ellos resulta semejante en cuanto a la granulometría, particularmente en la cantidad de finos presentes en la mezcla. D'Agostino and Tecca (2006) calibraron el modelo FLO-2D para flujos aluvionales ocurridos en las localidades de Rio Dona y Fiammes en Italia, los cuales se encontraban bien documentados. Para el estudio se contaba con información detallada del área inundada, alcance del flujo, volumen de los depósitos, alturas del flujo y estimaciones de velocidad. En el caso del río Fiammes, la granulometría de los sedimentos estaba en el rango de limos y arcillas hasta rocas de 1 m a 2 m, pero con un contenido de finos no superior al 15 % del volumen de sedimentos, similar a lo encontrado en las cuencas en estudio.

La validación del modelo se realizó en una quebrada del río El Carmen aledaña a la quebrada La Mesilla, denominada Acerillas, debido a que se cuenta con un video de la crecida. Para el modelo de elevación se utilizó la topografía Lidar de curvas de elevación cada 1m, con lo que se construyó un modelo de la quebrada con una grilla de cálculo de 4 m x 4 m. A partir del video disponible se obtuvo valores aproximados de altura, ancho y velocidad de la corriente aluvional en la zona donde el aluvión atraviesa un camino durante la crecida del 25M. En la Figura 5 se muestra una foto de un instante del video donde se observa un flujo preferencial al centro, rodeado de un flujo de menor velocidad. Para la zona de escurrimiento preferencial se estimó una altura de escurrimiento de 0.4-0.7 m, una velocidad de 2.5-3 m/s y un ancho de 5-8 m, lo que significa un caudal detrítico de 7-10 m³/s. Para la zona exterior se estimó un ancho de 20-25 m, una velocidad de 0.3-0.5 m/s y una altura de escurrimiento de 20-30 cm. Se puede ver que los resultados de la modelación muestran una zona de flujo preferencial con velocidades de 1.6-2.5 m/s y en la zona exterior de 0.2-0.6 m/s. Además, el ancho de la zona interior es del orden de 8m y exterior de 40 m. Los valores estimados del video son menores a los del modelo posiblemente debido a que el instante en que se capturó el video no necesariamente corresponde al máximo de la crecida. Sin embargo los resultados del modelo muestran que los valores se encuentran dentro del rango de los valores estimados del video disponible, lo que valida los parámetros del modelo. En resumen, los parámetros validados para los modelos bidimensionales con FLO-2D se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Parámetros modelo bidimensional

α_1	β_1	α_2	β_2	nquebradas	nplanicies
0,0075	14,39	1,0	175	0.05	0.07

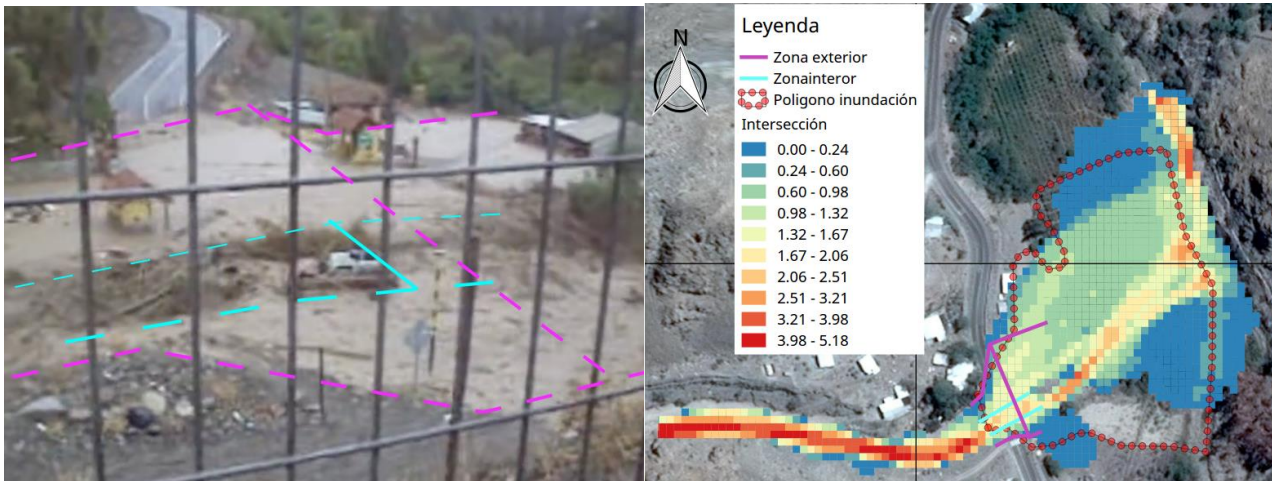


Figura 5 – Izquierda: Imagen tomada de video del aluvión. Derecha: Velocidades de escurrimiento en zona donde se tiene el video del aluvión. Zona rosada representa la zona exterior con menor velocidad de escurrimiento. Zona celeste representa la zona de flujo preferencial.

RESULTADOS

En la Figura 6 y Figura 7 se presentan las alturas de escurrimiento obtenidas utilizando la topografía Aster y Lidar respectivamente. Se puede apreciar en estas figuras la mejora en resolución que entrega la topografía Lidar, especialmente en la llegada al río. En la (topografía Alos-Palsar) se observan alturas de escurrimiento en la quebrada del orden de 1.5 m. Las alturas mayores observadas hacia el sur del dominio corresponden a un punto bajo producto de un error en la topografía. Para la Figura 7 (topografía Lidar) se observan alturas de escurrimiento máximas de 1.4 m, asociadas a la llegada al río y en la canalización construida al centro de la quebrada. Con respecto a las áreas de inundación, ambos modelos tienden a subestimar el área de inundación en la parte alta de la quebrada, en particular el modelo asociado a la topografía Lidar de mayor resolución, debido a que la canalización construida post-25M conduce una porción importante del flujo aluvional. El modelo pre-25M (topografía Alos-Palsar) muestra que el flujo sigue el cauce natural observado en la parte alta de la imagen. En el sector en que el cauce es interrumpido por los viñedos, el flujo gira levemente hacia el sur y luego se abre sobre el cono aluvial de la quebrada. El modelo post-25M en cambio, muestra que el flujo sigue la dirección de la canalización, la cual desborda en la parte media de la cuenca donde el flujo se abre sobre el cono aluvial. El modelo Lidar genera una mayor inundación en la parte alta del cono aluvial, mientras que el modelo Aster resulta en una mayor inundación hacia el sector bajo de la quebrada. Sin embargo, ambos modelos tienden a subestimar el área de inundación observada durante la crecida del 25M.

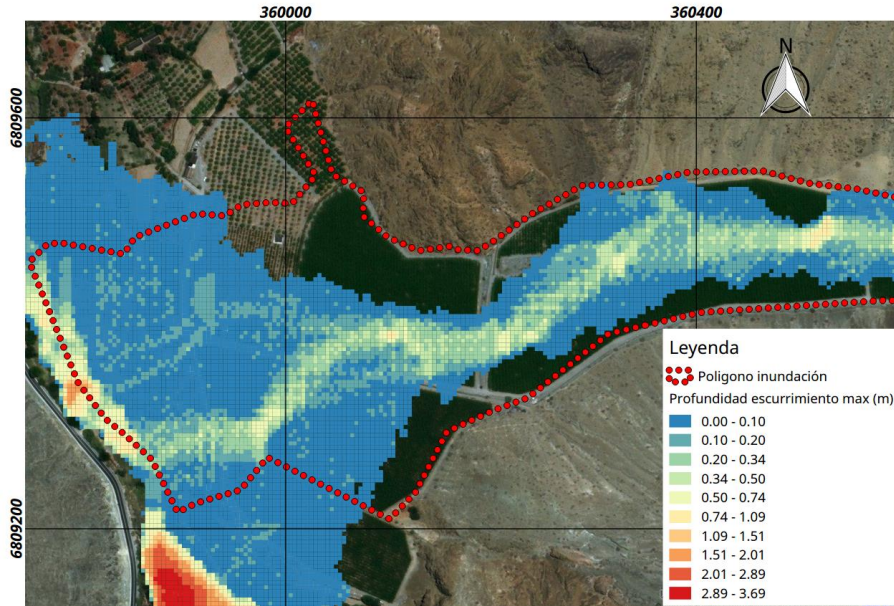


Figura 6 - Profundidad de escurrimiento máxima (m). Topografía Alos-Palsar 12,5 x 12,5 m

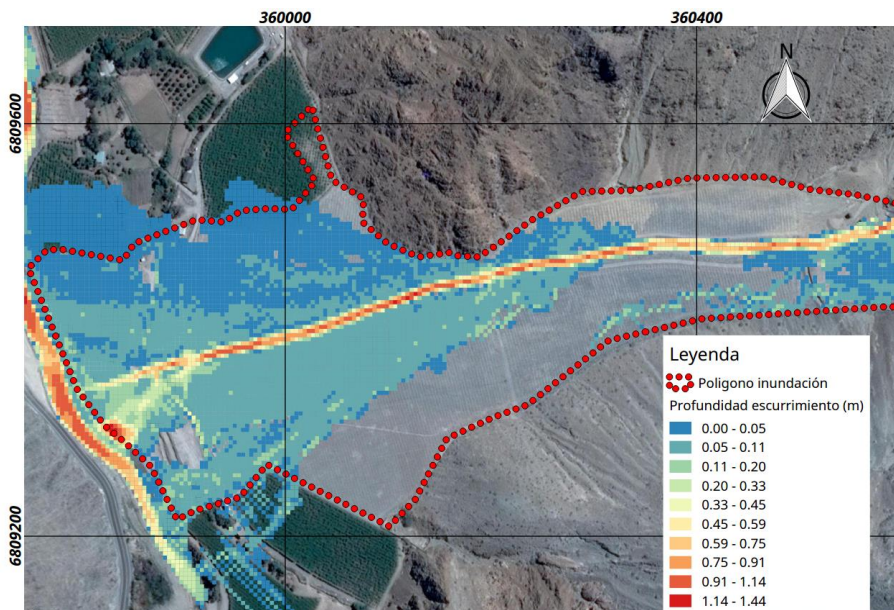


Figura 7 - Profundidad de escurrimiento máxima (m). Topografía Lidar 1x1m

Para poder entender mejor el flujo aluvional ocurrido el 25M en La Mesilla, se realizó una modificación a la topografía lidar y se removió artificialmente la canalización construida luego del 25M. Esta canalización fue removida de la topografía interpolando en función de las cotas de terreno en los bordes de la canalización. En la Figura 8 se muestran las alturas de escurrimiento obtenidas para la topografía lidar modificada. Se puede ver que el área de inundación aumenta considerablemente, cubriendo todo el cono aluvional desde la parte alta de la quebrada. Además se puede apreciar que al centro de la quebrada el flujo preferencial de la corriente aluvional gira levemente hacia el sur, siguiendo aproximadamente el trazado del flujo encontrado en las

simulaciones realizadas con la topografía Alos-Palsar (pre-25M). Esto muestra que el cauce natural de la quebrada tiende a seguir el trazado marcado por estas simulaciones y no necesariamente el trazado de la canalización.

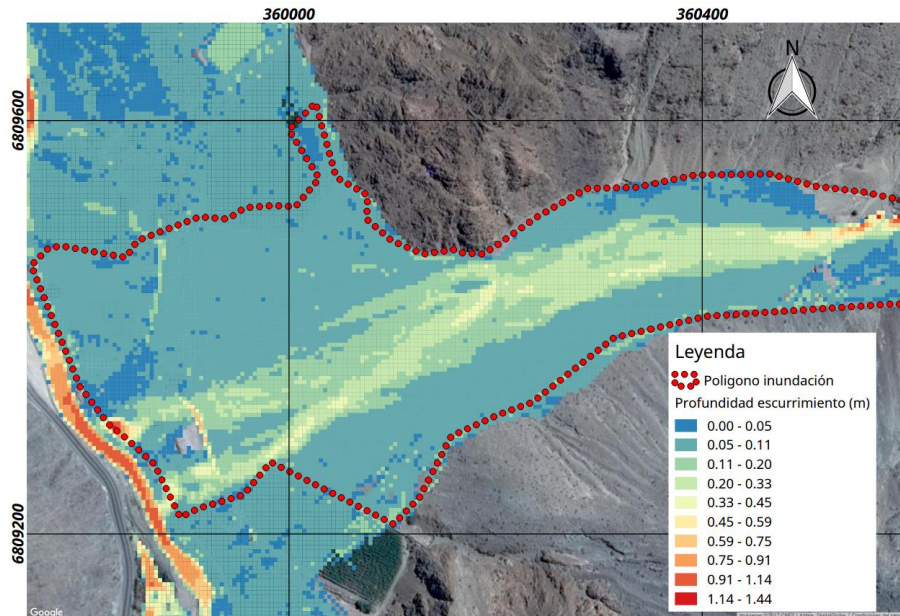


Figura 8 - Profundidad de escurrimiento máxima (m). Topografía Lidar Modificada 1x1m

En la Figura 9, Figura 10 y Figura 11 se muestran las velocidades de escurrimiento para la topografía lidar (TL), topografía Lidar modificada (TLM) y topografía Alos-Palsar (TA) respectivamente. Para TL se puede observar que los flujos se encuentran canalizados por el centro alcanzando velocidades de 5 m/s en la parte alta y 3 m/s en la parte media. Para TLM se tienen velocidades de 5 m/s en la parte alta y 2 m/s en la parte media, mostrando un flujo más amplio y que cubre el cono aluvional. Por último, para TA se tienen velocidades del orden de 4 m/s en la parte alta y 2 /s en la parte media con un flujo preferencial en la parte media similar al de TLM.

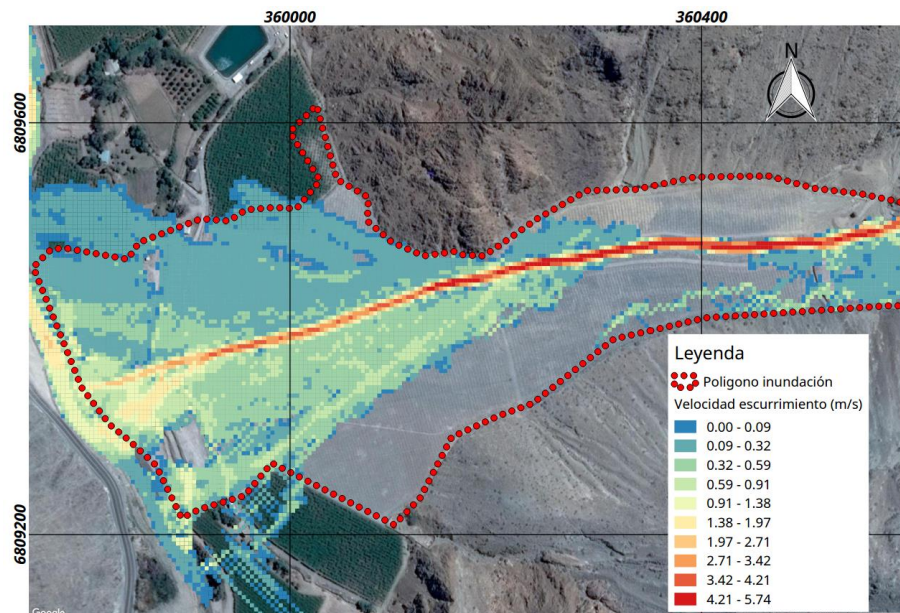


Figura 9 - Velocidad de escurrimiento máxima (m/s). Topografía Lidar 1x1m

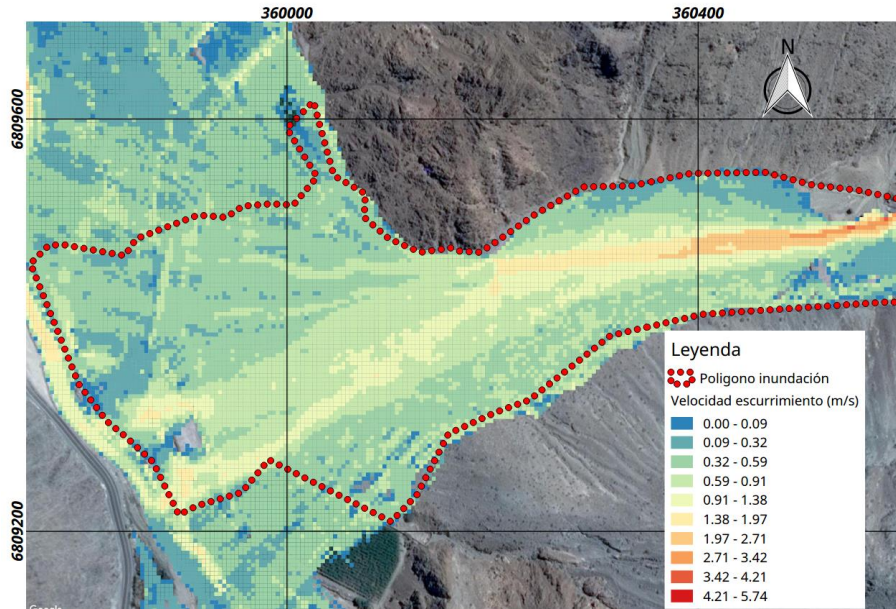


Figura 10 - Velocidad de escurrimiento máxima (m/s). Topografía Lidar Modificada 1x1m

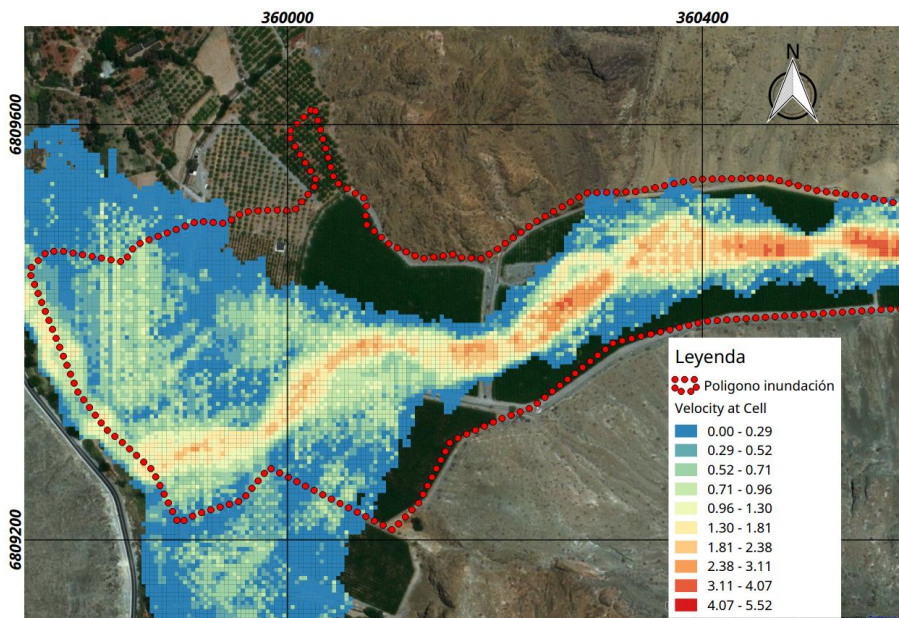


Figura 11 - Velocidad de escurrimiento máxima (m/s). Topografía Alos-Palsar 12,5 x 12,5 m

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Para el modelo reológico de FLO 2D los parámetros $\alpha_{1,2}$ $\beta_{1,2}$ no tienen mucha influencia en el área de inundación pero determinan las características del escurrimiento (altura y velocidad). Para este trabajo se utilizaron los valores calibrados por D'Agostino y Tecca (2006) en río Fiammes, Italia, debido a la similitud en la granulometría de los sedimentos. Estos valores fueron validados para la zona en estudio utilizando un video del 25M de la quebrada y comparando valores de alturas y velocidades de escurrimiento estimados de las imágenes de video con los resultados del modelo. Estos resultados podrían ser mejorados significativamente si a futuro se contara con información detallada de alturas y velocidades de escurrimiento, así como un buen levantamiento topográfico de los depósitos luego de eventos aluvionales en la zona

Al aplicar el modelo a la quebrada La Mesilla se observa que la canalización construida después del 25M se conduce una parte importante del flujo aluvional, disminuyendo el área de inundación respecto de los rastros de la crecida visibles en la imagen de Google Earth. Para lograr representar de mejor manera lo ocurrido en el evento, se removió el canal de manera artificial. Con estos cambios se logra un área de inundación mayor que la observada para el evento (Figura 8 y Figura 10). Sin embargo, las alturas de escurrimiento en las zonas más lejanas son muy bajas (menores que 5 cm - 10 cm), por lo que sus rastros pueden no ser visibles en la imagen de Google Earth posterior al evento.

A pesar de la baja resolución de la topografía Aster, se observa que los resultados obtenidos son una buena aproximación de lo ocurrido en la quebrada (Figura 6 y Figura 11). Estas imágenes satelitales, de resolución 12,5x12,5 m, constituyen una buena herramienta como para realizar un diagnóstico inicial de flujos aluvionales en las quebradas. Estas imágenes son gratuitas y se encuentran disponibles para toda la región.

Finalmente se concluye que los daños causados en la quebrada la Mesilla durante el evento del 25M se debieron en gran medida a que el cauce natural de la quebrada se encontraba intervenido al momento de ocurrido el aluvión. Por ello se recomienda recuperar los cauces de las quebradas, definir áreas de inundación y construir obras de mitigación que disminuyan las áreas afectadas donde se justifique.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al centro investigación para la minería, AMTC, al centro de investigación, desarrollo e innovación de estructuras y materiales, IDIEM y a la dirección de obras hidráulicas (DOH) del ministerio de obras públicas (MOP).

REFERENCIAS

Gomez, T.; Cepeda, J ; Lagos, M. Montserrat, S. Modelación hidrológica de la tormenta 25M en la cuenca del río Huasco: Validación de caudales usando datos sedimentológicos. SOCHID 2017.

Iverson, R.M. 1997. The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.

Montserrat, S. 2005. Estudio experimental de obras de protección contra aluviones. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Naef, D., D. Rickenmann, P. Rutschmann, y B.W. Mcardell. 2006. Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(1), 155-165.

O'Brien, J. S. y R. García. 2009. FLO-2D Reference manual. Available from: www.flo-2d.com.

O'Brien, J.S., P.Y. Julien y W.T. Fullerton. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2) 244-261.

O'Brien, J.S. y P.Y. Julien, 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of hydraulic engineering*, 114(8) 877-887.

Sosio, R.; Crosta, G. B.; Frattini, P. Field observations, rheological testing and numerical modelling of a debris-flow event. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, vol. 32, no 2, p. 290-306.

Yuri, V. 2005. Evaluación estadística de factores generadores de flujos detritos durante el evento del 25 de marzo de 2015 en la cuenca del valle del Huasco, comuna del Vallenar, III Región de Atacama. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.