

Modelación de Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Río Copiapó, Chile

Mudflow Modeling in the Copiapó Basin, Chile

Valdés-Pineda, R.^{a1}, Valdés, J. B.^{a2} y García-Chevesich, P.^b

^aUniversity of Arizona, Department of Hydrology and Atmospheric Sciences, 1133 E James E. Rogers Way, Tucson, Arizona, USA.
E-mail: ^{a1} rvaldes@email.arizona.edu

^bUniversidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Av. Santa Rosa 11315, Santiago, Chile.

Recibido: 06/03/2017

Aceptado: 18/04/2017

Publicado: 28/04/2017

Citar como: Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., García-Chevesich, P. 2017. Mudflow Modeling in the Copiapó Basin, Chile. *Ingeniería del agua*, 21(2), 135-152. <https://doi.org/10.4995/la.2017.7366>

RESUMEN

Los eventos extremos de precipitación intensa que se produjeron entre el 24 y 26 de marzo de 2015 en la región del Desierto de Atacama (26-29°S), en el Norte de Chile, dejaron alrededor de 30 000 damnificados, siendo uno de los eventos de mayores magnitudes de los últimos 50 años, y que tuvo un costo de reconstrucción de alrededor de \$1.5 billones de dólares. Los flujos de detritos que se incrementaron durante la crecida inundaron gran parte de las ciudades de Copiapó y Tierra Amarilla. Este manuscrito tiene por objetivo modelar la crecida aluvional de marzo de 2015 en la cuenca del Río Copiapó, específicamente en las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla. La modelación se lleva a cabo utilizando el modelo *Rapid Mass Movement Simulation* (RAMMS) que permite modelar la dinámica de la crecida aluvional en dos dimensiones, utilizando las características topográficas de los dominios de modelación. La calibración del modelo fue llevada a cabo satisfactoriamente utilizando datos de alturas capturados en terreno después de la crecida del año 2015. Un análisis detallado del evento hidrometeorológico es llevado a cabo utilizando imágenes satelitales obtenidas desde *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA), así como datos pluviométricos e hidrográficos disponibles en la cuenca del Río Copiapó. La simulación de la crecida es reproducida con mapas de alturas de inundación asociados a dos escenarios de modelación. Las alturas máximas de inundación son finalmente utilizadas para el desarrollo de mapas de riesgos en ambas localidades. De acuerdo a nuestros resultados, el modelo RAMMS es una herramienta apropiada para modelar crecidas aluvionales y elaborar mapas de riesgos de inundación para mejorar la gestión de riesgos hidrológicos en cuencas áridas y semiáridas de Chile.

Palabras clave | modelación de crecidas aluvionales; desierto de Atacama; Copiapó; Tierra Amarilla.

ABSTRACT

Extreme precipitation events that occurred between March 24 and March 26 of 2015 in the region of the Atacama Desert (26-29°S) left around 30 000 victims, being one of the biggest events over the past 50 years, with total a cost of reconstruction of about 1.5 billion dollars. The mudflows which increased during the flashflood inundated much of the city of Copiapó and Tierra Amarilla. This manuscript aims to model the mudflow of March 2015 in the Río Copiapó, specifically in the towns of Copiapó and Tierra Amarilla. The modeling process is performed using the Rapid Mass Movement Simulation Model (RAMMS) that allows modeling the dynamics of the mudflow in two dimensions, only using the topographic features of the modeling domain. Calibration of the model was carried out successfully using data from inundation heights captured around the city after the 2015 event. A detailed analysis of the hydrometeorological event is carried out using satellite images obtained from Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), and pluviometric and hydrographic data available in the Copiapó River basin. The simulation of the flood is reproduced with maps of inundation heights associated with two modeling scenarios. The maximum flood heights are ultimately used for developing risk maps at both sites. According to our results, the RAMMS model is an appropriate tool for modeling mudflow and mapping flood risk to improve hydrological risk management in arid and semiarid basins of Chile.

Key words | mudflow modeling; Atacama Desert; Copiapó; Tierra Amarilla; extreme hydrological events.

INTRODUCCIÓN

Los eventos hidrometeorológicos extremos de precipitación ocurridos entre el 24 y 26 de marzo de 2015 en la Región de Atacama (26-29°S) fueron desencadenados por un sistema de baja presión atmosférica, atrapado frente a las costas del océano Pacífico alrededor de los 25°S. Este sistema amplificó el flujo de vientos desde las costas de Perú hacia Atacama, trayendo consigo un alto contenido de agua precipitable sobre la Región (Barret *et al.*, 2016). Según registros de 13 estaciones pluviométricas, se acumularon en promedio más de 45 mm en la Cuenca del Río Copiapó durante el periodo de duración del evento. De acuerdo con Bozkurt *et al.* (2016), en la región hiperárida del desierto de Atacama se registraron intensidades de lluvia de más de 10 (mm/h), lo que generó una importante crecida del caudal del Río Copiapó, la cual fue parcialmente contenida por el Embalse Lautaro, logrando minimizar el impacto en el sector de Tierra Amarilla. Sin embargo, aguas abajo en la misma subcuenca, la Quebrada Paipote que confluye al Río Copiapó y que bajo condiciones normales se encuentra seca, registró un aumento significativo de su caudal directo (más de 1500 m³/s), el cual arrastró a su paso un gigantesco volumen de arena, combinado con partículas de arcilla y limo (Izquierdo *et al.*, 2016). Otros elementos antrópicos como por ejemplo escombros de viviendas, vehículos, y bienes muebles, también fueron arrastrados durante la crecida. Dicho flujo de detritos inundó gran parte de la ciudad de Copiapó (ver Figura 1). Según la Oficina Nacional de Emergencias (ONEMI), el paso de dicho evento hidrometeorológico dejó 31 fallecidos, 86 desaparecidos y casi 30000 damnificados con más de 5000 casas dañadas (Naranjo y Olea-Encina, 2015). El presente manuscrito tiene como objetivo modelar la trayectoria del material aluvional y la distribución de las alturas de inundación en la cuenca del río Copiapó, específicamente en las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla, durante el evento hidrometeorológico extremo de marzo de 2015. En las siguientes secciones se detalla el proceso de implementación, y calibración del modelo RAMMS en los dominios seleccionados. Los resultados de la modelación son discutidos en términos de propagación de la crecida aluvional, así como a través de la identificación de zonas (mapas) de riesgo de inundación. Finalmente los perfiles longitudinales de las alturas de inundación de la crecida aluvional, así como sus velocidades de propagación, son discutidos en términos de los impactos producidos en ambas localidades de la región hiperárida del desierto de Atacama.



Figura 1 | Fotografías de la Crecida Aluvional de marzo de 2015 en la ciudad de Copiapó, Región de Atacama.

MATERIAL Y MÉTODOS

Area de Estudio

La modelación de la crecida aluvional se llevó a cabo en dos localidades de la Región de Atacama la cual se encuentra localizada en el Norte de Chile y comprende gran parte del Desierto de Atacama (el desierto más árido del mundo) (Figura 2a). El clima predominante en la región es desértico, que se atenúa de norte a sur debido al aumento de las precipitaciones. En

promedio las precipitaciones no superan los 50 mm al año (Valdés-Pineda *et al.*, 2016). La cuenca del Río Copiapó cuyo cauce principal se encuentra generalmente seco debido a la utilización insostenible de sus aguas por parte de las empresas mineras y agrícolas, comienza en la confluencia de los ríos de Jorquera y de Pulido al sureste de la cuenca. El río Copiapó se nutre, 2.5 km río abajo, de las aguas de su tercer afluente, el río Manflas (Figura 2b). La superficie de la cuenca del río Copiapó (incluyendo toda la red hidrográfica) alcanza aproximadamente los 18 712 km², con una pendiente promedio de 11.3%. El tiempo de concentración del río Copiapó desde su punto más alto (~1186 m.s.n.m.) hasta su desembocadura en el Océano Pacífico varía entre aproximadamente 15 a 25 horas (estimado con los métodos de Temez y Kirpich, respectivamente). A lo largo de sus 162 km, el río posee un curso en sentido noroeste cruzando las localidades de Tierra Amarilla y Copiapó (Figura 2c) hasta su desembocadura en el mar (alrededor de los 27°17' de latitud Sur). La cuenca presenta un relieve muy irregular y accidentado, predominando la alternancia de los valles en sentido transversal con interfluvios montañosos denominados serranías. Desde un punto de vista geomorfológico, los principales elementos fisiográficos son: de Este a Oeste, Cordillera de los Andes, Valles Transversales, Cordillera de la Costa y Planicies Litorales. El sector precordillerano tiene alturas que varían entre los 2500 y 4000 m y la Cordillera de los Andes se presenta con alturas superiores a los 4000 m, llegando incluso a superar los 5000 m (MOP-DGA, 2004). El uso de suelo en la cuenca es mayoritariamente clasificado como suelos desnudos con presencia de vegetación arbustiva y formaciones mixtas compuestas por cultivos agrícolas, praderas, y matorrales p.e. cactáceas, y especias arbustivas (Figura 2d). El perímetro de los dominios de modelación de ambas localidades fue definido manualmente a través de una inspección visual y posteriormente utilizados para implementar el modelo RAMMS. El área del dominio de modelación de Copiapó es aproximadamente de 28 km² y el área del dominio de modelación para Tierra Amarilla es aproximadamente 16 km² (Figura 2e).

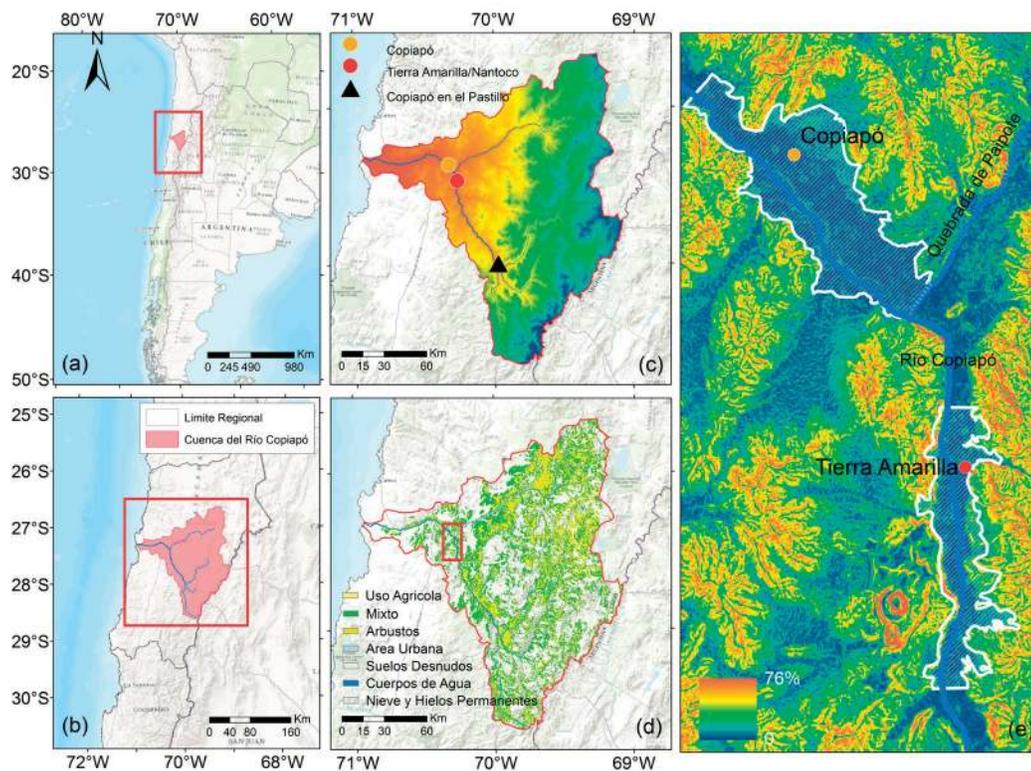


Figura 2 | (a) Ubicación de la Cuenca del Río Copiapó en Sudamérica; (b) Cuenca del Río Copiapó en la región de Atacama y sus principales ríos; (c) Modelo Digital de Elevación (MDE) de la cuenca (ASTER, ver Abrams, 2000; Tachikawa *et al.*, 2011), destacando las localidades donde se modeló la crecida aluvional y mostrando la ubicación de la estación fluviométrica Río Copiapó en el Pastillo; (d) Clasificación del uso de suelo en la cuenca basada en GLOBCOVER 2009 (Bontemps *et al.*, 2009), destacando en rojo el área comprendida por las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla; y (e) Dominios de modelación en los cuales se llevó a cabo la implementación del Modelo RAMMS para modelar la crecida aluvional de marzo de 2015. La leyenda representa las pendientes dentro del área comprendida por las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla.

Descripción del evento hidrometeorológico del 24-26 de marzo de 2015

Tal como se mencionó anteriormente, entre el 24 y 26 de marzo de 2015 se desarrolló una tormenta que generó abundantes lluvias en gran parte del desierto de Atacama, entre los 23°30' y 30°S (regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo). Este evento dio origen a flujos de detritos y barro que inundaron y afectaron con particular severidad la cuenca del río Copiapó. En la ciudad de Copiapó y el sector de Tierra Amarilla se registraron importantes daños en viviendas, donde las alturas de inundación llegaron incluso a superar los 2 m (ver Ferrando *et al.*, 2015; Izquierdo *et al.*, 2016).

La tormenta se desarrolló debido a un fenómeno que se registra con muy baja frecuencia en estas latitudes; se trata de un sistema de baja presión atmosférica atrapado frente a las costas de la región de Atacama (alrededor de los 25°S). Dicho sistema denominado “*cutoff-low*” es un sistema cerrado de baja presión que fue desplazado (*cutoff*) del flujo de vientos del oeste y se movió de manera independiente hacia las costas de la región de Atacama (Figura 3). Este fenómeno amplificó el flujo de vientos desde las costas del Sur de Perú y el Norte de Chile hacia Atacama, trayendo consigo un alto Contenido de Agua Precipitable (CAP). Los registros de CAP sobre las costas peruanas al momento del fenómeno hidrometeorológico se encontraban 20 mm arriba del normal climatológico (ver Barret *et al.*, 2016). Además, valores de CAP sobre la media histórica también fueron registrados en Antofagasta (Bozkurt *et al.*, 2016). Dichos fenómenos coincidieron con un calentamiento extremo de las temperaturas superficiales que se registró en el centro, sur y zona austral de Chile, incluso también alcanzando la Antártica Chilena (Barret *et al.*, 2016).

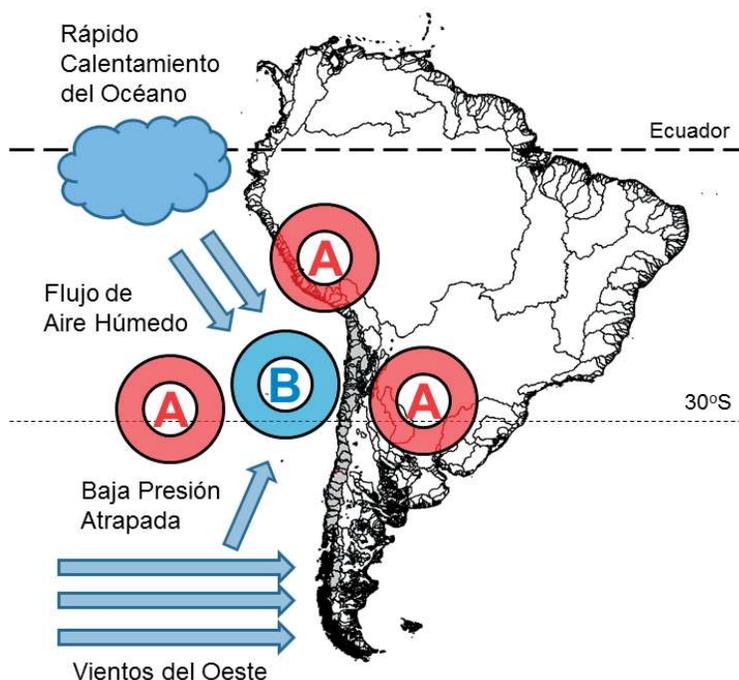


Figura 3 | Esquema que representa el *cutoff-low* atrapado frente a las costas de la región de Atacama y centrado alrededor de los 25°S. Se observa cómo el fenómeno propicia el flujo de humedad desde las costas del sur de Perú y Norte de Chile hacia la Región de Atacama. Fuente: Adaptado de Valdés-Pineda *et al.* (2017).

Eventos hidrometeorológicos durante el evento del 24-26 de marzo de 2015

Precipitaciones

Los registros pluviométricos son tomados a las 8:00 a.m. de cada día y representan la lluvia acumulada del día anterior. De acuerdo a esto, en la Cuenca del Río Copiapó cayeron en promedio 45 mm entre el 23 y el 26 de marzo, correspondientes a 13 estaciones pluviométricas (ver Figura 4). Las máximas acumulaciones diarias (~30 mm/día) se registraron durante los días 23 y 24 de marzo, especialmente concentradas sobre el sector precordillerano y cordillerano de la cuenca. Los datos satelitales TMPA

muestran un patrón similar en el cual es posible observar que durante la madrugada del 24 de marzo y durante la madrugada del 25 de marzo, la tormenta llegó a cubrir más del 60% del área de la cuenca y alcanzó acumulaciones de más de 40 (mm) en un periodo de tan sólo tres horas (Figura 4). Este tipo de eventos extremos ocurridos en la región de Atacama han revelado estar significativamente relacionados con la modulación multidecadal (40-60 años) de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), fenómeno que se podría ver potenciado significativamente durante su coincidencia con fases altas del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), o en su combinación con fases altas de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA) (Valdés-Pineda *et al.*, 2017).

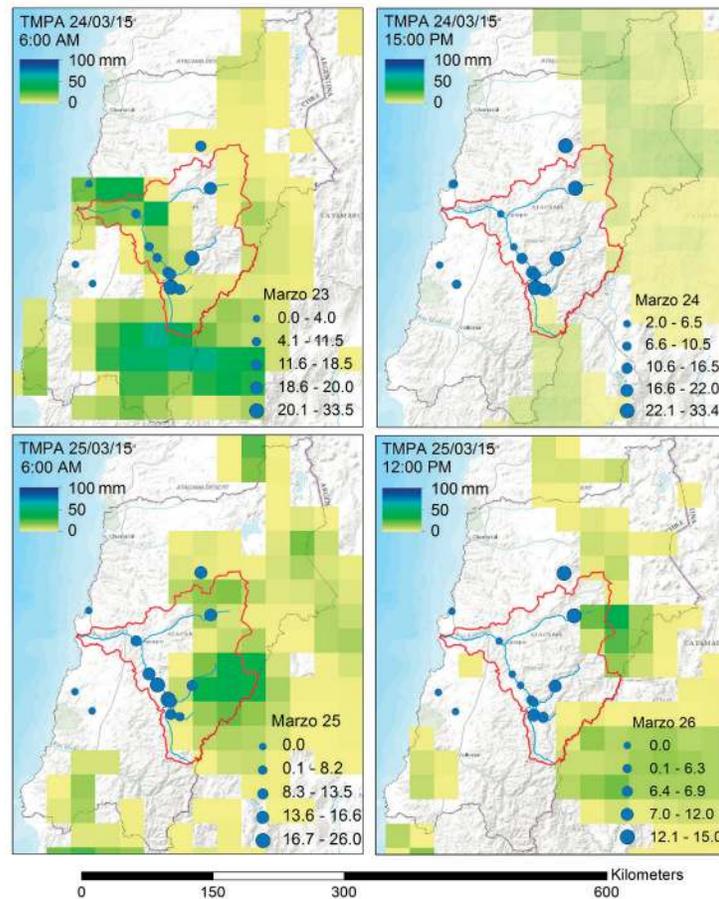


Figura 4 | Imágenes Satelitales TMPA (acumulaciones de 3 horas, en mm, a una resolución espacial de 25 km.) del evento hidrometeorológico del 24-26 de marzo de 2015, en la Cuenca del Río Copiapó. Los registros pluviométricos (círculos azules) presentan la acumulación diaria correspondiente a los días 23, 24, 25 y 26 de marzo de 2015.

Caudales

La información hidrográfica disponible para este evento fue obtenida de la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo (Figura 2c). Esta es la única estación con registros disponibles para la crecida de marzo de 2015. De acuerdo con la magnitud del evento, se observa claramente que el hidrograma registrado entre el 22 y el 30 de marzo de 2015 en dicha estación fluviométrica (Figura 5), no es representativo del volumen aluvional que afectó a los sectores de Copiapó y Tierra Amarilla. Estas diferencias se deben a que dicha estación de medición se encuentra localizada en la parte alta de la cuenca (28°S y 69.97°S) sobre los 1000 m.s.n.m. Por esta razón, el hidrograma de crecida de dicha estación fue sometido a un proceso de escalamiento lineal (ampliación de la escala de los caudales), cuyo objetivo fue aproximar los caudales reales de la crecida aluvional. El proceso es básicamente el establecimiento de una relación entre los caudales máximos observados aguas arriba de la cuenca con aquellos observados aguas

abajo de la misma (para mayores detalles ver Pizarro *et al.*, 2014). En primer lugar, se definió un valor representativo para el pico de la crecida aluvional (caudal máximo instantáneo) en ambos dominios de modelación, tomando los valores de referencia publicados por Naranjo y Olea-Encina (2015). De acuerdo a los autores, la mayor descarga instantánea ocurrida en el Río Copiapó fue estimada en al menos 1300 m³/s (alrededor de 1200 m³/s provenientes de la Quebrada Paipote y alrededor de 100 m³/s provenientes del Río Copiapó). Con esta información, se definió una proporción entre dichos caudales y aquellos registrados para la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo. Así, se pudo determinar que el pico de la crecida aluvional en la ciudad de Copiapó llegó a superar hasta en más de 30 veces los caudales máximos instantáneos observados en la estación Copiapó en El Pastillo. En el dominio de Tierra Amarilla, los caudales máximos instantáneos reportados para la crecida aluvional alcanzaron alrededor de los 110 m³/s, lo cual dejó de manifiesto una amplificación de alrededor de 2.75 veces con respecto a los caudales máximos instantáneos registrados en la estación Copiapó en El Pastillo. Dichas proporciones fueron utilizadas para ampliar la escala del hidrograma de Copiapó en El Pastillo y con dicha información, se generaron hidrogramas triangulares de crecida para dos escenarios de modelación (ver siguiente sección para mayores detalles) en ambos dominios. El escalamiento propuesto por Pizarro *et al.* (2014) se considera válido desde el punto de vista hidrológico, dado que al establecer una relación entre el caudal máximo instantáneo de una estación aguas arriba y una estación aguas abajo se minimizan los posibles efectos de laminación. Además, una de las ventajas del Modelo RAMMS es que permite aplicar el hidrograma de la crecida directamente en la entrada de cada dominio de simulación.

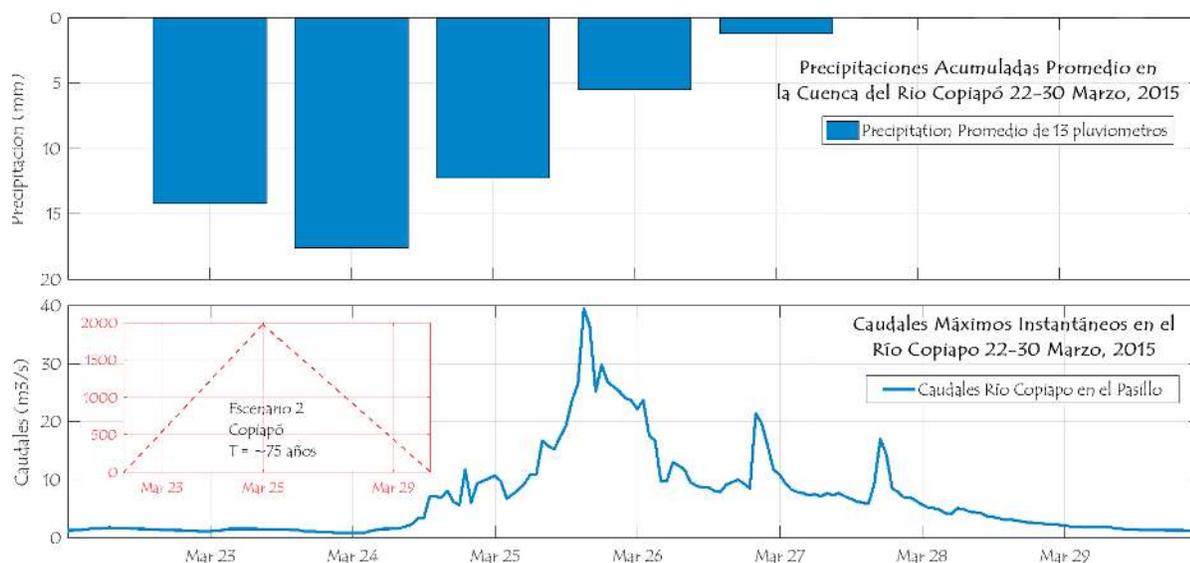


Figura 5 | Promedio de Precipitaciones Diarias Acumuladas (13 pluviómetros) y caudales máximos instantáneos registrados en la parte alta del Río Copiapó durante el evento hidrometeorológico extremo de marzo de 2015. Los registros fluviométricos de Río Copiapó en El Pastillo son consistentes con la precipitación promedio en términos de la relación precipitación-escorrentía, ya que se observa claramente la diferencia de picos entre el máximo de precipitación y el máximo de caudales. El gráfico en rojo representa un ejemplo de los hidrogramas triangulares generados para cada dominio de simulación cuyo máximo fue observado el día 25 de marzo de 2015.

Riesgo Hidrológico

Los caudales medios diarios históricos de la estación Copiapó en El Pastillo (1930-2016) fueron adicionalmente sometidos a un análisis probabilístico con el objetivo de determinar el periodo de retorno (T) asociado a la crecida aluvional de marzo de 2015. Los registros de dicha estación fueron ajustados con la Función de Distribución de Probabilidad Lognormal dado que presentó el mejor ajuste a los datos de caudal medio diario (ver Figuras 6a y 6b). Con esto, se logró determinar que la probabilidad de ocurrencia histórica del evento de marzo de 2015 es alrededor de 2.1% (Figura 6c), lo cual corresponde a un periodo de retorno de aproximadamente 48 años (Figura 6d). Cuando analizamos estos datos desde un punto de vista del riesgo hidrológico asociado logramos determinar que la probabilidad o riesgo de observar un evento de similares o mayores características en un periodo de 50 años es de alrededor de 65%. Ahora bien, cuando analizamos dicho riesgo para un periodo de 20 años, la probabilidad de ocurrencia disminuye a alrededor de un 35% (y disminuye a un 20% para un periodo de 10 años). Si bien esto deja de manifiesto que el periodo de recurrencia o retorno de dicho evento es de alrededor de 50 años, el riesgo de experimentar eventos de similares o

mayores características en periodos más cortos de tiempo es bastante alto; por lo tanto, y de acuerdo a estos resultados, fue razonable definir dos escenarios de modelación que permitieran establecer eventos extremos de menor frecuencia pero con mayor magnitud. Así, se definieron los caudales medios diarios asociados a periodos de retorno de 75 y 150 años para la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo, y con las proporciones obtenidas del escalamiento lineal, se extrapolaron los caudales máximos de la crecida aluvional asociados a periodos de retorno de 75 y 150 años en la ciudad de Copiapó y Tierra Amarilla (Tabla 1). Es importante agregar que en este último dominio el criterio utilizado fue distinto, dado que ante la presencia del Embalse Lautaro se decidió establecer caudales máximos asociados a una posible falla del sistema. De este análisis se desprendió que ante una posible rotura del embalse se esperarían caudales que se pueden amplificar fácilmente hasta en más de tres veces en comparación con los caudales publicados por Naranjo y Olea-Encina (2015). Por esta razón, se decidió calibrar el modelo RAMMS para caudales de crecidas de 400 y 600 m³/s en desmedro de los caudales presentados en la Tabla 1.

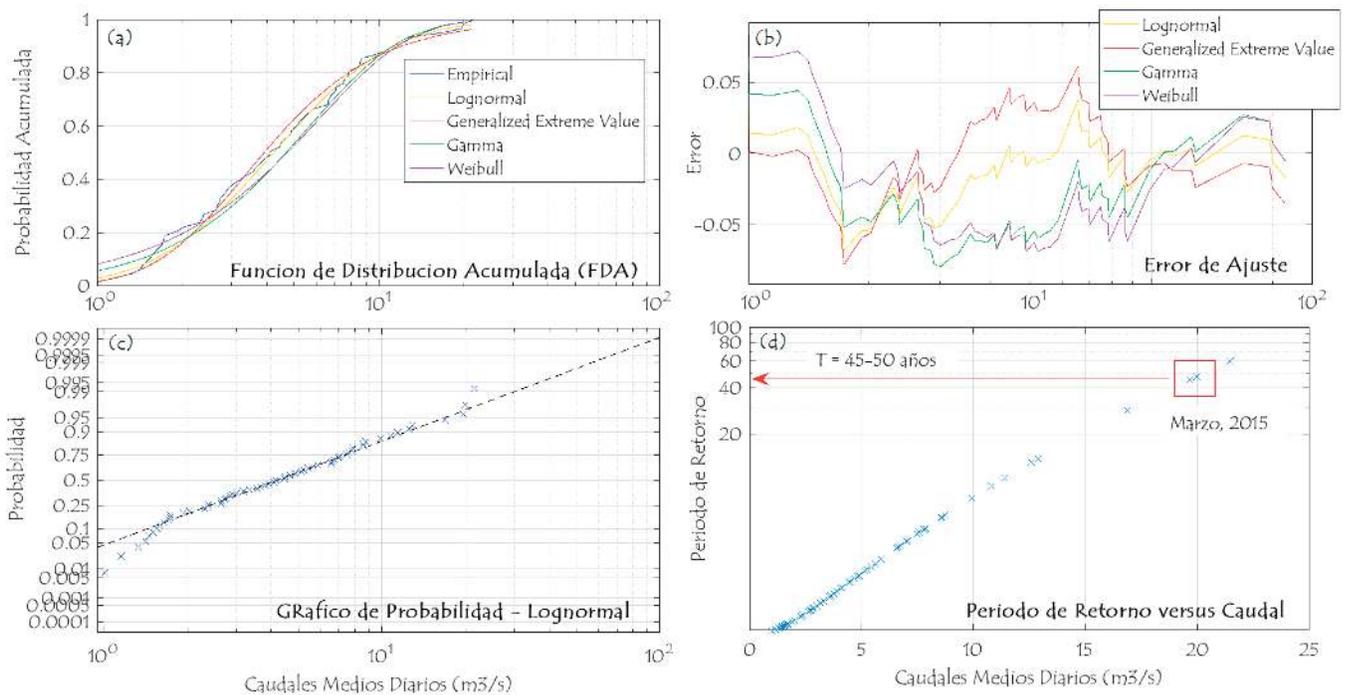


Figura 6 | (a) Funciones de Distribución Acumulada ajustadas sobre los datos históricos de caudales medios diarios en la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo; (b) Errores de ajuste de cada CDF ajustada; (c) Gráfico de probabilidad de los caudales medios diarios en la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo; and (d) Gráfico de periodo de retorno de los caudales medios diarios en la estación fluviométrica Río Copiapó en El Pastillo.

Tabla 1 | Resultados del escalamiento lineal de los caudales de crecida asociados a dos escenarios de modelación y periodos de retorno de 75 y 100 años.

	Observado	Escenario 1	Escenario 2
Periodo de Retorno (años)	48	75	150
Caudal Máximo Copiapó en El Pastillo (m ³ /s)	40	46	48
Caudal Máximo Dominio Copiapó (m ³ /s)	1300	1500	1800
Caudal Máximo Domino Tierra Amarilla (m ³ /s)	110	127	154

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO RAMMS

En la comunidad científica aún no existe un modelo ampliamente aceptado para la simulación de crecidas aluvionales. La aplicación del modelo *Rapid Mass Movement Simulation* (RAMMS) en las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla se justifica debido a que es una buena alternativa de base física para modelar crecidas aluvionales (Christen *et al.*, 2010). RAMMS es una generalización del modelo cuasi unidimensional discutido en Bartelt *et al.* (1999). El modelo se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes modificadas por la relación de fricción Voellmy-Salm, describiendo el flujo de detritos como un modelo continuo basado en la profundidad hidráulica (Christen *et al.*, 2010). La herramienta desarrollada por el Instituto Federal Suizo de Investigación (WSL/SLF) pretende ser una alternativa de predicción precisa de alturas de flujo, velocidades y presiones de los flujos de detritos, en base a un modelo digital del terreno (Raïmat *et al.*, 2013).

RAMMS es un modelo en tres dimensiones, donde x e y son direcciones del flujo paralelas a la superficie topográfica, mientras que $z(x,y)$ es la elevación perpendicular al perfil de la crecida aluvional (Figura 7). Cada dirección del flujo tiene un vector de aceleración gravitacional y un componente temporal a escala de grilla, cuyo valor depende de la resolución del modelo digital del terreno (MDE) que sea utilizado. La altura del flujo H y la velocidad media U son las principales variables que caracterizan el movimiento no uniforme. La integración del modelo sigue la teoría de Savage-Hutter para flujos poco profundos (Christen *et al.*, 2010).

RAMMS utiliza una grilla Euleriana como referencia (Quan, 2012) para mejorar la velocidad de simulación. Esto puede generar problemas de inestabilidad en terrenos con mucha pendiente lo cual no es el caso de los dominios seleccionados para la Ciudad de Copiapó y para el sector de Tierra Amarilla. Las ecuaciones de conservación de masa (Ecuación 1) y momento (Ecuaciones 2 y 3) son resueltas utilizando un esquema de volumen finito (Voellmy utiliza el esquema ENO o *Essentially Non-Oscillatory*). La integración temporal es obtenida con el esquema Runge-Kutta Heun (Christen *et al.*, 2010). Las ecuaciones diferenciales de conservación de masa y momento del modelo se definen a continuación:

$$\partial_t H + \partial_x (HU_x) + \partial_y (HU_y) = Q(x,y,t) \quad (1)$$

$$\partial_t (HU_x) + \partial_x \left(c_x HU_x^2 + g_z K_p \frac{H^2}{2} \right) + \partial_y (HU_x U_y) = S_{gx} - S_{fx} \quad (2)$$

$$\partial_t (HU_y) + \partial_y \left(c_y HU_y^2 + g_z K_p \frac{H^2}{2} \right) + \partial_x (HU_x U_y) = S_{gy} - S_{fy} \quad (3)$$

Donde,

- H es la altura del flujo aluvional y U es su velocidad promedio.
- S_g es la fricción gravitacional.
- S_f es la resistencia friccional o fricción total.
- K_p es el coeficiente de presión de la Tierra.
- c_x and c_y son parámetros de forma del perfil
- g_z es la aceleración de gravedad en la dirección normal (vertical).

RAMMS asume que el flujo aluvional es un continuo incompresible de densidad constante. Se asume que la superficie superior es libre (Christen *et al.*, 2010). La información vertical dentro del modelo de Voellmy-Salm está dada por el coeficiente de presión de la Tierra. Este un factor de proporcionalidad de las tensiones verticales y normales. El coeficiente modifica los gradientes de presión longitudinal que impulsan el flujo y se define utilizando la teoría de la presión de la Tierra de Rankine (Christen *et al.*, 2010).

El parámetro K_p es importante para determinar la interacción entre los cambios de velocidad, los cambios en las alturas, y la expansión longitudinal de la crecida aluvional. Por ejemplo, si la presión es activa (K_a), el flujo es dilatante y se contrae, dando lugar a un aumento de la velocidad. Una presión pasiva (K_p), donde el flujo es compresivo, causa una disminución de la velocidad del flujo aluvional.

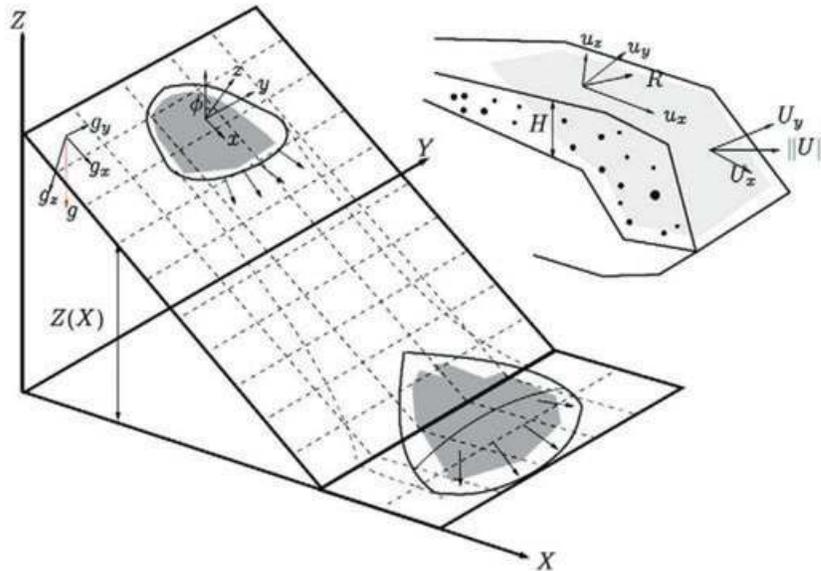


Figura 7 | Esquema de la topografía necesaria para implementar el modelo RAMMS, la cual debe ser proporcionada en coordenadas UTM, en donde X e Y son las coordenadas horizontales y Z es la elevación del terreno. La proyección de un MDE es asociada a una grilla para la simulación de RAMMS (adoptado de Christen *et al.*, 2010). R es la energía cinética aleatoria de la profundidad promedio de la crecida.

RAMMS utiliza la Ley de Fricción de Voellmy, el cual divide la resistencia friccional del aluvión en dos componentes (ver Ecuación 1):

1. Un coeficiente de fricción (μ), llamado coeficiente de fricción *Dry-Coulomb* que representa el estrés normal al movimiento del aluvión.
2. Un coeficiente de velocidad (ϵ), llamado coeficiente de fricción *Viscosa*, que representa el stress asociado a la viscosidad del aluvión.

$$S = \mu \rho H g \cos(\theta) + \frac{\rho g U^2}{\epsilon} \quad (4)$$

Donde:

- S es la resistencia friccional de la crecida aluvional (Pa).
- ρ es la densidad de la crecida aluvional (kg/m^3).
- g es la aceleración de gravedad (m/s^2).
- θ es la pendiente de la superficie topográfica donde la crecida es modelada (grados).
- H es la altura de la crecida aluvional (m).
- U es la velocidad de la crecida aluvional (m/s).

El estrés normal a superficie de contacto por donde circula la crecida aluvional es $\rho H g \cos(\theta)$ y puede ser resumido en un solo parámetro N. El modelo de Voellmy considera la resistencia de la fase sólida (μ), que puede ser representada como la tangente

del ángulo interno de la tensión de corte, y también considera la fase viscosa o turbulenta (ε), que es introducida usando argumentos hidrodinámicos. En conclusión, los coeficientes de fricción μ y ε son responsables del comportamiento de la crecida aluvional. El modelo de Voellmy ha sido implementado y calibrado en Suiza durante varios años. Por lo tanto, el modelo viene con un set de parámetros previamente calibrados que pueden ser utilizados para simulaciones de prueba. La versión más reciente del Modelo Voellmy (implementada en este estudio) ha sido modificada para incluir la Cohesión de la Crecida Aluvional de la siguiente manera (Ecuación 5):

$$S = \mu N + (1 - \mu)C - (1 - \mu)C \exp\left(-\frac{N}{C}\right) + \frac{\rho g U^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Donde:

- C es la cohesión de la crecida aluvional.
- N es el estrés normal a superficie de contacto por donde circula la crecida aluvional.

El modelo RAMMS asegura que $S \rightarrow 0$ cuando $N \rightarrow 0$ y $U \rightarrow 0$; por lo tanto, se incrementa la tensión de corte y la crecida se puede detener antes, dependiendo del valor de cohesión (C) asignado a la crecida aluvional. En general, se ha observado que los valores de C para una crecida aluvional pueden variar entre 0 y 2000 Pascales. La calibración del modelo RAMMS para crecidas aluvionales es mucho más difícil que la calibración de avalanchas, debido a que las crecidas aluvionales son un sistema de dos componentes (líquido y sólido). En este sentido, la mayor parte del comportamiento de la crecida aluvional requiere la interacción entre estos dos componentes. Por lo tanto, la definición de Voellmy es apropiada para modelar todos los aspectos de una crecida aluvional con las características de lo acontecido en la cuenca del Río Copiapó. El supuesto más importante y a la vez la mayor limitante de este modelo es que la porción relativa del componente sólido y del componente líquido es constante en el tiempo. Esto es claramente un aspecto por resolver en futuras modificaciones al modelo (Christen *et al.*, 2010).

PREPARACIÓN DE ARCHIVOS DE ENTRADA MODELO RAMMS

Datos Topográficos

Los datos topográficos del área en estudio representan la información de entrada más importante para utilizar el modelo RAMMS. Los resultados de la simulación dependen fuertemente de la resolución y precisión del modelo digital de elevación (MDE) utilizado. Un MDE con resolución espacial de 30 m fue adquirido para la cuenca del Río Copiapó. El MDE fue obtenido de *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) (Abrams, 2000; Tachikawa *et al.*, 2011), disponible en: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. De acuerdo a la grilla de elevación, en Copiapó existe una variación de alrededor de 150 m entre el punto más alto y el punto más bajo del dominio de modelación (350-504 m.s.n.m.). En Tierra Amarilla el gradiente elevacional es de más de 250 m (460-720 m.s.n.m.). En ambos sectores la simulación de la crecida aluvional se llevó a cabo para una longitud de aproximadamente 10 km tomando como referencia el perfil longitudinal del cauce principal en cada dominio de modelación (Figura 8).

Datos Hidrológicos

Las condiciones hidrológicas iniciales de la crecida aluvional fueron establecidas mediante el análisis de los hidrogramas disponibles y también considerando aportes de las quebradas y ríos sin estaciones de medición. En relación al caudal que entro a la ciudad de Copiapó, Naranjo y Olea-Encina (2015) establecieron que las inundaciones provenientes de la quebrada Paipote se estimaron en al menos 1200 m³/s. A este caudal se sumó lo aportado por el Río Copiapó, cuya descarga aluvional con árboles y elementos antrópicos fue estimada en al menos 110 m³/s, 10 km aguas arriba de la confluencia del río Copiapó con la quebrada Paipote. Por supuesto, este valor se podría haber incrementado considerablemente antes de llegar a la confluencia con la Quebrada

Paipote. Por lo tanto, en la entrada del dominio de Copiapó se utilizaron los caudales asociados a periodos de retorno de 75 y 100 años, y en Tierra Amarilla se utilizaron caudales de crecida de 400 y 600 m³/s. Con esto se otorgó un factor de seguridad para la determinación de los mapas de altura de inundación en ambas localidades.

Datos Post-Evento 24-26 de marzo de 2015

Información de las alturas de la crecida aluvional, así como de las alturas de sedimentación fueron obtenidas de Izquierdo *et al.* (2016) y Ferrando *et al.* (2015). Esta información permitió desarrollar la calibración del modelo para la posterior interpretación de resultados. Para el evento de marzo de 2015 los rangos de alturas de inundación registrados para Copiapó variaron entre 0.8 y 3 m. Por otra parte, en Tierra Amarilla las alturas de inundación de la crecida aluvional alcanzaron un rango entre 0.5 y 2 m. Los datos de entrada para la implementación y calibración del modelo RAMMS se listan en la Tabla 2.

Tabla 2 | Datos de entrada para la implementación y calibración del Modelo RAMMS.

Tipo de Datos	Fuente	Descripción
Topográficos	ASTER	Modelo Digital de Elevación de 30 m
Hidrogramas	DGA y estudios previos	Hidrogramas de las estaciones de medición disponibles en la cuenca
Alturas de Inundación	Estudios previos	Datos de alturas de inundaciones en Copiapó y Tierra Amarilla

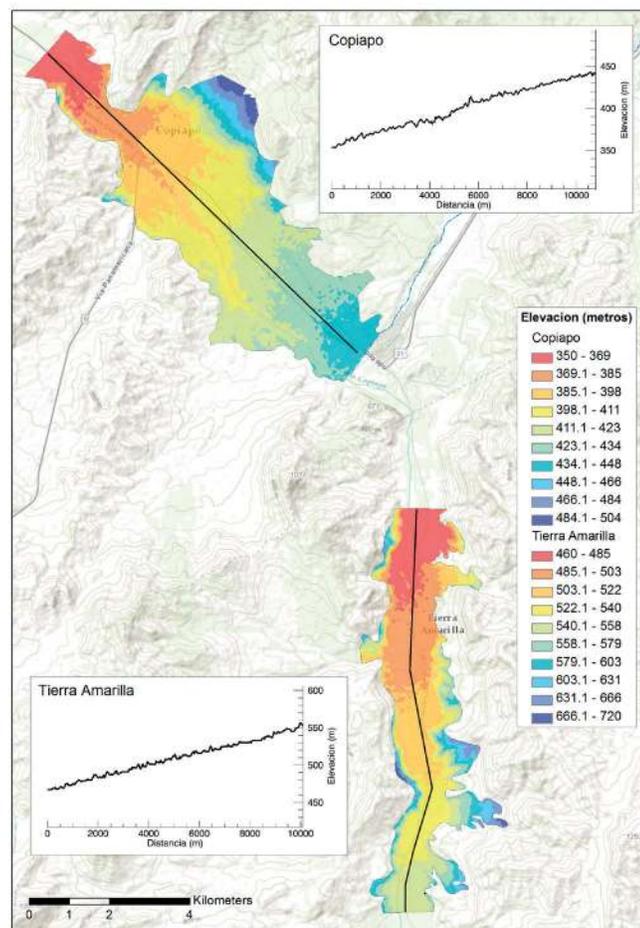


Figura 8 | Modelo Digital de Elevación ASTER de 30 m y perfiles longitudinales de elevación (m.s.n.m.) en ambos sectores.

CALIBRACIÓN DEL MODELO RAMMS

La calibración de los dos parámetros del modelo se realizó de manera manual, dado que RAMMS no posee calibración automática. Debido a esta limitante, se realizaron múltiples simulaciones cuyo objetivo fue determinar el mejor set de parámetros para modelar la crecida aluvional en Copiapó y Tierra Amarilla. La calibración se llevó a cabo con alturas de inundación (puntos distribuidos homogéneamente dentro de cada dominio de modelación), colectadas después de la crecida aluvional del año 2015 en Copiapó por Izquierdo *et al.* (2016), y en Tierra Amarilla por Ferrando *et al.*, (2015). En total se utilizaron once puntos con valores observados de altura de la crecida aluvional pertenecientes a ambos dominios de modelación. Los parámetros se variaron sistemáticamente de manera positiva (negativa) tomando en consideración incrementos (decrementos) porcentuales sobre los valores originales proporcionados por el modelo ($\mu = 0.2$; $\varepsilon = 200 \text{ m/s}^2$). Como medida de bondad del ajuste se consideró el error cuadrático medio. Por otra parte y tal como se mencionó anteriormente, dos escenarios de modelación fueron establecidos para ambos dominios de simulación. En cada escenario se realizó una calibración independiente modificando los valores de los parámetros del modelo, así como los datos de entrada asociados al hidrograma de la crecida. En total se realizaron alrededor de 10 simulaciones para cada escenario de modelación, lo que permitió llevar a cabo un análisis de sensibilidad de los parámetros y variables de entrada del modelo (ver Tabla 3 con resultados de la calibración). Este análisis tuvo como objetivo instaurar una aproximación realística de la crecida aluvional en ambos sectores. Las simulaciones fueron realizadas para un periodo de tres días y dado que los flujos aluvionales se caracterizan por tener una alta densidad de material ($\sim 2000\text{-}2500 \text{ kg/m}^3$) se seleccionó una densidad constante para cada escenario de $2500 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ y una cohesión de 0 (Pascal).

Tabla 3 | Datos de entrada y de salida para cada escenario seleccionado en la implementación y calibración del Modelo RAMMS.

Sector	Escenario	Datos de Entrada				Datos de Salida		
		μ	ε	Caudal Máximo de Simulación (m^3/s)	Esquema Numérico	Velocidad Máxima* (m/s)	Altura Máxima* (m)	Presión Máxima* (kPa)
Copiapó	1	0.05	500	1500	2° Orden	6.99	7.65	122.5
	2	0.05	800	1800	2° Orden	6.99	8.03	122.5
Tierra Amarilla	1	0.05	400	400	2° Orden	4.69	4.01	55.1
	2	0.05	600	600	2° Orden	5.84	5.69	85.4

*Representa el valor máximo encontrado durante la simulación dentro del dominio de cada sector.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propagación de la Crecida Aluvional

La mayor concentración del material aluvional se ubica a lo largo del cauce principal del Río Copiapó. A las 25 horas del primer día de simulación se observa que la crecida aluvional se encuentra distribuida en gran parte de las localidades de Copiapó y Tierra Amarilla. Al comparar el escenario 1 de simulación respecto del escenario 2, se observó que en Copiapó las alturas de inundación se incrementaron hasta en más de un 35% en los casos más significativos. En Tierra Amarilla, el caudal de la crecida aluvional se incrementó hasta en más de un 80% en los casos más significativos (Figura 9).

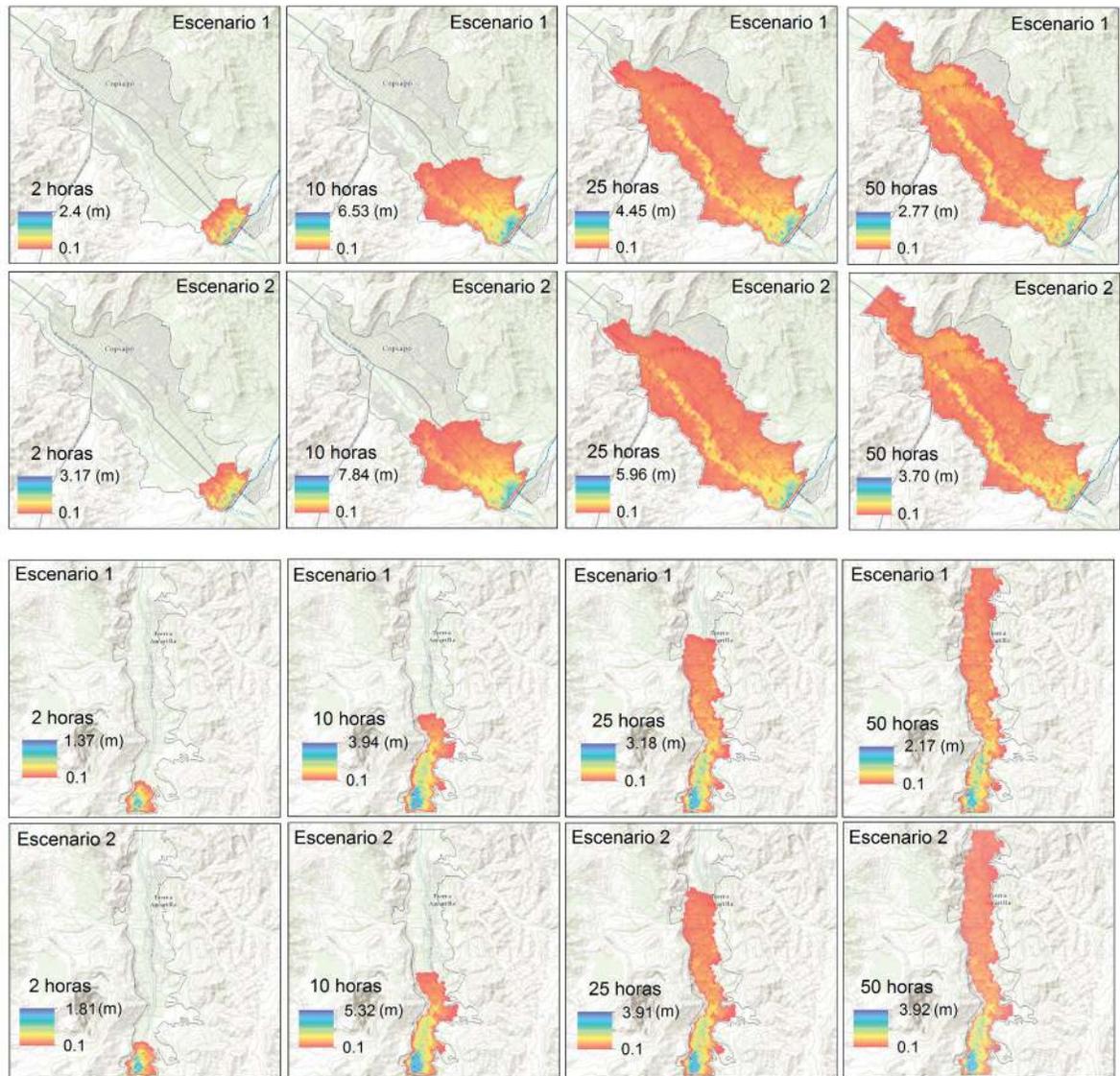


Figura 9 | Propagación de la crecida aluvional durante el periodo de simulación (3 días) en ambos dominios de simulación.

Identificación de Zonas de Riesgo de Inundación Aluvional

Los resultados del modelo permitieron la elaboración de mapas de riesgo para la crecida aluvional en ambos dominios de simulación (Copiapó y Tierra Amarilla), y para ambos escenarios de modelación. Es importante mencionar que dichos escenarios se encuentran asociados a la probabilidad de ocurrencia de crecidas aluvionales de similares características o superiores y tal como se mencionó anteriormente, dichas probabilidades se encuentran relacionadas con periodos de retorno de 75 y 150 años, respectivamente. En conocimiento de la frecuencia y magnitud de la crecida aluvional del año 2015, se llevó a cabo la modelación del flujo aluvional y se elaboraron mapas de altura de inundación para cada escenario. Esta asociación ha permitido establecer que los mapas no solo representan la altura de inundación, sino que también pueden ser utilizados para representar el riesgo de inundación aluvional. En dichos mapas también es posible apreciar claramente las zonas de conflicto, por ejemplo, aquellas con mayores afectaciones a la población. Para el modelo de Copiapó se observa que el mayor impacto se produce en la entrada de la ciudad, específicamente en la confluencia de la Quebrada Paipote y el Río Copiapó (Figura 10). En Tierra Amarilla se observa

un patrón similar, pero con alturas de inundación menores que las observadas en Copiapó (Figura 11). Ambos escenarios de modelación mostraron distribuciones espaciales similares para las alturas de inundación de la crecida aluvional. Sin embargo, en Copiapó, las mayores alturas de inundación se concentran a los largo del cauce principal del río Copiapó, y en Tierra Amarilla se observa una distribución más homogénea de la crecida alrededor del río. A pesar de lo mencionado, las alturas, las velocidades y los parámetros de fricción de la crecida aluvional presentaron valores mucho más altos en Copiapó, lo cual deja de manifiesto que la capacidad destructiva de dicha crecida aluvional es mayor que la crecida aluvional modelada para el sector de Tierra Amarilla. En efecto, la crecida aluvional modelada cubre gran parte de la ciudad de Copiapó, con alturas máximas de inundación que superaron fácilmente los 0.3 m. Solo una pequeña área localizada al norte de la ciudad no se vio afectada por la crecida aluvional simulada, debido que se encuentra emplazada a mayor altura que el resto de la ciudad (Figura 10). Por otra parte, en el sector de Tierra Amarilla la modelación aluvional inundó gran parte de la llanura de inundación del valle del río, afectando mayormente predios agrícolas y las viviendas que se encuentran al lado oeste del lecho del río Copiapó (Figura 11).

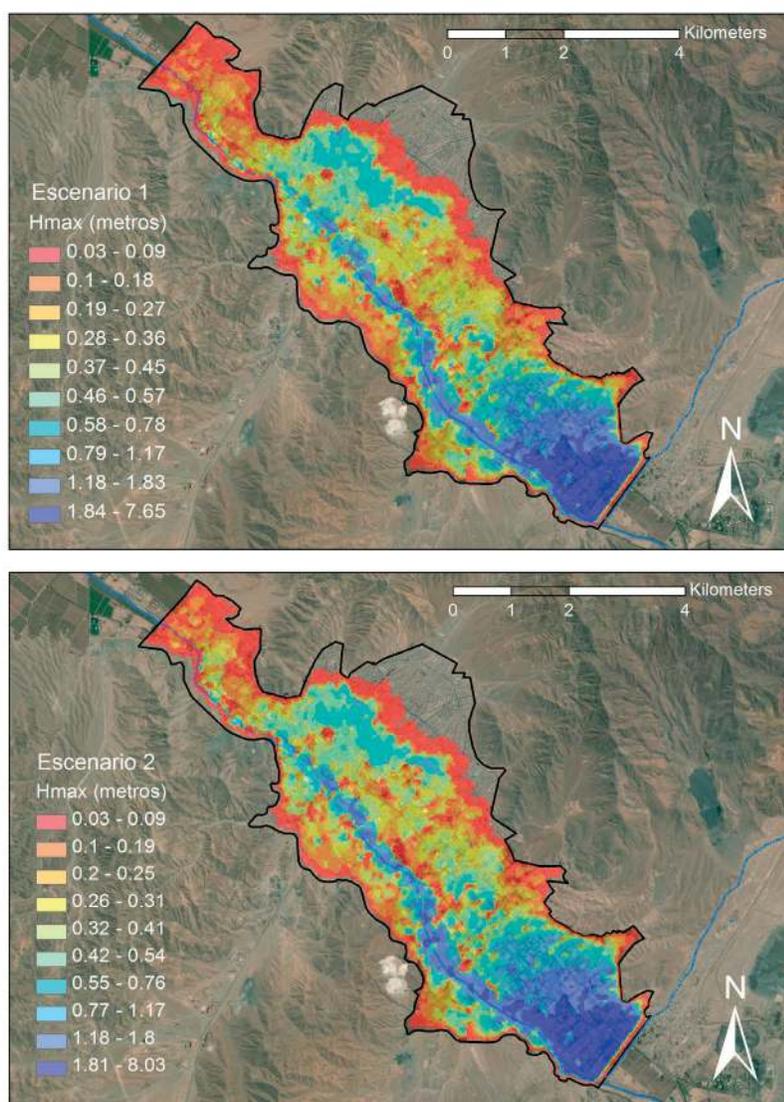


Figura 10 | Mapas de Riesgo de Inundación Aluvional en Copiapó para ambos escenarios de modelación. Escenario 1 para 1500 m³/s (T = 75 años). Escenario 2 para 1800 m³/s (T = 150 años).

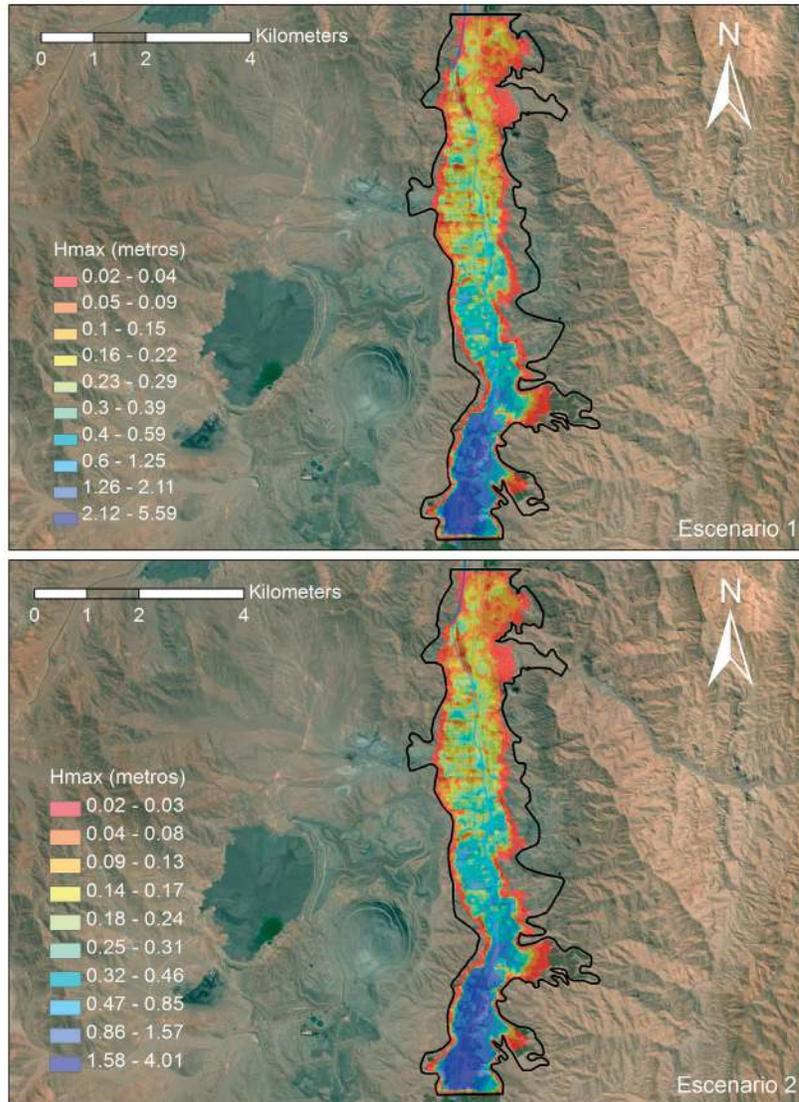


Figura 11 | Mapas de Riesgo de Inundación Aluvional en Tierra Amarilla para ambos escenarios de modelación. Escenario 1 para 400 m³/s. Escenario 2 para 600 m³/s.

Perfiles Longitudinales y Velocidades de la Crecida Aluvional

Las diferencias entre los escenarios utilizados para cada sector no fueron significativas en relación a la simulación de la distribución longitudinal de las alturas de inundación. En este sentido, los perfiles longitudinales de cada escenario de crecida aluvional revelaron que hay una tendencia a la disminución de la altura de inundación, aguas abajo de cada sector. Esta situación no es tan clara en Copiapó pero es evidente en Tierra Amarilla dado el mayor gradiente de elevación que tiene este dominio. Para ambas modelaciones las mayores alturas asociadas a cada perfil longitudinal se concentran principalmente durante los 2 primeros kilómetros de extensión longitudinal, con variaciones que pueden alcanzar más de 2 m de altura (Figura 12).

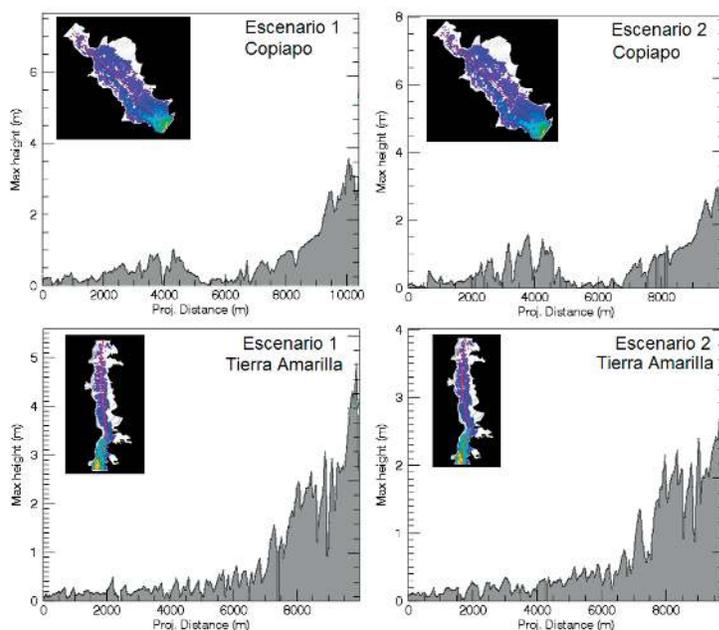


Figura 12 | Perfiles longitudinales de las crecidas aluvionales modeladas para Copiapó y Tierra Amarilla.

Los resultados del modelo también permitieron analizar las velocidades de propagación de cada crecida aluvional simulada (Figura 13). A diferencia de la altura de inundación, la velocidad se comporta de manera más homogénea a lo largo del dominio de cada sector. Como era de esperar, velocidades más altas se registraron en Copiapó, las cuales pueden llegar a superar los 3 m/s para cada perfil longitudinal analizado. Por otra parte, en Tierra Amarilla las velocidades de propagación de la crecida fueron generalmente menores a 2 m/s para cada perfil longitudinal analizado. Estas diferencias en las velocidades de propagación de la crecida aluvional en ambos sectores son consistentes con los resultados de altura de inundaciones, las cuales fueron también mayores para la crecida aluvional de Copiapó en comparación con Tierra Amarilla.

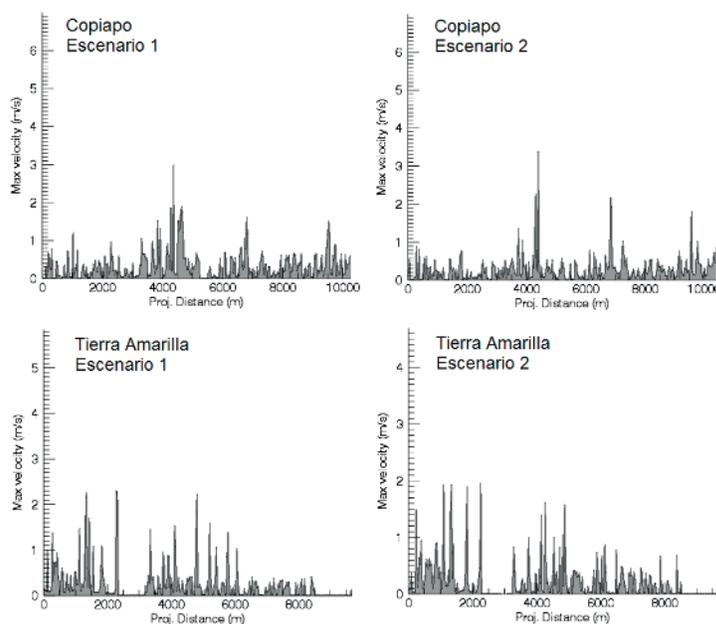


Figura 13 | Perfiles longitudinales de la velocidad (m/s) de las crecidas aluvionales modeladas para Copiapó y Tierra Amarilla.

CONCLUSIONES

A pesar de la limitada información disponible para calibrar el modelo, esta primera experiencia de modelación de las crecidas aluvionales en la cuenca del Río Copiapó ha demostrado ser exitosa. En relación a esta limitación, es importante mencionar que todavía existe espacio para mejoras en la modelación aluvional, las cuales estarán principalmente asociadas a la capacidad de generar nueva información de entrada para parametrizar el modelo en cada dominio de simulación. Por ejemplo, será importante contar con información más detallada de crecidas aluvionales pasadas que pueda ser utilizada en futuras calibraciones de modelos aluvionales en la cuenca del Río Copiapó. En el corto plazo, será necesario incorporar datos hidrológicos que contengan mayor detalle de las crecidas aluvionales en los sectores analizados (por ejemplo, caudales punta de las crecidas, velocidades del flujo aluvional, duración de los eventos, etc.). Asimismo, es necesario contar con Modelos Digitales de Elevación de alta resolución (2-10 m) en el mediano plazo, los cuales permitirán mejorar considerablemente el detalle de las simulaciones llevadas a cabo con RAMMS. En el largo plazo, será posible incorporar nuevos módulos de cálculo en RAMMS que permitan, por ejemplo, implementar un módulo de calibración automática del modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este manuscrito agradecen el financiamiento proporcionado por La Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente de Chile (CENMA) para llevar a cabo este estudio. Adicionalmente, se agradece la contribución de datos de alturas de inundación proporcionados por Tatiana Izquierdo (académica de la Universidad de Atacama) los cuales permitieron la calibración del modelo RAMMS.

REFERENCIAS

- Abrams, M. 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote sensing*, 21(5), 847-859. <https://doi.org/10.1080/014311600210326>
- Barrett, B. S., Campos, D. A., Veloso, J. V., Rondanelli, R. 2016. Extreme temperature and precipitation events in March 2015 in central and northern Chile. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(9): 4563-4580. <https://doi.org/10.1002/2016jd024835>
- Bontemps, S., Defourny, P., Bogaert, E. V., Arino, O., Kalogirou, V., Perez, J. R. 2011. *GLOBCOVER 2009-Products description and validation report*.
- Bozkurt, D., Rondanelli, R., Garreaud, R., Arriagada, A. 2016. Impact of warmer eastern tropical Pacific SST on the March 2015 Atacama floods. *Monthly Weather Review*, 144(11), 4441-4460. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0041.1>
- Christen, M., Bartelt, P., Kowalski, J., Stoffel, L. 2008. Calculation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain with the numerical simulation program RAMMS. In *Proceedings Whistler 2008 International Snow Science Workshop*, September 21-27, 2008 (p. 709).
- Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P. 2010. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- Ferrando, R., Fuentes, F., Coloma, F., Merino. 2015. *Efectos Geológicos del Evento Meteorológico del 24 y 25 de marzo De 2015: Fotointerpretación y Reconocimiento en Terreno del Efecto de Aluviones e Inundaciones en las zonas de Tierra Amarilla y Nantoco: Zona de Inundación y zonas propuestas para Evacuación, Campamento y Acopio*. SERNAGIOMIN.
- Izquierdo, T., Abad, M. Bernárdez, E. 2016. Catastrophic flooding caused by a mudflow in the urban area of Copiapó (Atacama Desert, northern Chile). *International Conference on Urban Risks*.

- MOP-DGA, C. I. 2004. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad*. Cuenca Quebrada de Tarapacá. Santiago, Chile.
- Naranjo, J. A., Olea-Encina, P. 2015. *Descargas aluviales durante la tormenta del desierto de Atacama en marzo de 2015, Chile*. SERNAGIOMIN.
- Pizarro-Tapia, R., Valdés-Pineda, R., Olivares, C., González, P. A. 2014. Development of Upstream Data-Input Models to Estimate Downstream Peak Flow in Two Mediterranean River Basins of Chile. *Open Journal of Modern Hydrology*, 4(4), 132-143. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.44013>
- Quan, L. 2012. *Dynamic numerical run-out modeling for quantitative landslide risk assessment*. Thesis of University of Twente, ITC, 206:1-237.
- Raïmat, C., Riera, E., Graf, C., Luis-Fonseca, R., Fañanás, C., Hurlimann Ziegler, M. 2013. Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el barranc de Portainé. In *VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*, 1131-1144. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Tachikawa, T., Hato, M., Kaku, M., Iwasaki, A. 2011. Characteristics of ASTER GDEM version 2. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International*, 3657-3660. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050017>
- Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., Diaz, H. F., Pizarro-Tapia, R. 2016. Analysis of spatio-temporal changes in annual and seasonal precipitation variability in South America-Chile and related ocean-atmosphere circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 36(8), 2979-3001. <https://doi.org/10.1002/joc.4532>
- Valdés-Pineda, R., Cañón, J., Valdés, J. B. 2017. Multi-decadal 40-to 60-year cycles of precipitation variability in Chile (South America) and their relationship to the AMO and PDO signals. *Journal of Hydrology*. (In Press). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.031>