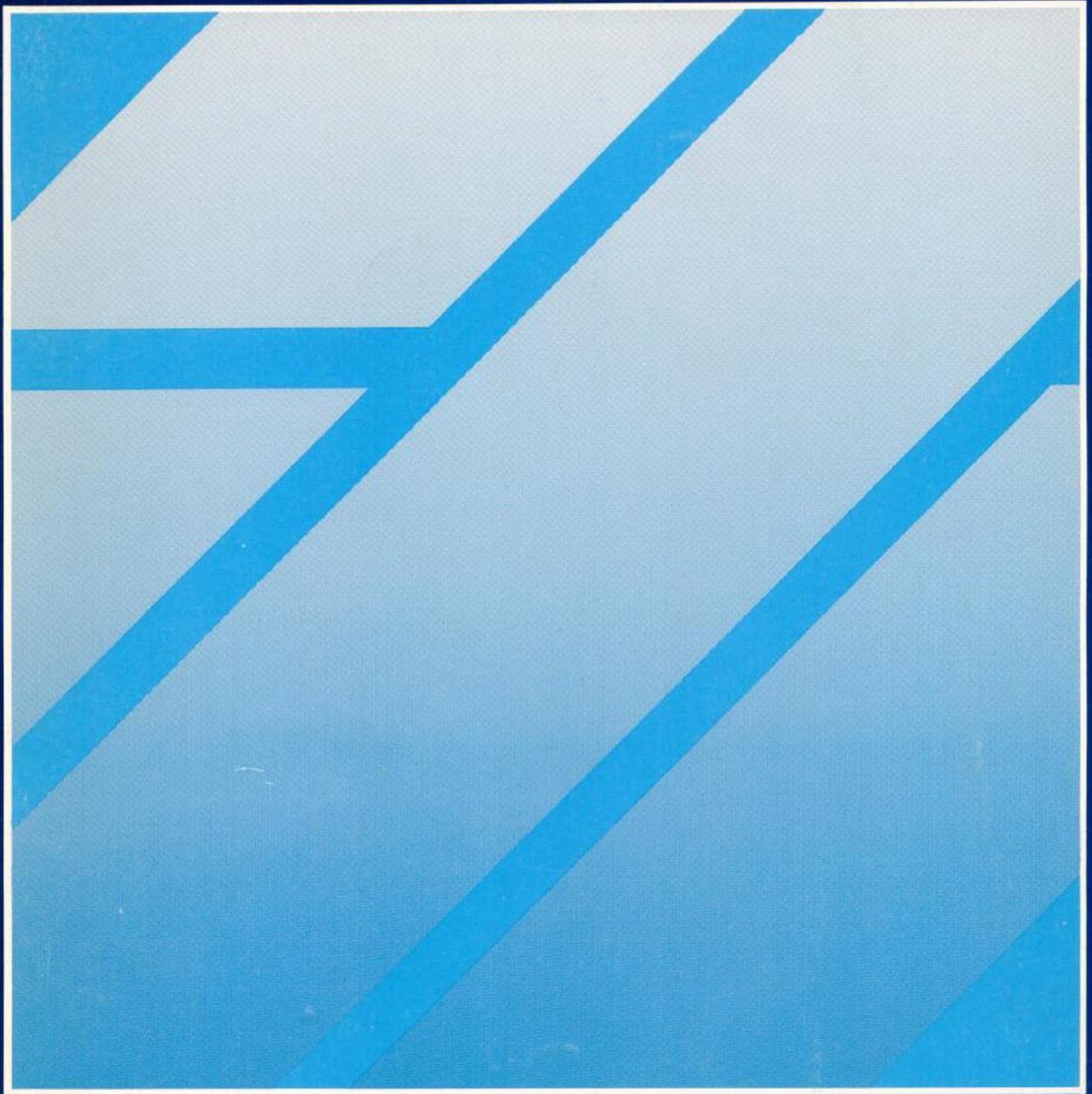




**Revista de la Sociedad Chilena  
de Ingeniería Hidráulica**



**ISSN 0716-3746 Volumen 40, Número 1, 2025**



REVISTA DE LA  
SOCIEDAD CHILENA DE  
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile – San Martín 352 – Fono 2 2698 4028 – Santiago CHILE

**DIRECTORIO SOCHID**

*Presidente:* Jorge Gironás L.  
*Vicepresidenta:* Pamela Muñoz  
*Tesorero:* Damaris Orphanópoulos S.  
*Directores:* Hernán Alcayaga S.  
Aldo Tamburrino T.  
Scarlett Vásquez P.  
*Secretario General:* Vicente Zuazo E.

**DIRECTORES HONORARIOS**

Francisco J. Domínguez S. (Q.E.P.D.)  
Horacio Mery M.  
Eduardo Varas C.  
Sergio Radrigán V. (Q.E.P.D.)  
Humberto Peña T.  
Ernesto Brown F. (Q.E.P.D.)  
Bonifacio Fernández L.  
Jorge Bravo S  
Luis Ayala R.  
Ludwig Stowhas B.  
Ricardo González V.  
José Vargas B.  
Luis Estellé A.  
Raúl Demangel C.

**EDITOR DE LA REVISTA**

Aldo Tamburrino Tavantzis  
[atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)  
San Martín 352, Santiago  
Fono 2 2698 4028  
[www.sochid.cl](http://www.sochid.cl)

*Imagen de la portada: Diseño usado en el primer número de la Revista en 1986*





## REVISTA DE LA SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### ÍNDICE

Editorial .....	1
Columna de Opinión: Hidráulica forense para la modelación numérica de aluviones Germán Aguilar Martorell, Albert Cabré Cano, Alex Garcés Catalán .....	3
Antecedentes de algunos fenómenos aluvionales en Chile Alejandro López Alvarado .....	7
Catastro y características de flujos de detritos en las regiones de Arica y Parinacota y de Antofagasta Eleonora Muñoz Morales, Enrique Opazo Castro, Natalia Garrido Urzúa .....	21
Aluvión de El Carmen 2024, Provincia del Huasco. Análisis meteorológico desde una perspectiva observacional y numérica Miguel Lagos-Zúñiga, Marcia Paredes, Diego Pinto, Alex Garcés, Santiago Montserrat .....	37
Exposición de infraestructura crítica y estimación de costos de reconstrucción en áreas afectadas por los aluviones de marzo 2015 en la cuenca del Salado: Análisis integrado de la información capturada por SERNAGEOMIN. Natalia Garrido Urzúa, Hugo Neira Santander .....	57
Aplicación y validación del software faDebrisFOAM en quebrada La Plaza, Atacama, mediante datos de terreno. Alex Garcés, Iván Campos, Santiago Montserrat, Aldo Tamburrino .....	77
Desafíos en la experimentación física de aluviones: Análisis del caso quebrada de Macul en Chile Jaime Cotroneo .....	95
Hidro-Grafía Aldo Tamburrino Tavantzis .....	111



## EDITORIAL

El 25 de marzo de cumplieron 10 años del evento meteorológico que generó una gran cantidad de aluviones en el norte del país, entre las regiones de Coquimbo y Antofagasta. Por esta razón, la Revista decidió conmemorar dicho evento con un número especial, dedicado exclusivamente a flujos detríticos. Es así como se incluyen una columna de opinión y seis artículos sobre el tema, los que incluyen catastros y registros de aluviones acaecidos en Chile, análisis meteorológico de un evento, modelación física y numérica, etc. El Editor agradece a todos quienes se hicieron partícipes de esta conmemoración y contribuyeron con sus escritos.

Este año se desarrollará la actividad bianual más importante de nuestra Sociedad, el XXVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Organizado por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción, tendrá lugar de manera presencial entre el 20 y 25 de octubre en dicha ciudad. Esperamos que esta actividad sea tan exitosa como la de 2023 en Valdivia.

Como siempre, agradeceremos la difusión de la Revista, cuyos números anteriores pueden descargarse del sitio web de la SOCHID, [www.sochid.cl/publicaciones-sochid/revista-sochid/](http://www.sochid.cl/publicaciones-sochid/revista-sochid/)

Aldo Tamburrino Tavantzis  
Editor



## *COLUMNA DE OPINIÓN*

### **HIDRÁULICA FORENSE PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DE ALUVIONES**

La modelación numérica de flujos de detritos se ha vuelto la herramienta más utilizada para predecir la peligrosidad de los aluviones y la afectación que generan en la población y la infraestructura. Esta herramienta permite estimar alturas y velocidades de escurrimiento, fuerzas de impacto y alcance de los aluviones lo que permite una gestión preventiva de la amenaza aluvional. Estos resultados resultan clave para el diseño de obras de mitigación, la implementación de una planificación urbana consciente de esta amenaza y la comunicación de protocolos adecuados ante una emergencia. Sin embargo, para que esta herramienta se utilice correctamente, es necesario estimar acertadamente variables de entrada al modelo como el hidrograma del aluvión, su concentración volumétrica y una ley de resistencia acorde al tipo de flujo.

Desafortunadamente, la observación y medición de las variables durante un aluvión es poco usual, o desde otro punto de vista, afortunadamente, ya que implica un riesgo para el observador. En consecuencia, la caracterización de eventos pasados suele constituir la principal fuente de información para verificar y mejorar la capacidad predictiva de los modelos numéricos y entender características críticas de los aluviones. Así es como, una caracterización hidráulica forense de los aluviones resulta la mejor manera para desentrañar las variables que gobiernan los flujos que componen un aluvión, y que tarde o temprano volverá a ocurrir. La correcta caracterización de estas variables en la modelación numérica mejorará el ajuste de los modelos a las condiciones naturales de las zonas propensas a la amenaza aluvional.

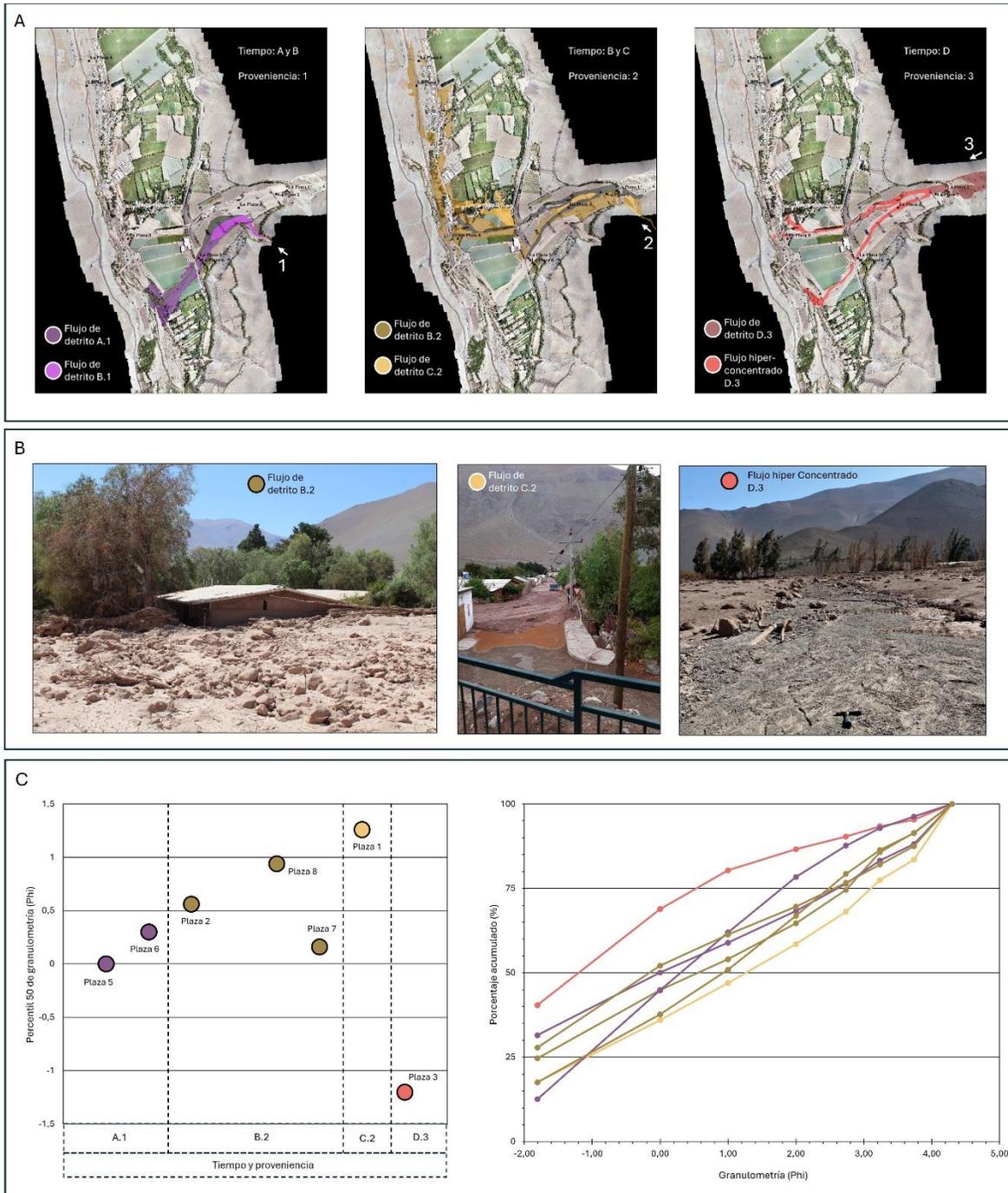
Primero, nos gustaría definir qué entendemos por la caracterización hidráulica forense de los aluviones. Entendemos una caracterización forense como un procedimiento que lleva a cabo un profesional de las ciencias de la tierra en la búsqueda de evidencias y elementos en un paisaje recientemente afectado por un aluvión y que ayude a discriminar los tipos de flujos involucrados y su dinámica. Esta definición trae consigo dificultades inherentes para la aplicación de este procedimiento. En primer lugar, para no perder evidencia, se requiere que la caracterización se desarrolle con premura una vez ocurridos los aluviones. Esto no es algo trivial, dada la pérdida de conectividad durante los aluviones y la rápida respuesta de los organismos de emergencia que alteran la “escena del crimen”. En segundo lugar, es crítico

conocer cuáles son las evidencias que se deben observar, medir y catastrar durante el procedimiento. Estas evidencias permiten, en conjunto, inferir las variables necesarias para la modelación numérica certera de los aluviones.

Los aluviones ocurridos en Atacama en marzo de 2015 resultaron en una catástrofe hace ya diez años, pero también fueron una oportunidad para desarrollar una caracterización hidráulica forense con el fin de inferir variables de los flujos que luego fueron usados en la modelación numérica. Aluviones posteriores han ayudado a refinar el procedimiento de caracterización forense, y validarlo considerando el ajuste de las modelaciones a los nuevos eventos sucedidos con posterioridad. La caracterización debe jerarquizar y estandarizar la búsqueda de evidencias en el paisaje “aluvionado”, y evitar los sesgos que pueden darse, por ejemplo, derivados por la oportunidad de acceso dentro un territorio recientemente afectado por aluviones, es decir, tener claridad sobre qué buscar y dónde ir a buscar las evidencias en un escenario de desastre. Además, elimina sesgos que se dan por los enfoques particulares que pueden tener distintos profesionales, es decir un protocolo claro a seguir para seres que por naturaleza científica suelen ser diversos, y probablemente impresionables ante un magno espectáculo dejado por la naturaleza.

El procedimiento para hacer una caracterización hidráulica forense debería iniciarse con en el mapeo de las diferentes formas deposicionales y erosivas generadas por un aluvión con el objetivo de identificar área, alcance y volumen (Figura 1A). En segundo lugar, las relaciones de contacto entre los distintos depósitos y formas erosivas permiten realizar una cronología de las diferentes oleadas de flujos (Figura 1B). Finalmente, el análisis sedimentológico, tanto in situ como en laboratorio, permite definir facies sedimentarias para inferir la concentración volumétrica de sedimentos en las distintas oleadas de flujos (Figura 1C). Fundamentos, resultados, limitaciones y discusiones en torno a la caracterización hidráulica forense (Aguilar et al. 2020; Cabré et al., 2020, 2025a, 2025b), y su aplicación en la modelación de los aluviones (Garcés et al., 2022) las pueden encontrar en artículos publicados por nuestro grupo de trabajo.

Nos gustaría terminar destacando una de las tantas enseñanzas dejadas por la caracterización hidráulica forense de los aluviones de hace diez años en Atacama. Los aluviones se desarrollan usualmente con varias oleadas de flujos que pueden variar desde flujos de barro y detritos, hasta flujos hiper-concentrados, y cuyas características cambian de acuerdo con la disponibilidad de agua y sedimento, así como la granulometría y composición del sedimento. Las diferentes oleadas varían en el tiempo de ocurrencia dentro de la tormenta, y además dependen del área de donde provienen los flujos dentro de la cuenca. Por ejemplo, clave resulta considerar en la modelación numérica las diferencias reológicas de las distintas oleadas y que quedan muy bien representadas en el paisaje luego de un aluvión (Garcés et al., 2022). La modelación numérica que no considera este aspecto cae en un simplismo, que está lejos de la realidad. La caracterización hidráulica forense de un aluvión, junto con una instrumentación hidrometeorológica densa y de resolución al menos horaria, será clave para ahondar más en este tema.



**Figura 1:** Datos de terreno para la caracterización hidráulica forense de un aluvión. A) Mapa con la diferenciación del tipo de flujo y la proveniencia de las oleadas asociadas al aluvión que afecto a la localidad de El Transito a finales de enero del año 2020. B) Fotografías que ilustran las diferentes facies sedimentarias identificadas considerando los depósitos y formas erosivas de cada oleada. C) clasificación granulometría de los sedimentos para cada oleada donde se indica el tamaño de sedimento para el percentil 50 para diferentes muestras y el porcentaje acumulado de los distintos tamaños.

## REFERENCIAS

- Aguilar, G.; Cabré, A.; Fredes, V.; Villela, B. 2020. Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: an assessment of magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flows generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, 1247–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1247-2020>
- Cabré, A.; Aguilar, G.; Mather, A.; Fredes, V.; Riquelme, R. 2020. Tributary-junction alluvial fan response to an ENSO rainfall event in the El Huasco watershed, northern Chile. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. <https://doi.org/10.1177/0309133319898994>
- Cabré, A.; Aguilar, G.; Colombo, F.; Antinao, J.L.; Iturra, D. 2025a. Flow-type controls on tributary alluvial fan formation along the Andes (18-34°S). *Journal of South American Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105442>
- Cabré, A.; Garcés, A.; Aguilar, G.; Montserrat, S.; Beriain, E.; Alfaro, F. 2025b. Construction, destruction and fan-river coupling dynamics during two consecutive debris flow events in an arid fluvial system. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.70041>
- Garcés, A.; Zegers, G.; Cabré, A.; Aguilar, G.; Tamburrino, A.; Montserrat, S. 2022. A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* <https://doi.org/10.5194/nhess-22-377-2022>

**Germán Aguilar Martorell**

german.aguilar@amtc.uchile.cl

Advanced Mining Technology Center

Universidad de Chile

**Albert Cabré Cano**

Albert.Cabre@lmu.de

Department of Earth and Environmental Sciences

Ludwig-Maximilians-Universität München

Germany

**Alex Garcés Catalán**

agarces@uchile.cl

Advanced Mining Technology Center

Universidad de Chile

# ANTECEDENTES DE ALGUNOS FENÓMENOS ALUVIONALES EN CHILE

ALEJANDRO LÓPEZ ALVARADO

[ala@vtr.net](mailto:ala@vtr.net)

## RESUMEN

Se presenta en este trabajo antecedentes recopilados de estudios desarrollados a raíz de tres eventos aluvionales acaecidos en Chile entre 1987 y 1993. Los desastrosos efectos y consecuencias de estos fenómenos dieron origen tanto a estudios e investigaciones académicas como observaciones en terreno, lo que permitió caracterizar estos fenómenos y proponer criterios y bases para el dimensionamiento de estructuras destinadas al control y mitigación de sus efectos. En esos estudios se recopiló información geológica-geomorfológica, meteorológica, hidrológica, hidráulica y sedimentológica de los eventos. Se incluye también información de los daños causados y de las soluciones adoptadas para minimizar el efecto de posibles nuevos eventos en estas zonas, contribuyendo de este modo a aportar con antecedentes que permitan comparar situaciones diversas de generación de aluviones.

**Palabras claves:** Aluviones; Flujos detríticos; Aluvión de río Colorado; Aluvión de Antofagasta; Aluvión de Macul

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile, por ser un país andino con una extensión territorial que abarca desde la zona desértica del norte hasta la zona húmeda austral pasando por una zona semiárida central, ha sido escenario a través de este extenso territorio, de varios eventos aluvionales los cuales han dado origen a diversos estudios geológicos, hidrometeorológicos e hidráulicos relacionados con la ocurrencia de estos fenómenos, sus características y consecuencias. Interesante es el hecho que ellos se han producido a lo largo de todo el país no obstante la diversidad del clima y características geomorfológicas. Diversos trabajos desarrollados fueron reportados por Ayala (1996) entre los que destaca el de Goluveb (1969), quien propuso un mapa que zonifica el país en relación con la generación de avalanchas y corrientes de barro.

El desarrollo urbano motivado por el crecimiento de las poblaciones en los diferentes sectores del país y las particulares características del clima y de la geografía local llevó a las autoridades de la época a estudiar soluciones a los riesgos que se presentan en asentamientos humanos enclavados en torno a zonas potencialmente riesgosas. Esta situación motivó el

desarrollo de investigaciones y estudios sistemáticos del fenómeno aluvional, recopilándose información de terreno e incentivando el desarrollo de estudios teóricos y experimentales. Muchos de estos estudios se enfocaron en relacionar la ocurrencia de aluviones con eventos meteorológicos que pudieran ser desencadenantes de flujos detríticos en sectores con determinadas características geológicas y geomorfológicas, así como conocer el mecanismo de generación y transporte de los flujos aluvionales y la cuantificación de sus efectos con el objeto de proponer obras de mitigación de sus consecuencias.

Particularmente se puso atención en tres eventos cuyos efectos han sido tal vez los de mayor gravedad por sus consecuencias en pérdidas de vidas humanas y daños materiales, dos de los cuales ocurrieron en zonas densamente pobladas. Estos eventos son los que serán presentados a continuación, tomando como referencia el trabajo reportado por Ayala (1994).

## **2. ALUVIÓN DEL RÍO COLORADO (1987)**

El río Colorado se ubica en la cuenca alta del río Maipo, al este de la ciudad de Santiago siendo uno de sus afluentes el estero Parraguirre. En la cabecera de este estero, en una cota cercana a los 4500 msnm y a unos 100 km al este de Santiago, se produjo un desprendimiento masivo de rocas seguido de un aluvión de gran magnitud, el cual causó víctimas fatales y severos daños en una central hidroeléctrica en funcionamiento y en obras de otro complejo hidroeléctrico en construcción ubicados a unos 30 km aguas abajo del punto origen del fenómeno.

### **2.1 Geología, Geomorfología y Clima**

Estudios efectuados por Casassa (1993) determinaron que el área donde se generó el deslizamiento rocoso está constituida por rocas sedimentarias, incluyendo yeso con estructura detallada desconocida. Estas rocas tienen una inclinación de unos 80° y se encuentran muy fracturadas y desgastadas a causa de agentes atmosféricos. La geomorfología de la zona presenta un relieve montañoso con cumbres por sobre los 6000 msnm, valles estrechos de fuertes pendientes con fondos rocosos cubiertos por material de arrastre de gran tamaño y granulometría extendida que va desde sedimentos finos hasta grandes bloques rocosos. Se encuentra también en esta zona numerosos glaciares en las cabeceras de los cauces fluviales. El clima de la zona es semiárido, siendo el verano una estación bastante seca y con precipitaciones intermitentes en invierno, las que por sobre los 2000 msnm son generalmente de tipo nival. Con la información disponible en la época del estudio se tiene que la precipitación anual, en promedio, es cercana a los 350mm.

### **2.2 Origen y Característica del Aluvión**

Ayala (1994), reporta que presumiblemente la causa del fenómeno se debió a un inusual aumento del contenido de agua y presión de poros de una masa rocosa muy meteorizada y fracturada a causa de un proceso acelerado de fusión de nieves originado por las altas temperaturas del aire que se presentaron en esos días. Hay que destacar que la isoterma 0 °C, cuya ubicación normal en verano es inferior a los 4200 msnm, se situó en los días previos al

aluvión en la cota 5100 msnm. Informaciones recopiladas señalan que, a las 10 AM, una media hora antes del suceso, la temperatura a los 4600 msnm era de 16 °C y en zonas vecinas se detectó en los días previos un aumento de 5 °C en relación con la media de semanas anteriores. Por otra parte, el invierno de 1987 fue excepcionalmente lluvioso por lo cual la acumulación de nieve fue importante.

A las 10:33 AM del 29 de noviembre se produjo entre las cotas 4500 msnm y 4000 msnm un desprendimiento de rocas el cual, de acuerdo con Casassa (1993), habría movilizó un volumen del orden de 5,5 millones de m<sup>3</sup>, parte de un afloramiento rocoso. Esta masa rocosa descendió por una pendiente de unos 85% hasta llegar al fondo del valle a la cota 3500 msnm. Al impactar esta masa de rocas y hielo el fondo del valle y escurrir hacia aguas abajo se generó una corriente de detritos que incorporó agua de la nieve del sector, del hielo de un glaciar cuyo frente fue pasado a llevar por la corriente, agua contenida en el suelo y subsuelo y la del propio estero Parraguirre. El flujo detrítico siguió por el cauce de este estero y 1,3 km antes de su desembocadura en el río Colorado desbordó parcialmente hacia este cauce.

Testigos señalaron que en el Colorado el aluvión se presentó en la forma de tres a cuatro ondas sucesivas. La segunda fue la más destructiva y se observó 23 minutos después de la primera. Las trazas dejadas por el flujo en las laderas (Figura 1), permitieron estimar que el flujo alcanzó alturas del orden de 30 m en el tramo superior del río Colorado. En el origen del fenómeno se estimó que el flujo adquirió una velocidad entre 20 y 30 m/s, mientras que en los primeros 14 km recorridos por el Parraguirre, con pendiente del 7%, la corriente estimada en unos 10.000 m<sup>3</sup>/s, tuvo velocidades medias más altas que 15 m/s. En este tramo, al incorporar agua y material fino se tuvo un flujo de detritos macroviscoso. Las velocidades en el tramo superior del río Colorado, donde estaban las obras de la Central hidroeléctrica Alfalfal, fueron estimadas entre 8 a 10 m/s. Aguas abajo de esta zona y hasta la confluencia del Colorado con el río Maipo, tramo de pendiente media de alrededor de 2%, la velocidad se estimó del orden de los 4 m/s.

La estimación del volumen de material incorporado por el aluvión presenta valores inciertos, ya que mientras algunos investigadores lo han estimado en unos 24 millones de m<sup>3</sup>, para otros no fue más de 7 millones de m<sup>3</sup>. Esta última cifra está asociada a un hidrograma medido en una estación fluviométrica ubicada unos 200 km aguas abajo y según Ayala (1994), parece ser la más razonable ya que, considerando una concentración volumétrica media alrededor del 60%, el volumen de sedimento del flujo detrítico sería de unos 4,2 millones de m<sup>3</sup>, lo que correspondería a un 76% del volumen de material desprendido en el origen del fenómeno. Se ha concluido, no obstante, las justificadas incertidumbres, que la concentración de sólidos debe haber sido cercana al 60%, considerándose entonces que la corriente hidrodinámicamente se presentó como un flujo macroviscoso sin erosión del lecho.

En cuanto a los sedimentos depositados, la granulometría de estos observada en la junta del estero Parraguirre y el río Colorado, presentó 5% de clastos y fragmentos de roca de hasta 2 m de diámetro, 50% de grava con diámetros comprendidos entre 10 y 300 mm, 30% de arena y 15% de limos y arcilla. Cabe consignar también que antes del aluvión una roca de grandes dimensiones (de unos 20 m de largo y más de 10m de alto) que bloqueaba la desembocadura

del estero Parraguirre, fue movilizada varios kilómetros aguas abajo (Figura 2).



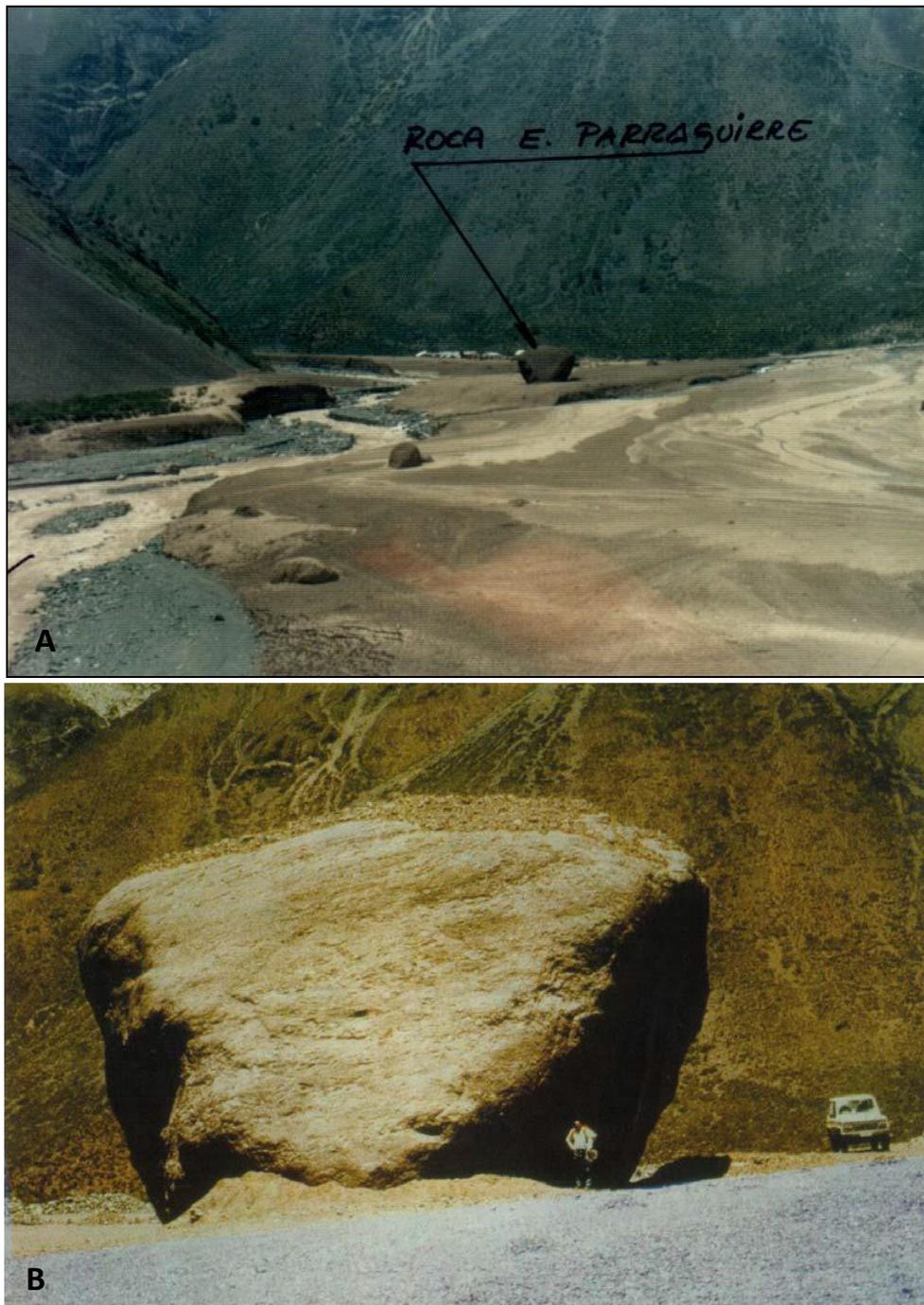
**Figura 1.** Trazas del aluvión. Río Colorado, noviembre de 1987.

### **3. ALUVIONES DE ANTOFAGASTA (1991)**

La ciudad de Antofagasta se encuentra ubicada en la II Región de Chile en la zona norte, y durante el anochecer del día 17 de junio y las primeras horas del siguiente, fue afectada por un temporal de viento y lluvia, el cual tuvo desastrosas consecuencias en la ciudad de Antofagasta. Rodean a la ciudad numerosas quebradas por las cuales escurrieron torrentes de agua y barro que desembocaron violentamente en la ciudad misma arrasando todo lo que encontraron a su paso. A raíz de los lamentables resultados de este evento se desarrollaron numerosos estudios que posibilitaron documentar muy bien las causas meteorológicas asociadas a su ocurrencia, los caudales líquidos y detríticos, concentración de sólidos, volúmenes depositados y granulometría del sedimento arrastrado (CRH, 1993).

#### **3.1 Geología, Geomorfología y Clima**

Esta zona está conformada en su mayor parte por rocas de la formación La Negra. Hay sectores, al sur de esta quebrada, en donde se encuentran intrusiones de cuerpos menores o stocks graníticos del Jurásico Superior. Al sur del área se encuentran rocas de la llamada formación Caleta Coloso, constituida por conglomerados y areniscas, secuencia estratificada que yace sobre la formación La Negra. Las rocas fundamentales, que son las descritas, están



**Figura 2.** A) Roca del Estero Parraguirre desplazada por aluvión de noviembre de 1987.  
B) Vista cercana de la roca, con un peso estimado de 2.700 – 3.000 ton (Hauser, 2000)

cubiertas en algunos sectores por sedimentos aluviales de relleno, como ser gravas, arenas y arcillas.

El relieve de la II Región se caracteriza por presentar una importante variación desde la costa hacia la Cordillera de Los Andes. A partir de la costa, se distingue inicialmente una zona llamada Planicie Costera, territorio llano y poco escarpado con un ancho medio de unos 4

km. Inmediatamente a continuación se encuentra la cordillera de la Costa, que constituye un cordón montañoso con alturas máximas que no sobrepasan los 2500 msnm. Antofagasta se ubica en los faldeos occidentales y planicie litoral limitada por la costa.

En cuanto al clima, éste tiene características de clima desértico con abundantes nublados a causa del anticiclón del Pacífico. Hacia el interior, en la depresión intermedia, el clima es del tipo desértico normal caracterizado por fuertes variaciones térmicas diarias y falta absoluta de precipitaciones, lo que da origen a una aridez casi total y fuertes vientos.

### **3.2 Origen y Característica de los Aluviones**

El temporal que se desató sobre la ciudad de Antofagasta en la fecha antes indicada fue el resultado de la presencia de un sistema frontal desarrollado por una masa de aire polar, más el efecto acumulativo de una “corriente de chorro de alturas”, que se incorporó al fenómeno anterior. Adicionalmente, la presencia de un viento tibio que sopló en dirección norte-sur terminó por destruir la capa de inversión térmica que caracteriza la zona costera, permitiendo así el ascenso de las masas de aire a niveles más altos, generándose nubes de desarrollo vertical, que incrementaron su capacidad para producir precipitaciones. La lluvia alcanzó en la zona costera alta intensidad, originando los torrentes de agua y barro que escurrieron por más de 15 quebradas de los faldeos occidentales y planicie litoral irrumpiendo violentamente en la ciudad de Antofagasta.

Los estudios efectuados con posterioridad al evento difieren en cuanto a la evaluación de precipitaciones, caudales y concentraciones de sólidos asociados al fenómeno. Los valores dados en el estudio del CRH (1993) fueron el resultado de un análisis en el cual se compatibilizaron las estimaciones hidráulicas con la información y análisis hidrológico del fenómeno. Se estimaron precipitaciones con intensidades medias máximas con valores entre 19 y 25 mm/h para las cuencas llamadas pequeñas (superficies menores a 1 km<sup>2</sup>) y entre 6 y 14 mm/h para las restantes. Se estimaron caudales con concentraciones de sólidos que superan en la mayoría de las quebradas el 50 al 60% en volumen y un volumen de detritos en el rango de 550.000 a 750.000 m<sup>3</sup>, pudiendo llegar inclusive al millón sin considerar el aporte de la quebrada La Negra. El caudal detrítico máximo estimado corresponde al de la quebrada La Negra con un valor de 116 m<sup>3</sup>/s y una concentración en volumen de 40%. La altura del escurrimiento varió entre 1,5 y 4 m, alcanzando los 8 a 9 m en una hondonada de la quebrada El Toro. La metodología adoptada, después de analizar varias alternativas, consistió en estimar los caudales líquidos máximos mediante la fórmula racional y los caudales detríticos a partir de los caudales líquidos anteriores y de las concentraciones de sólidos resultantes en cada quebrada.

Para determinar la granulometría del sedimento arrastrado por la corriente se efectuaron muestreos tanto en las quebradas como del material aluvional depositado. Se encontró que el  $D_{84}$  va entre 13,2 mm como máximo y 3,76 mm como mínimo, el  $D_{50}$  entre 2,99 y 1,03 mm y el  $D_{16}$  entre 0,83 y 0,25 mm. Un ejemplo de curva granulométrica se muestra en la Figura 3.

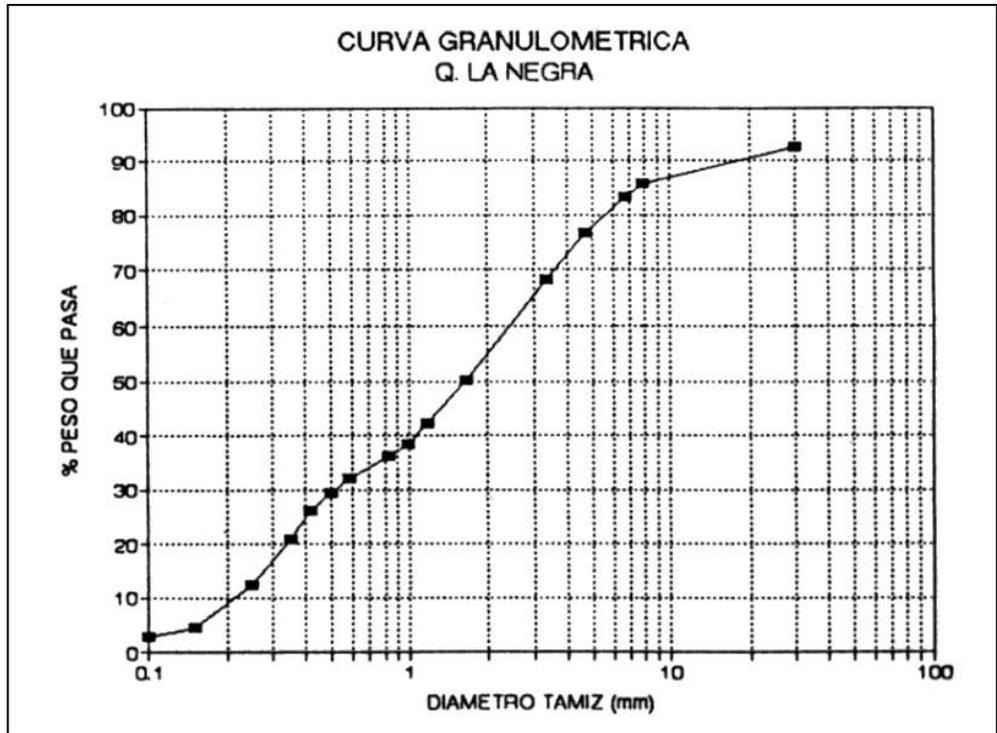


Figura 3.- Curva granulométrica. Quebrada La Negra. Antofagasta.

En Ayala (1994) se señala que el fenómeno tuvo un origen de tipo meteorológico, con variabilidades importantes en cuanto a las intensidades de precipitaciones observadas para las distintas quebradas, a causa al carácter convectivo de la tormenta. Las precipitaciones movilizaron los materiales detríticos disponibles, básicamente depósitos coluviales y eólicos. Los primeros están conformados por sedimentos de granulometría variada, partículas finas hasta bloques, y los segundos por arenas con buena selección y de formas redondeadas. Se concluye en el citado trabajo que el flujo generado correspondería en la mayoría de las quebradas a flujos de barro sin erosión apreciable del lecho, por lo cual su modelación hidrodinámica debería considerarlo como un flujo macro-viscoso.

#### 4. ALUVIÓN QUEBRADA DE MACUL (1993)

La quebrada de Macul se encuentra al sur oriente de la ciudad de Santiago por sobre una zona densamente poblada. Los días 2 y 3 de mayo de 1993 se desencadenó un fenómeno climático que comprometió una extensa región del territorio de Los Andes centrales de Chile, abarcando las regiones V, VI y Metropolitana, entre los 32° y 35° latitud sur. El evento originó serios problemas, siendo los de mayor gravedad los ocurridos en las quebradas de la región Metropolitana, especialmente en la quebrada de Macul (Figura 4).



**Figura 4.** Región Metropolitana. Zonas comprometidas por aluvión de mayo de 1993. (Fuente: Diario El Mercurio).

#### 4.1 Geología, Geomorfología y Clima

En general toda la zona afectada por este fenómeno presenta una geología de composición muy compleja, debido a los diferentes fenómenos que la afectaron y a su variada composición litológica. Se encuentran rocas de tipo volcánicas, intrusivas y metamórficas. Los elementos constituyentes son andesitas, conglomerados volcánicos, tobas, rocas tobáceas, sedimentarias y calizas, las que tienen un papel importante en la producción de sedimentos.

El principal aspecto geomorfológico lo constituye la cordillera y precordillera andina. La evolución de la precordillera se ha debido básicamente a la actividad tectónica, períodos alternativos de hielo-deshielo, a la actividad volcánica y a la actividad torrencial y fluvial que ha originado los principales ríos, quebradas y arroyos cordilleranos. El relieve es el típico de la cordillera de la zona central, montañoso con altas cumbres, valles estrechos de fuertes pendientes y fondos rocosos, los que están cubiertos por sedimentos de gran tamaño y granulometría extendida.

El clima de toda esta zona es también similar, con características de región semi-árida, con una estación marcadamente seca en verano y precipitaciones intermitentes en invierno, las que generalmente por sobre los 2000 msnm son de tipo nival. Las precipitaciones aumentan de norte a sur, alcanzando un promedio anual de 350 mm.

#### 4.2 Origen y Característica de los Aluviones

Los días 2 y 3 de mayo de 1993 la zona Central de Chile fue afectada por un temporal que se presentó con intensas precipitaciones líquidas y temperaturas por sobre lo usual en esa época del año. Efectivamente la isoterma 0 °C subió por encima de los 3900 msnm con lo cual se incrementó la superficie de la cuenca que recibió precipitaciones líquidas, siendo también estas superficies incorporadas las de mayor pendiente. Todos los autores que estudiaron el fenómeno coinciden en afirmar que no hubo deslizamientos de grandes masas como para haber bloqueado el cauce, por lo tanto, el proceso aluvional se debió a la gran cantidad de

agua caída y al aporte superficial de las zonas más altas de los cerros, esto produjo una disminución de la infiltración y saturación de los suelos, facilitando la erosión local. El material transportado fue aumentando en cantidad, incorporándose bloques y rocas que se encontraban en la cuenca, todo lo cual conformó una masa altamente viscosa de bloques y barro que escurrió por las laderas y cauces tributarios incorporando al cauce principal un gran aporte de sólidos.

Testigos del fenómeno señalaron que el aluvión se presentó como dos ondas separadas con un intervalo de 10 minutos. La altura del frente de la primera onda fue estimada entre 1 y 1,2 m y su velocidad de más o menos 4,0 m/s y con un aspecto de una masa viscosa que llevaba hasta rocas de 1 m de diámetro. La segunda ola correspondió más bien a un flujo de detritos, según la clasificación de Takahashi (1991) y en la zona urbana el frente tenía una altura superior a los 3 m y una velocidad mayor de 8,5 m/s.

Diversos autores han estimado las características que tuvo el aluvión, (Ayala, 1994). Edwards (1993), estimó un caudal líquido máximo del orden de 60 m<sup>3</sup>/s y basándose en el sedimento depositado estimó un gasto sólido de 83 ton/s, con lo cual el caudal máximo de la mezcla resulta ser 90 m<sup>3</sup>/s con una concentración volumétrica de 33%. El DICTUC (1993) estimó un caudal líquido de 72 m<sup>3</sup>/s y uno sólido de 48 m<sup>3</sup>/s con una concentración de 40%. El estudio de AC Ing. Consultores (1993), apoyándose en la información de las trazas dejadas por el aluvión y utilizando algunos modelos entre ellos el de Takahashi, estimó un caudal líquido máximo de 50 m<sup>3</sup>/s y un caudal total de 80 m<sup>3</sup>/s con concentraciones del orden de 38%, y un depósito de material sólido de 840.000 m<sup>3</sup>.

El escurrimiento tuvo un alto poder erosivo socavando y ensanchando profundamente el cauce por sobre la cota 725 msnm. El sedimento arrastrado y depositado fue de distintos tamaños, encontrándose desde rocas de diámetros mayores de 1 m hasta gravas, arenas y finos (Figura 5). Muestras del material fino depositado dieron los siguientes tamaños característicos:  $D_{90} = 21,5$  mm,  $D_{84} = 12,2$  mm,  $D_{50} = 0,8 - 0,2$  mm,  $D_{16} = 0,018 - 0,012$  mm.

## 5. DAÑOS

Las tres catástrofes descritas han sido tal vez las que han dejado mayor secuela en cuanto a pérdidas de vidas humanas y daños materiales.

El aluvión de 1987 en el estero Parraguirre produjo alteraciones significativas en el curso medio e inferior del río Colorado, los cuales se manifestaron en cambios morfológicos y una apreciable sedimentación de su cauce principal y en daños cuantiosos a caminos, puentes e instalaciones de la Central Hidroeléctrica de Maitenes de CHILGENER y en los campamentos y obras en construcción del proyecto hidroeléctrico Alafalfal. Sin embargo, lo más grave fue la pérdida de 32 vidas humanas. Los daños materiales fueron estimados por sobre los 295 millones de pesos de la época (unos \$3.100 millones actuales), quedando destruidos el 60% de una planta de cemento, dañada en un 80% la Central Maitenes, 10 km de caminos destruidos, dañado un 20% de un total de 25 km de líneas de alta tensión de 33

kW, destruidos 16 de 25 puentes y destruidos 4 campamentos con la consiguiente pérdida de equipos y materiales.



**Figura 5.** Sedimentos depositados. Aluvión Quebrada de Macul (1993).

El aluvión ocurrido en Antofagasta en 1991 es el que dejó la mayor secuela de víctimas fatales, fundamentalmente porque las corrientes aluvionales se descargaron por buena parte de la ciudad a horas en las cuales la población se encontraba aún en sus viviendas. Se contabilizaron 91 víctimas fatales más 19 desaparecidos. Los daños materiales a la propiedad pública y privada fueron estimados del orden de los 60 millones de dólares (142 millones de 2025). Los primeros incluyen pérdida parcial o total de viviendas, escuelas, caminos, calles, veredas, hospitales, etc. En cuanto a inmuebles habitacionales, se estimaron unas 700 viviendas destruidas y unas 4000 dañadas, El número de personas damnificadas alcanzó a unas 20.000. A estos daños directos debe agregarse la paralización parcial o momentánea de las actividades industriales mineras, transporte, educacional, etc.

El temporal del 3 de mayo de 1993 que azotó a la región Metropolitana, V y VI, generó varios aluviones siendo el de mayor gravedad por sus trágicas consecuencias el ocurrido en la quebrada de Macul en el sur oriente de Santiago, el cual ha sido descrito en los puntos anteriores. El aluvión se descargó sobre un sector poblacional perteneciente a la comuna de La Florida, dejando un saldo de 26 víctimas fatales y 8 personas desaparecidas. Los daños materiales contabilizaron 257 viviendas destruidas, 36 viviendas dañadas de un 30 a 70%, y 171 viviendas dañadas hasta un 30%. Se tuvieron casi 2000 damnificados en albergues y unas 5000 fuera de albergues. Sólo el daño en viviendas se estimó en \$432.335.975.- (cerca

de \$1.700 millones de 2025), a lo que hay que agregar los gastos propios de la emergencia. En la Figura 6 se muestra parte del desastre.



Figura 6.- Daños causados por aluvión. Quebrada de Macul (1993).

## 6. ACCIONES SEGUIDAS

Frente a este fenómeno de aluviones la reacción ha sido canalizada a través de investigaciones tanto de campo como de laboratorio y de modelación matemática. El Ministerio de Obras Públicas abordó estudios de consultoría para analizar el problema y proponer obras de mitigación de los efectos de los fenómenos aluvionales, comenzando por la ciudad de Antofagasta y la región Metropolitana, principalmente asociado al catastrófico evento de la quebrada de Macul. En general las soluciones a este problema consideran medidas estructurales y no estructurales. Estas últimas se refieren a establecer zonas de exclusión del desarrollo urbano y/o establecer sistemas de control y alerta. Estas medidas, por diversas razones, no ha sido fácil implementarlas en Chile y se ha debido privilegiar las soluciones estructurales, siguiendo los criterios y bases de diseño recomendadas en la literatura y en la experiencia extranjera, principalmente la japonesa. Se ha considerado obras transversales de contención, excavación de pozas decantadoras, obras mixtas de contención-decantación y vías aluvionales.

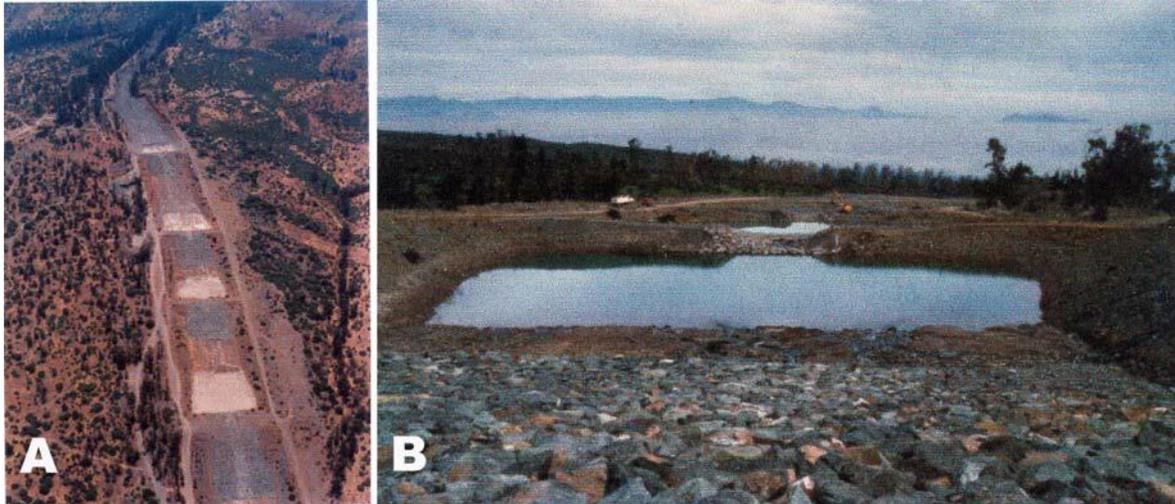
En Antofagasta se plantearon para las diversas quebradas soluciones que consisten en barreras transversales de contención, excavación de pozas decantadoras y también obras mixtas. Estas obras se dispusieron en series de acuerdo con la potencialidad de aporte de

sedimento de los cauces. La concepción de estas obras considera como función básica de ellas disminuir el efecto destructivo de los flujos de detritos, reteniendo una buena porción del volumen de la crecida. De esta forma se busca reducir la concentración volumétrica que llegue a la ciudad, atenuando también el caudal máximo, la velocidad y capacidad de arrastre de los cauces. Se fijó una concentración máxima de sólidos a la entrada del sector urbano de 15% con el objeto de facilitar su evacuación por las llamadas vías aluvionales o por las vías de drenaje natural. En la Figura 7 se presenta una vista desde aguas arriba de una de las series las pozas decantadoras instaladas.



**Figura 7.** Pozas decantadoras construidas en las cercanías de la ciudad de Antofagasta, Chile. Vista desde aguas arriba. (Imagen tomada de Montserrat, 2005)

En la quebrada de Macul se diseñaron pozas decantadoras instaladas en serie y excavadas en el lecho del cauce. En total son siete pozas (Figura 8), cada una de 200 m de largo, 50 m de ancho y profundidad máxima de 5 m. Se barajó también en su momento construir obras de desvío de la masa aluvional hacia una hondonada natural existente en la ribera izquierda del cauce, en donde se espera que el flujo disminuya su energía y los sedimentos mayores queden depositados en la hondonada, cuyo volumen excede al depositado en el evento de 1993. De esta forma seguiría hacia el cauce sólo el sedimento fino y medio. Esta solución no fue implementada, construyéndose las pozas decantadoras señaladas, pero es un proyecto que ha vuelto a ser considerado actualmente con estudios que incluyen modelación física, desarrollados en 2018 por el Instituto Nacional de Hidráulica del MOP.



**Figura 8.** Pozas de decantación construidas en la quebrada de Macul. A) Vista aérea del sector de las pozas, B) Vista desde aguas arriba de una de las pozas de decantación. (Fuente: Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas; Montserrat, 2005)

## 7. COMENTARIOS FINALES

Los devastadores efectos de los aluviones ocurridos en un lapso de 1987 a 1993 en diferentes zonas del país motivaron la preocupación académica e ingenieril por el tema, habiéndose realizado diversos estudios de investigación y mediciones en terreno con el objeto de caracterizar convenientemente estos fenómenos, y cuantificar los principales factores geológicos, meteorológicos, hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos. De esta forma se ha logrado avanzar en el conocimiento del fenómeno y de los factores que lo desencadenan. Asimismo, estos estudios han servido de base a proyectos de obras de control aluvional y han puesto en evidencia la vulnerabilidad de zonas en las cuales se ha extendido indiscriminadamente el desarrollo urbano. A las acciones y esfuerzos realizados, debiera agregarse el impulsar la gestación de legislación adecuada, sobre todo al establecer planos reguladores, los cuales deben definir zonas vulnerables a estos fenómenos y reglamentar el desarrollo urbano.

## REFERENCIAS

- Ayala, L., López, A., Tamburrino, A., Vera, G. (1994) “Aspectos hidrometeorológicos e hidrodinámicos de algunos eventos aluvionales recientes en Chile XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile.
- Ayala, L. (1996) “Hidráulica de los fenómenos de remoción en masa, corrientes de detritos y flujos de barro” Santiago, Chile.
- AC Ingenieros Consultores (1993) “Proyecto para el Control de Aluviones en la Quebrada de Macul”. Departamento de Obras Fluviales, Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.

- Cassasa, G., Marangunic, C. (1993) “The 1987 Río Colorado Rockslide and Debris Flow. Central Andes, Chile”, Association of Engineering Geologist, Vol XXX, N°3.
- CRH, Centros de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile (1993) “Crecidas súbitas y corrientes de detritos ocurridas el 18 de junio de 1991 en Antofagasta” Publicación CRH93-81-I, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- DICTUC (1993) “Análisis y Diagnóstico de los Eventos del 3 de Mayo de 1993, Regiones V, VI y Metropolitana”. Dirección de Riego, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.
- Edwards, R. (1993) “Quebrada de Macul, Diagnóstico del Aluvión del 3 de mayo de 1993”. Santiago, Chile.
- Golubev, G. (1969) “Avalanchas y corrientes de barro en Chile”. Informaciones Geográficas. Chile. No. 17. pp. 31-74.
- Hauser, A. (2000) *Remociones en Masa en Chile*. Subdirección Nacional de Geología. Boletín N° 59. SERNAGEOMIN, Chile.
- Montserrat, S. (2005) *Estudio Experimental de Obras de Protección contra Aluviones*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
- Takahashi, T. (1991) *Debris Flow*, IAHR, Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.

### **ACERCA DEL AUTOR**

**Alejandro López Alvarado** se tituló en 1962 como Constructor Civil de la Universidad de Chile con la memoria “Velocidad inicial de arrastre de sedimentos”, la que constituye el primer estudio de la condición de arrastre incipiente desarrollado en Chile. En 1969 se recibió con distinción unánime como Ingeniero Civil, con su memoria “Iniciación de arrastre de sedimentos” en la que profundiza sus estudios realizados en su memoria de Constructor Civil y consolida la que será su principal línea de trabajo en su carrera académica. En 1961 comenzó a trabajar en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile, bajo la dirección de su fundador, el Prof. Francisco Javier Domínguez. Entre 1970 y 1973 trabajó en el Instituto Nacional de Hidráulica del MOP (INH). En 1973 se incorporó como académico al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, donde permaneció hasta su retiro en 1996, volviendo al INH como Director, cargo en el que se mantuvo hasta 2007. En 2008 se ingresó como académico de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, siendo Director de la Escuela de Ingeniería Civil desde 2014 hasta su retiro en 2023, lo que no significa que se haya retirado de la docencia, ya que continúa colaborando esporádicamente en cursos de su especialidad.

# CATASTRO Y CARACTERÍSTICAS DE FLUJOS DE DETRITOS EN LAS REGIONES DE ARICA Y PARINACOTA Y DE ANTOFAGASTA

ELEONORA MUÑOZ MORALES<sup>1</sup>, ENRIQUE OPAZO CASTRO<sup>2</sup>,  
NATALIA GARRIDO URZÚA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dirección Regional Los Ríos – SERNAGEOMIN  
[eleonora.munoz@sernageomin.cl](mailto:eleonora.munoz@sernageomin.cl)

<sup>2</sup>Dirección Regional de Tarapacá - SERNAGEOMIN  
[enrique.opazo@sernageomin.cl](mailto:enrique.opazo@sernageomin.cl)

<sup>3</sup>Dirección Regional de Coquimbo - SERNAGEOMIN  
[natalia.garrido@sernageomin.cl](mailto:natalia.garrido@sernageomin.cl)

## RESUMEN

El artículo presenta una síntesis de los catastros de remociones en masa tipo flujo realizados para las regiones de Arica y Parinacota y de Antofagasta en el contexto de estudios mandados por SERNAGEOMIN, financiados por los GORE de las regiones respectivas y desarrollados por la consultora Xterrae Geología. El artículo describe los catastros generados, destacándose las características, ubicación de los eventos registrados y aplicaciones. Se hace, además, una reflexión en cómo esta información aporta al conocimiento actual de estos fenómenos en el norte de Chile.

**Palabras claves:** remociones en masa; flujos; catastro.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las remociones en masa son procesos naturales asociados a la dinámica externa del sistema terrestre y a la evolución del paisaje, e incluyen todos los movimientos ladera abajo de una masa de roca, suelo y/o sedimento por acción de la gravedad, los que pueden, además, incorporar vegetación y elementos antrópicos a su paso. En particular, los flujos o aluviones son remociones en masa que durante su desplazamiento exhiben un comportamiento semejante al de un fluido saturado en sedimentos. Los flujos, también conocidos como aluviones o huaicos en el norte de Chile, son desencadenados principalmente por precipitaciones estivales del invierno altiplánico. El objetivo del artículo es presentar los resultados y hacer una reflexión sobre los estudios “Análisis de zonificación de áreas expuestas a peligros de remoción en masa, región de Antofagasta” y “Análisis peligro de remoción en masa, región de Arica y Parinacota”, ambos proyectos mandados por el SERNAGEOMIN, financiados con el Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) de

los GORE de ambas regiones y ejecutados por la empresa Xterrae Geología, buscando aportar al conocimiento de estos procesos en Chile.

## **2. CATASTRO DE REMOCIONES EN MASA**

Un catastro de remociones en masa es un registro ordenado de conocimientos de estos fenómenos en un área determinada, combinado con información sobre las características individuales de cada registro y, que además resulta ser una herramienta de comunicación efectiva tanto para profesionales de las geociencias como para no expertos según Opazo *et al.* (2021). En el contexto de los estudios analizados, un catastro de remociones en masa corresponde a un inventario compuesto por eventos distintos que tienen una base de datos asociada y una representación puntual georreferenciada. Un subconjunto de estos registros tiene una representación poligonal, en que cada polígono contiene dentro de su área al menos un punto del catastro puntual.

Uno de los productos específicos de los estudios citados es un catastro de remociones en masa para cada región y que consiste en una base de datos georreferenciada de eventos, clasificados y caracterizados según los estándares del SERNAGEOMIN, entre los que se incluyen: un identificador; coordenadas; iniciales del autor y fecha del registro; tipo de remoción en masa según su clasificación por tipo; materiales involucrados; nombre del proceso según las clasificaciones de Hungr *et al.* (2013); área, volumen y profundidad; además de características como rasgos identificados en superficie; detonantes; estado en términos de si está activo, inactivo u otro; antecedentes de la fecha del evento si es que se tiene; características particulares y fuente de información. Este último, hace referencia a la fuente de información desde donde se obtuvo el registro, pudiendo ser referencia bibliográfica, medios de prensa digitales o escritos, fotointerpretado a partir de imágenes satelitales u observado en terreno.

En particular los polígonos representan una zonificación de catastro de remoción en masa, que considera la afectación del proceso de remoción en masa, incluyendo, dependiendo de cada caso zonas de generación, transporte y depositación. De acuerdo con Arenas y Opazo (2017) este de información de remoción en masa corresponde a una zonificación local de tipo catastro con un nivel de zonificación intermedio y en ciertos casos avanzado. Este tipo de levantamiento es de carácter consultivo, sin embargo, es un elemento crucial en la validación de evaluaciones de amenaza de remoción en masa de carácter normativo.

## **3. REMOCIONES EN MASA TIPO FLUJO EN ARICA Y PARINACOTA**

La región de Arica y Parinacota se ubica entre los 17°30' y los 19°13' de latitud Sur y entre los 68°55' y los 70°22' de longitud Oeste. Esta región se ubica en el extremo norte del país limitando al norte con Perú, al sur con la región de Tarapacá, al oeste con el Océano Pacífico y al este con Bolivia. El año 2024 finalizó el estudio “Análisis peligro de remoción en masa, región de Arica y Parinacota”, el que provee a la región de información y conocimiento

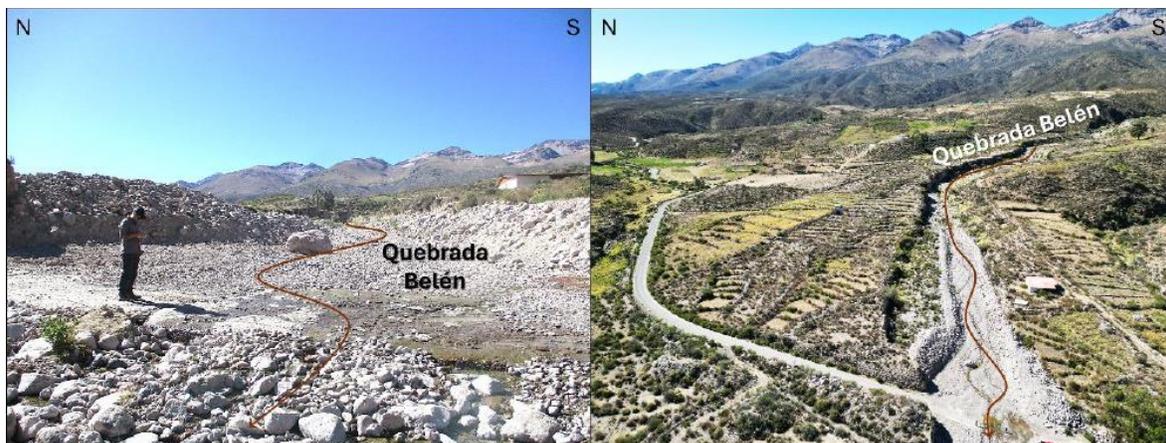
científico-técnico para su utilización en la gestión del riesgo en términos de prevención, mitigación y atención de emergencias. Como parte de sus productos se generó un catastro de remociones en masa de la región, el cual cuenta con 5.360 registros puntuales y 4.327 polígonos, equivalente al 80,71% del total de eventos. Del total de eventos catastrados, los más frecuentes corresponden a caídas, con 3.021 registros (correspondiente a un 56,36%) y 1.737 corresponden a flujos, equivalente a un 32,41%.

En la zona costera los flujos descienden desde las profundas laderas de las quebradas principales de la región (Vítor, Lluta, Acha, San José, Camarones, entre otras) y se generan especialmente en el cambio de pendiente entre las planicies superiores y el fondo del valle (Figura 1). En general, los flujos en las zonas costeras arrastran materiales de menor granulometría (detritos finos, arenas).



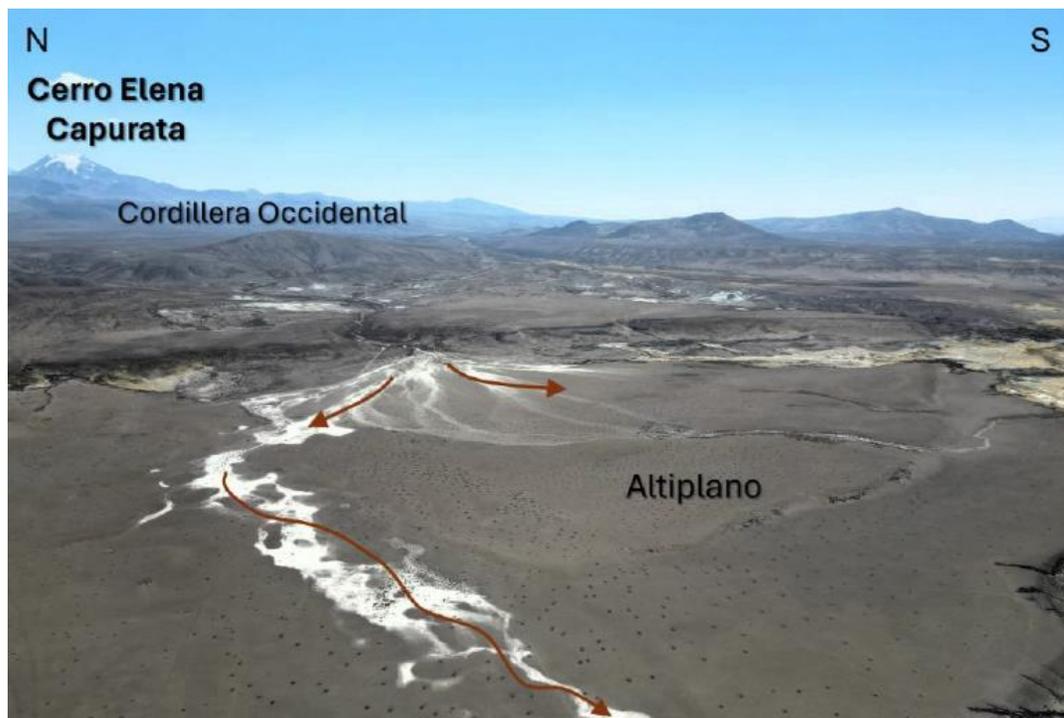
**Figura 1.** Imagen de flujos (flechas rojas) provenientes desde ladera norte del río Camarones. Fotografía Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

También se identificaron flujos especialmente de detritos hacia la Precordillera y Cordillera Occidental, arrastrando materiales de mayor granulometría y afectando en algunas ocasiones el acceso a zonas pobladas (Figura 2).



**Figura 2.** Imagen de flujos (flechas cafés) en ruta A-31 camino a Belén. Fotografía Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

Se destaca que los flujos en Cordillera Occidental dejan evidencias correspondientes a las zonas de transporte y erosión, y al llegar al Altiplano comienzan a depositar el material transportado (Figura 3).



**Figura 3.** Imagen de flujos (flechas cafés) provenientes de la Cordillera Occidental y transportados por el Altiplano. Fotografía Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

De acuerdo con el catastro, el tipo de flujo dominante corresponde a los flujos indeterminados (66%). Esto se debe a que muchos de los flujos se levantaron mediante fotointerpretación, metodología con la cual es complejo identificar la clasificación del flujo. Son seguidos por los flujos de detritos y los flujos secos de arena/limo/detritos, con un 21% y 4%, respectivamente. En cuanto al material, roca y suelo/sedimento son los más abundantes, con un 40%.

En el estudio SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024) se diferencian dos casos para los flujos. El primero corresponde a flujos encauzados, los cuales se pueden extender por decenas de kilómetros. Estos flujos nacen en zonas altas y cruzan gran parte de la región de este a oeste. Estos casos son recurrentes en las quebradas de piedemonte. El segundo caso, corresponde a flujos cortos, pero en zonas de mucha pendiente, relacionados con quebradas menores de corto recorrido. Este caso es más común en el altiplano, en que las quebradas tienen una cuenca aportante más pequeña.

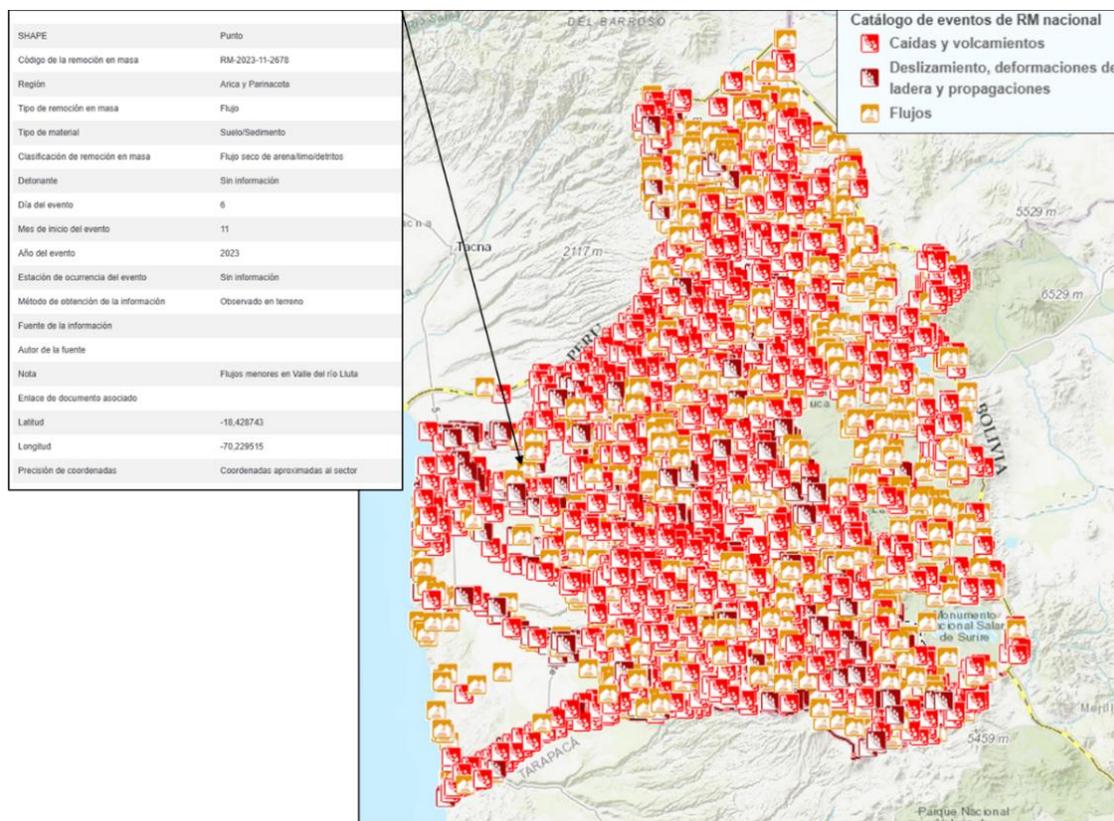
Se cuenta con antecedentes concretos de lluvias el año 2002 que generaron aluviones. Así como los años 2006 (según antecedentes de prensa, incluyendo una persona fallecida), y los años 2016 y 2019, en que se generaron flujos en la quebrada de Acha en el mes de febrero. Según estudios anteriores e informes de asistencia técnica, para los eventos del 2019 (río Lluta) se registraron precipitaciones acumuladas que fluctuaron entre 12 y 24 mm (entre los días 8 a 10 de febrero 2019), mientras que para la estación del río San José de Azapa, Camarones y Vitor (los mismos días) se registraron precipitaciones acumuladas de 12 mm. La

Tabla 1 muestra sectores con concentración de eventos tipo flujo a partir del estudio de SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

**Tabla 1.** Sectores con concentración de eventos tipo flujo en la región de Arica y Parinacota. SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024)

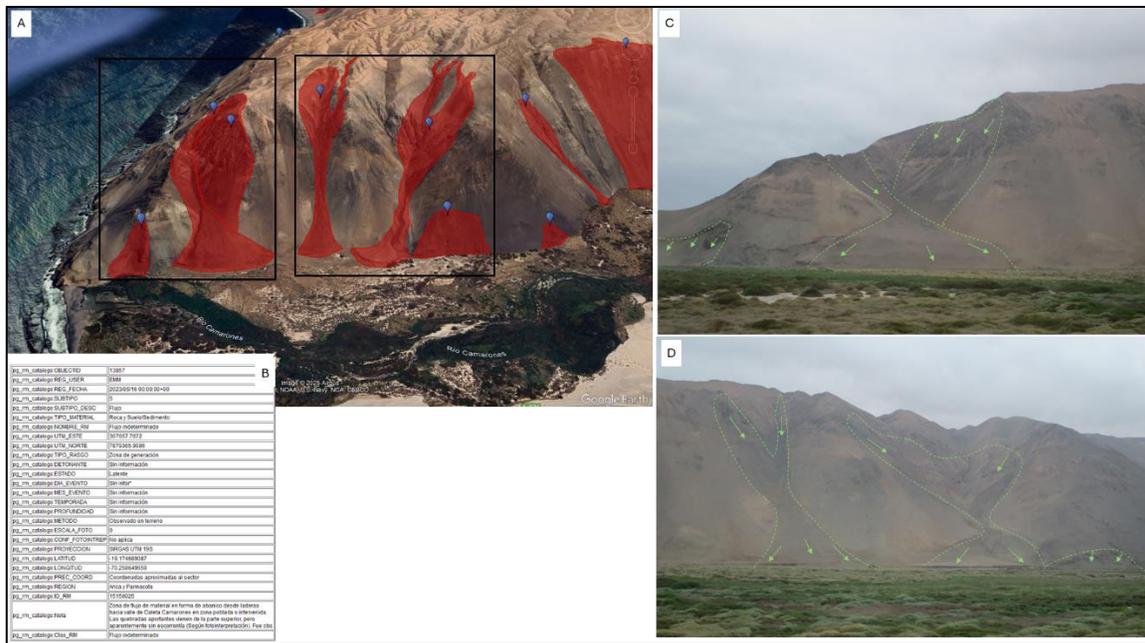
<b>Comuna</b>	<b>Sectores con concentración de eventos</b>
General Lagos	A lo largo de las rutas A-93, A-23 y A-127.
Arica	En las quebradas de Acha, Vítor, Azapa y Lluta, así como Valeta Víctor, incluyendo las Ruta 5 Panamericana, rutas A-32 y A-304. Quebrada de Acha (ruta A-301). También el Valle de Azapa, en zonas pobladas y en 7 ruta A-27. La ruta internacional CH-11 presenta varios tramos afectados por flujos.
Putre	La ruta internacional CH-11 atraviesa varios tramos afectados por flujos. También tramos de la ruta A-31 (acceso a Tignamar), y que atraviesa además una serie de localidades como Saxamar, Lupica, Belén, Chapiquiña, entre otras.
Camarones	La Ruta 5 Panamericana tiene zonas de alta criticidad y ocurrencia de remociones recientes. También la Ruta A-35, camino a Codpa y al sector de Guanacagua. Hacia el sector de Caleta Camarones, existen una serie de rutas (en la mayoría el único acceso) que tienen zonas críticas, como la A-376; A-345 y A-35 (hacia localidad de Camarones y Palca). También se identifican el sector de Cuya (A-355); Taltape (A-345); Putaralla (A-335); acceso a Esquina (A-331); Ulapata (A-331). También accesos a Caritaya (A-41); Pailcoaillo (A-319) y la ruta que conecta Sacuna con Saguara (A-323).

El catastro descrito se encuentra disponible en los visores del SERNAGEOMIN en <https://portalgeomin.sernageomin.cl/> y mostrado referencialmente en la Figura 4. En color anaranjado se grafican los flujos, señalándose a modo de ejemplo cómo se despliega la información asociada a cada punto.



**Figura 4.** Imagen del catastro de remociones en masa de la región de Arica y Parinacota visualizado en el visor Portal GEOMIN del SERNAGEOMIN disponible es <https://portalgeomin.sernageomin.cl/>

Además del registro puntual, el catastro se encuentra disponible en formatos compatibles con Google Earth (kml y kmz) pudiendo desplegarse y visualizarse como polígonos sobre el relieve como lo muestra la Figura 5.



**Figura 5.** Imagen del catastro de remociones en masa de la región de Arica y Parinacota visualizado en Google Earth. En A se muestra una vista del catastro, en B la información desplegada y en C y D fotografías reales del sector (ladera norte quebrada Camarones). Fuente: Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

#### 4. REMOCIONES EN MASA TIPO FLUJO EN ANTOFAGASTA

La región de Antofagasta se ubica entre los 21°20' y los 25°55' de Latitud Sur, y entre los 67°00' y los 70°45' de longitud Oeste. Es la segunda región con mayor extensión superficial en el país. El año 2023 finalizó el estudio “Análisis de zonificación de áreas expuestas a peligros de remoción en masa, región de Antofagasta”, cuyo objetivo fue dotar a la región de información sobre la susceptibilidad y el peligro de remociones en masa con la finalidad de apoyar la toma de decisiones en el ámbito de la planificación urbana y el ordenamiento territorial, así como para la gestión del riesgo de desastres.

El catastro de remociones en masa para la región de Antofagasta está compuesto por 2295 eventos distintos, de los cuales un 69,9% corresponden a flujos (1605 eventos) y 840 tienen representación poligonal. De acuerdo con el catastro, este tipo de remoción en masa sería la más frecuente en la región de Antofagasta. Estos eventos se concentran en el Acatilado Costero y en las zonas cordilleranas que tiene fuerte pendiente y variación de altura. Los flujos se manifiestan de diversas formas en la región, destacándose la presencia de flujos asociados a quebradas cortas que se concentran principalmente en quebradas de la Cordillera de la Costa, Cordillera de la Sal, Cordillera de Domeyko y Cordillera de Los Andes y a lo largo del Acatilado Costero. También se destacan flujos de gran extensión, los cuales abarcan más de una unidad geomorfológica (Figura 6). Dentro de los rasgos morfológicos

reconocidos para estos eventos, se destacan zonas de generación, zonas de transporte y depositación.



**Figura 6.** Ejemplo de remoción en masa tipo flujo en Acantilado Costero, región de Antofagasta. Fotografía Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023).



**Figura 7.** Ejemplo de remoción en masa tipo flujo camino a Camar, región de Antofagasta. Fotografía Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023).

Del catastro de flujos se puede señalar que en 912 casos (40%) se clasificó como “flujo indeterminado”. Entre los casos reconocidos en terreno, la mayoría clasifica como “Flujo de detritos” (con 570 casos). Respecto a la evaluación de amenaza de remociones en masa tipo flujo, las mayores susceptibilidades de generación ocurren en el Acantilado Costero. También se observa alta susceptibilidad en torno a los centros volcánicos y cerros de la Cordillera Principal, las cuales, en algunos casos, corresponden a zonas de alcance de los procesos. En cuanto al alcance de flujos, las zonas susceptibles corresponden a las zonas bajas de quebradas y valles, donde se concentran las unidades aluviales y fluviales, y que abarcan unidades geomorfológicas de suave pendiente como son la Depresión Central, las llanuras asociadas a las distintas cordilleras y las planicies litorales.

El estudio presenta además una identificación de sectores con mayor concentración de eventos tipo flujo por comuna presentados en la

Tabla 2.

**Tabla 2.** Concentración de eventos tipo flujo por comuna, región de Antofagasta según el catastro de remociones en masa SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023)

Comuna	Sectores con concentración de eventos
Tocopilla	En Acantilado Costero por ruta 1; ruta 24 y ruta B-150 en la Cordillera de la Costa.
María Elena	A lo largo de las rutas B-135 y 24, con zonas de generación en la Cordillera de la Costa.
Calama	A lo largo de las rutas 24, B-155, B-159, B-255; quebradas que cruzan en San Francisco de Chiu-Chiu, San Pedro de Atacama, Toconao (como zonas de alcance principalmente).
Ollagüe	Al norte de la comuna principalmente, a lo largo de la ruta B-97-A.
Mejillones	Sector de Hornitos a lo largo de ruta 1; ruta B-240; morro de la península de Mejillones.
Sierra Gorda	A lo largo de rutas 25, B-385, B-375 y sector oriental de la comuna.
San Pedro de Atacama	En quebradas secundarias en torno a Salar de Atacama; ruta B-207; ruta B-245; ruta 27CH; ruta B-357; ruta B-359; ruta 23CH y quebradas secundarias cercanas a Toconao y San Pedro de Atacama (sector río Grande).
Antofagasta	Ssector costero a lo largo de la ruta 1, desde Mejillones al sur; sector sur morro de la península de Mejillones; quebradas en la ciudad de Antofagasta; balneario Juan López; ruta 26; ruta 28; ruta B-510; rutas B-70; B-710; B-55 y ruta 5 con concentración de flujos de material más fino. Hacia el oriente de la comuna, distribuidos por toda la zona.
Taltal	Sector costero a lo largo de ruta 1 hasta Taltal; Acantilado Costero al sur de Taltal; ruta 5. En Paposos y Taltal se identifican numerosas quebradas con flujos declarados.

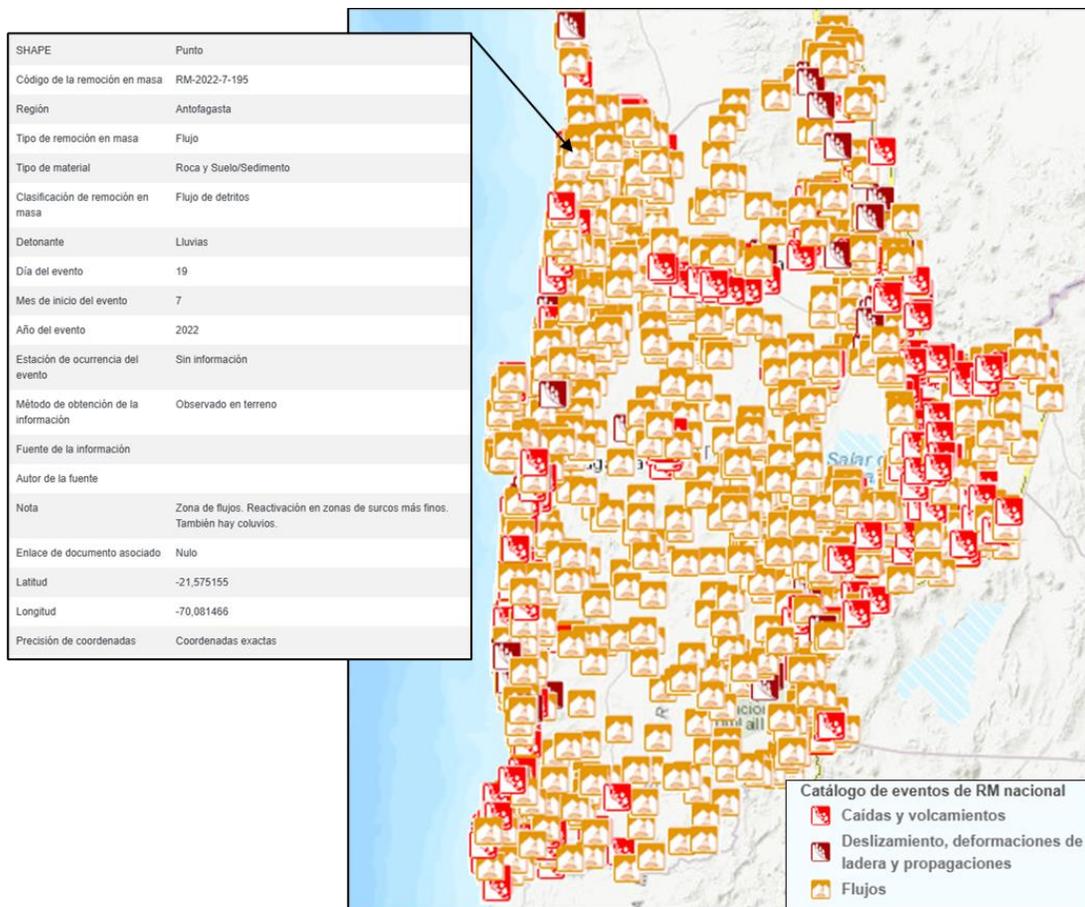
Se describen además eventos históricos relevantes ocurridos en la región, con consecuencias importantes y pérdidas de vidas humanas (Tabla 3), lo que resalta que estos eventos han

ocasionado pérdidas de vidas e infraestructura en varias ocasiones a lo largo de la historia de la región.

**Tabla 3.** Eventos históricos tipo flujo en Antofagasta según el catastro de remociones en masa SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023)

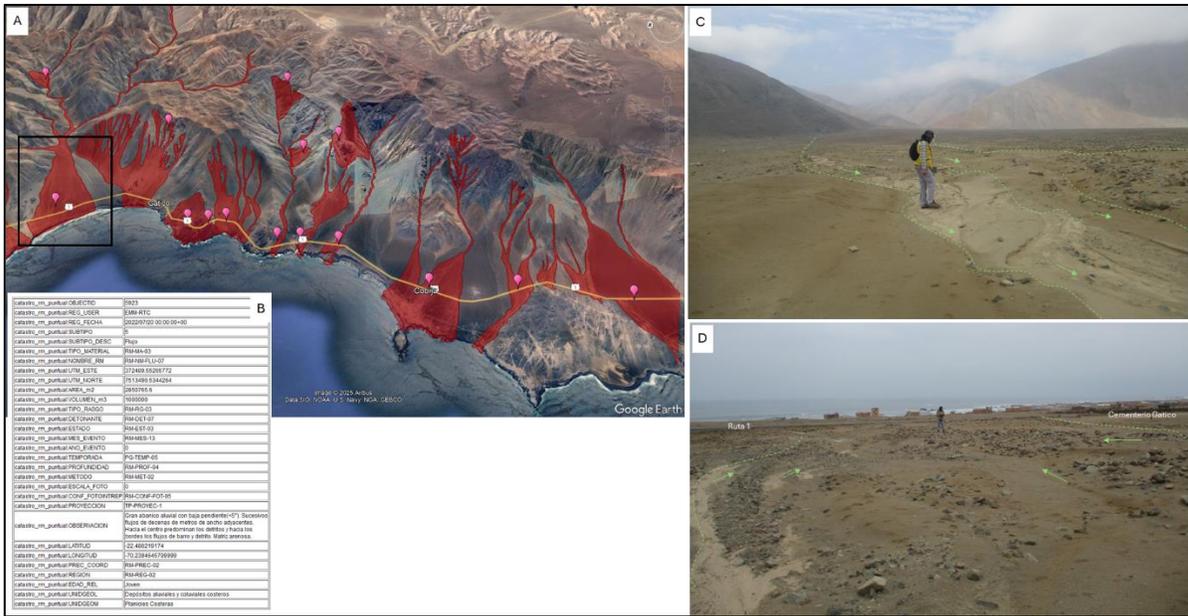
Fecha	Localidad / Comuna	Efectos	Fuente de información
18 de mayo de 1912	Gatico / Tocopilla	Daños en mineras en el entorno de Gatico, principalmente en minera Toldo, donde se rebalsó y luego destruyó un tranque. El conteo de muertos despende la fuente: 42 muertos y 23 desaparecidos (Flores et al, (2005)), 72 muertos (Guerrero (1992)), 80 muertos (Urrutia y Lanza, (1993)).	Galaz-Mandakovic, 2020
12 y 13 de junio de 1940	Taltal / Taltal	El aluvión se produjo durante la noche, dejando tres muertos y decenas de heridos que fueron rescatados de los escombros. Varias casas de calle Carena fueron arrastradas por completo, otras fueron destruidas y las calles quedaron llenas de escombros y barro. El aluvión arrasó con violencia varias casas de la calle Carena, fue destruido en Liceo Industrial y la planta eléctrica quedó totalmente inundada.	Asun, 2017
25 de julio de 1940	Gatico / Tocopilla	Destrucción completa del pueblo de Gatico y daños considerables en la minera Toldo. Fue fácil reubicar a los damnificados por la gran cantidad de casa que ya se encontraban vacías en esa época. En la minera Toldo se cuentan 4 muertos.	Galaz-Mandakovic, 2020
25 de julio de 1940	Tocopilla / Tocopilla	Aluviones asociados a las quebradas Barriles, El Salto y La Beneficiadora. Además, quedó fuertemente dañada la mina La Despreciada de la quebrada homónima, así como también las vías férreas. Igualmente se activan las quebradas de lo que actualmente es el sector Tres Marías (1°, 2° y 3° quebrada, y quebrada Limón). Las consecuencias fueron de 20 muertos, cerca de 2.000 personas afectadas y, al menos, 500 obreros cesantes.	Karzulovic y Talloni, 1968 Galaz-Mandakovic, 2020
18 de junio de 1991	Antofatasta / Antofasta Tocopilla / Tocopilla Taltal / Taltal	Lluvias de inusual ocurrencia e intensidad (17 mm en 3 horas) provocaron voluminosos y destructivos flujos detríticos y de barro en torno al casco urbano de la ciudad. El saldo que dejan corresponde a 91 muertos, 16 desaparecidos, 715 heridos, 65,000 damnificados, 190,000 afectados, 600 viviendas destruidas y 6000 afectadas, 13.000.000.000 de pesos en valor de pérdidas. Las inundaciones y aluviones graves afectan toda la ciudad (1,7 m de lodo en el sector norte). En Tocopilla, el barro bajó con piedras más grandes que las casas a la población Las Tres Marías. Testimonios indican que, sonó como una explosión y afectó a familias y sus hogares. En Taltal, la Ruta 5 se corta en los km 845, 895, 925 y 955. 10 embarcaciones destrozadas por fuertes marejadas. Declaran zona de catástrofe 23-06. 10 barcos perdidos.	Easton, 1996 Hauser, 1997 Urrutia y Lanza, 1993
09 de agosto de 2015	Tocopilla / Tocopilla	Se activaron quebradas que afectaron a los sectores Tres Marías, Covadonga y Población 5 de Octubre. En esta última se perdió la vida de tres personas donde los flujos descendieron por la calle Gómez Carreño. En las quebradas Barriles-Despreciada y Tres Puntas (también conocida como El Salto) también descendieron flujos, pero estos fueron retenidos y mitigados por las obras aluvionales, impidiendo afectaciones sobre áreas pobladas o infraestructura. Tanto en el sector de Tres Marías como el sector al sur de Caleta Boy, los flujos se originaron en el Farellón Costero, cuyas incisiones permitieron que encauzar el flujo, afectando a dichos sectores y la ruta 1. En el sector Tres Marías, existían obras que mitigaron parcialmente el paso de flujos, ya que el tramo no mitigado afectó directamente a la población cuyos depósitos aluvionales alcanzaron alturas de hasta 1,8m.	Opazo, et al. (2015)

El catastro descrito se encuentra disponible en los visores del SERNAGEOMIN, disponibles en <https://portalgeom.in.ternageomin.cl/> y mostrado referencialmente en la Figura 8. En color anaranjado se grafican los flujos, señalándose a modo de ejemplo cómo se despliega la información asociada a cada punto.



**Figura 8.** Imagen del catastro de remociones en masa de la región de Antofagasta visualizado en el visor Portal GEOMIN del SERNAGEOMIN disponible es <https://portalgeomin.sernageomin.cl/>

De igual forma, el formato compatible con Google Earth del catastro, permite observar la información como polígonos con el relieve de base, como se muestra en la Figura 9.



**Figura 9.** Imagen del catastro de remociones en masa de la región de Antofagasta visualizado en Google Earth. En A se muestra una vista del catastro, en B la información desplegada y en C y D fotografías reales del sector (ruta 1, sector Gatico). Fuente: Xterrae Geología en SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023).

## 5. CONCLUSIONES

La elaboración de un catastro de remociones en masa es una herramienta efectiva y entendible para describir y caracterizar este tipo de procesos en un área dada. El trabajo presentado da cuenta de un minucioso y ordenado registro de eventos de remociones en masa con base en antecedentes, fotointerpretación y observación de terreno. Lo anterior es una herramienta fundamental para la zonificación de la amenaza, la gestión de riesgo de desastres y el ordenamiento territorial, ámbitos cruciales en el desarrollo sostenible del territorio.

El catastro de remociones en masa sirve como base para reconocer el territorio expuesto a esta amenaza y desarrollar planes y planimetría de emergencias, áreas seguras y vías de evacuación, contribuyendo como elemento preventivo ante emergencias de carácter geológico y en particular de remociones en masa. Además, en el ámbito del ordenamiento territorial constituye una herramienta de validación ante evaluaciones de amenaza a distintas escalas, sea un análisis de susceptibilidad, peligro o riesgo de remociones en masa. Por último, el catastro de remociones es una herramienta confiable de aplicar como insumo validador de planes de emergencia, evaluaciones y modelos de amenaza.

Los antecedentes del catastro en ambas regiones, aporta al conocimiento de los flujos, entregando datos concretos de su ubicación espacial, área afectada, características, zonas más

afectadas, entre otros datos que permiten su utilización en distintos ámbitos y por distintas instituciones y organismos públicos y privados.

Entre sus potencialidades se encuentran, por ejemplo, la definición de nuevos territorios habitables por parte de MINVU, la definición de áreas de riesgo por remoción en masa en futuros Planes Reguladores Intercomunales, el diseño y planificación de nuevas rutas o mejoras de las actuales por parte de MOP y la generación de Planes de Emergencia Comunales por parte de los municipios, entre otras. Se cita como ejemplo, el uso dado al mismo estudio realizado en la región de Los Ríos (SERNAGEOMIN-GORE Los Ríos, 2023), cuyos productos fueron difundidos mediante el “Plan de difusión para reducción del riesgo por remociones en masa” llevado a cabo durante el 2024, y a través del cual se realizaron talleres a instituciones, servicios públicos y municipios explicando el contenido, uso y aplicaciones del catastro, así como charlas realizadas a establecimientos de educación y público en general, obteniéndose resultados positivos en cuando a la reducción del riesgo de desastres. Esta iniciativa puede ser replicada en las regiones en las cuales cuentan con los productos del estudio, como es el caso de las regiones de Arica y Parinacota y de Antofagasta.

Si bien la región de Antofagasta es más extensa en área que la de Arica y Parinacota, respecto al número de eventos de remociones en masa registrados que componen el catastro (2295 en Antofagasta y 5360 en Arica y Parinacota), la diferencia en la cantidad de registros obedece a la metodología de mapeo de los catastros y no significa necesariamente que Arica tenga más aluviones que Antofagasta.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa consultora Xterrae Geología por facilitar la información y fotografías.

## REFERENCIAS

- Asun, M. 2017. Análisis del registro histórico de catástrofes geológicas: evaluación del peligro de remociones en masa para Taltal, región de Antofagasta. Santiago: Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Easton, G., 1996. Evidencias de cambios climáticos ocurridos durante el cuaternario en la zona de Antofagasta, II Región, s.l.: s.n.
- Galaz-Mandakovic, D. 2020. Memorias de la ciudad de Gatico. Minería y sociedad (1832-1940). Antofagasta: Pampa Negra Ediciones.
- Hauser, A. 1997. Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico, a 5 años del desastre. Boletín N°49, Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L., 2013. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2), pp. 167-194.
- Karzulovic, J. y Talloni, P., 1968. Estudio geotécnico del aluvión del año 1940 en Tocopilla. Provincia de Antofagasta. Santiago (Chile): Universidad de Chile, Departamento de Obras Civiles. Urrutia y Lanza, 1993.

- Opazo, E., Sepúlveda, N. y Marín, M., 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico del 8 al 10 de agosto de 2015., Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Opazo, E.; Báez, F.; Alfaro, A. 2021. Catastro de remociones en masa en la provincia de Tierra del Fuego, región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-87: 86 p., 1 anexo. Santiago.
- SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta. 2023. Zonificación de áreas expuestas a peligros de remoción en masa en la región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería-Gobierno Regional de Antofagasta. Informe Final. Estudio FNDR Cód. BIP 40018140-0. 121 p., 8 anexos, 4 mapas escala 1:250.000.
- SERNAGEOMIN-GORE Los Ríos. 2023. Zonificación de áreas expuestas a peligros de remoción en masa en la región de Los Ríos. Servicio Nacional de Geología y Minería-Gobierno Regional de Los Ríos. Informe Final. Estudio FNDR Cód. BIP 40016748-0. 115 p., 9 anexos, 4 mapas escala 1:250.000 y 4 mapas escala 1:100.000.
- SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota. 2024. Análisis peligro de remoción en masa, región de Arica y Parinacota. Servicio Nacional de Geología y Minería-Gobierno Regional de Arica y Parinacota. Informe de Avance Etapa 4. Estudio FNDR Cód. BIP 40017755-0. 180 p., 12 anexos.

### **ACERCA DE LOS AUTORES**

**Eleonora Muñoz** es geóloga de la Universidad de Chile y Magíster en Ciencias, con más de 20 años de experiencia en geología aplicada y remociones en masa. Desde el presente año se desempeña como geóloga de la Dirección Regional Los Ríos de SERNAGEOMIN y participó como geóloga de proyecto en los estudios de remociones en masa SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023) y SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

**Enrique Opazo** es geólogo de la Universidad de Chile, con más de 10 años de experiencia en evaluación de remociones en masa para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. Se desempeña desde el año 2014 en el departamento de Geología Aplicada del Sernageomin a nivel central (Santiago) y regiones (Tarapacá y Magallanes). Participó como contraparte técnica de los estudios de remociones en masa SERNAGEOMIN-GORE Antofagasta (2023) y SERNAGEOMIN-GORE Arica y Parinacota (2024).

**Natalia Garrido** es geóloga de la Universidad de Chile con más de 10 años de experiencia en evaluación de remociones en masa para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. Se desempeña desde el año 2011 en el departamento de Geología Aplicada del Sernageomin a nivel central (2011-2014), región de Los Lagos (2011-2020) y desde 2020 a la actualidad en la región de Coquimbo.



# ALUVIÓN DE EL CARMEN 2024, PROVINCIA DEL HUASCO. ANÁLISIS METEOROLÓGICO DESDE UNA PERSPECTIVA OBSERVACIONAL Y NUMÉRICA

MIGUEL LAGOS-ZÚÑIGA<sup>1</sup>, MARCIA PAREDES<sup>2</sup>, DIEGO PINTO<sup>3</sup>,  
ALEX GARCÉS<sup>4</sup>, SANTIAGO MONTSERRAT<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Profesor Asistente, Depto. de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María  
[miguel.lagos@usm.cl](mailto:miguel.lagos@usm.cl), ORCID: 0000-0002-8787-598X

<sup>2</sup>Investigadora Asociada, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile  
[marcia.paredes@amtc.uchile.cl](mailto:marcia.paredes@amtc.uchile.cl), ORCID: 0000-0003-4944-1002

<sup>3</sup>Ingeniero de proyectos, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile  
[diego.pinto@amtc.uchile.cl](mailto:diego.pinto@amtc.uchile.cl), ORCID: 0009-0000-0182-2389

<sup>4</sup>Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile  
[agarces@uchile.cl](mailto:agarces@uchile.cl), ORCID: 0000-0001-9462-6167

<sup>5</sup>Investigador Asociado, Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile  
[santiago.montserrat@amtc.uchile.cl](mailto:santiago.montserrat@amtc.uchile.cl), 0000-0002-5890-936X

## RESUMEN

Los eventos aluvionales del norte de Chile se desencadenan por la ocurrencia de eventos intensos de precipitación en poco tiempo que, al combinarse con un suministro ilimitado de material no consolidado en zonas montañosas, transportan importantes volúmenes agua y sedimentos, pudiendo provocar daño a la infraestructura vial, damnificados, y hasta pérdidas de vidas humanas. Este tipo de eventos son complejos de comprender puesto que las precipitaciones convectivas en montaña presentan una importante heterogeneidad espacial, con áreas de afectación a veces inferiores 5 km, no logrando ser bien capturadas la escasa cobertura espacial en zonas aisladas de topografía compleja. En este estudio se analiza la tormenta ocurrida entre el 12 y 15 de abril de 2024 en las quebradas afluentes a la cuenca alta del río Huasco, región de Atacama, y los aluviones que se originaron durante el evento, desde un enfoque meteorológico. Se analiza el valor agregado de contar con observaciones de temperatura en altura para caracterizar la elevación de la isoterma cero, y simulaciones numéricas que resuelven explícitamente la convección realizada en el modelo WRF. El evento se caracterizó por dos pulsos de precipitación de entre 9 y 12 horas de duración cada uno, reportando intensidades máximas de hasta 6,3 mm/hora y acumulaciones de 63,6 mm. Las simulaciones numéricas, por su parte, entregaron intensidades por sobre 13 mm/hr y acumulaciones sobre 100 mm. Del mismo modo, los sensores de temperatura indican que la isoterma cero se ubicó entre los 2384 y 4618 m s.n.m, 622 m en promedio por debajo de la estimación al extrapolar estaciones de menor elevación. Dada la importante cantidad de aluviones levantados en terreno (15), y la disparidad encontrada entre estimaciones basadas en extrapolaciones y el complemento de mediciones en terreno y simulaciones, este análisis demuestra la relevancia de contar con estas herramientas para el registro, análisis y la toma de decisiones posteriores a este tipo de eventos.

**Palabras claves:** Observaciones en altura, lluvias convectivas, aluviones, simulaciones numéricas convectivas del tiempo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los eventos de precipitación en zonas cordilleranas del norte del país están asociados predominantemente a fenómenos meteorológicos del tipo convectivo, originados principalmente por la presencia de Bajas Segregadas, sistemas de baja presión en altura que inducen inestabilidad en la atmósfera. La acción conjunta de estos sistemas con procesos de transporte de vapor desde las vertientes Andinas oeste (Pacífico) y este (Argentina y Bolivia), por la acción del Monzón de Sudamérica del verano, y corrientes en chorro de bajo nivel (*South American Low Level Jets*), provocan convergencia de masas de aire, favoreciendo el desarrollo de cúmulos, tormentas eléctricas, lluvias convectivas y granizo (Aceituno et al., 2021; Aceituno, 1996; Espinoza et al., 2020; Garreaud, 2009). Por otro lado, la escala espacial de los eventos convectivos de precipitación puede ser de ~1-4 km, por lo que una red hidrométrica escasa en altura (DGA, 2017) no permite capturar las magnitudes de precipitación y su distribución espacial que realmente ocurren y explican la generación de aluviones durante este tipo de tormentas.

La hidrología tradicional recurre al uso de métodos estándares de extrapolación espacial de las variables meteorológicas para determinar las magnitudes de precipitación, así como la elevación de la isoterma cero. Esta última resulta clave para la estimación de las áreas pluviales de cuencas y quebradas, basándose entre otros en relaciones del tipo orográfico. encontrando una importante dependencia de estas dos variables en los Andes, con precipitaciones que se incrementan con la altura (e.g., Garreaud et al., 2016; Viale et al., 2019). Sin embargo, se ha demostrado, que, ante la ocurrencia de fenómenos de baja segregada, se pueden encontrar incluso gradientes de precipitación negativos, i.e., la precipitación disminuye a mayores cotas (Scaff et al., 2017), perdiéndose esta covarianza espacial en los datos encontrados (e.g., Gómez et al., 2017).

Los métodos tradicionales de extrapolación espacial basados en estaciones puntuales no identifican eventos fuera de la red observacional, e incluso los reanálisis atmosféricos, actualmente, no pueden resolver explícitamente la convección, recurriendo a parametrizaciones para determinar la precipitación de origen convectivo. Consecuentemente, productos como CR2MET (Boisier et al.) y RF-MEP (Báez-Villanueva et al., 2020), no necesariamente representarán estos fenómenos físicos de meso escala, que podrían ser mejor representados por modelos atmosféricos que resuelven explícitamente la convección (Rondanelli et al., 2023). De este modo, ante los costos inducidos por incrementar la red observacional, asociados a mantenimiento y transmisión de datos, la modelación numérica, que resuelve explícitamente la convección, aparece como una alternativa con gran potencial, que puede entregar resultados ilustradores ante la falta de observaciones en altura (e.g., Rondanelli et al., 2023).

La zona de los ríos El Carmen y El Tránsito, afluentes al río Huasco en la región de Atacama, ha sido afectada por importantes fenómenos aluvionales, como los eventos de marzo de 2015 (Wilcox et al., 2016) y mayo de 2017 (SERNAGEOMIN, 2017); ocasionando importantes daños en la infraestructura vial, viviendas, damnificados y hasta pérdida de vidas humanas. Esto ha generado como respuesta de la Dirección de Obras Hidráulicas, el diseño de planes de mitigación para proteger a las comunidades que han sido históricamente afectadas por estos fenómenos atendiendo a la relevancia de estudiar estos fenómenos.

El objetivo de esta investigación es ilustrar el valor agregado de contar con observaciones de temperatura en altura, sensores de precipitación horarios, y el uso de simulaciones numéricas que resuelven explícitamente la convección en el análisis aluvional del evento de abril de 2024, que activó diversas quebradas afluentes al río El Carmen y El Tránsito.

## 2. DATOS Y MÉTODOS

### 2.1 Zona de estudio

El presente estudio se realizó en la cuenca alta del Río Huasco (aguas arriba del embalse Santa Juana), ubicada en la región de Atacama. La cuenca está conformada por dos ríos principales: el Río Tránsito, y el Río Carmen (Figura 1). Estas cuencas están caracterizadas por un clima árido con escasas precipitaciones, concentradas principalmente en los meses de invierno, y un régimen de escorrentía principalmente nival (Gómez et al., 2011).

La geomorfología de las cuencas está caracterizada por la gran disponibilidad de sedimentos en laderas y altas pendientes (25° en promedio) y porcentajes de suelo desnudo por sobre el 69% (Tabla 1). Sus elevaciones medias se encuentran por sobre los 3000 m s.n.m. lo cual, conjugado con la elevación en promedio de la línea de nieves en otoño (sobre los 3300 m s.n.m.), genera importantes áreas pluviales aportantes, las que han sido acompañadas por la ocurrencia de crecidas y aluviones (e.g., Wilcox et al., 2016; SERNAGEOMIN, 2017).

**Tabla 1.** Características geomorfológicas de las cuencas analizadas.

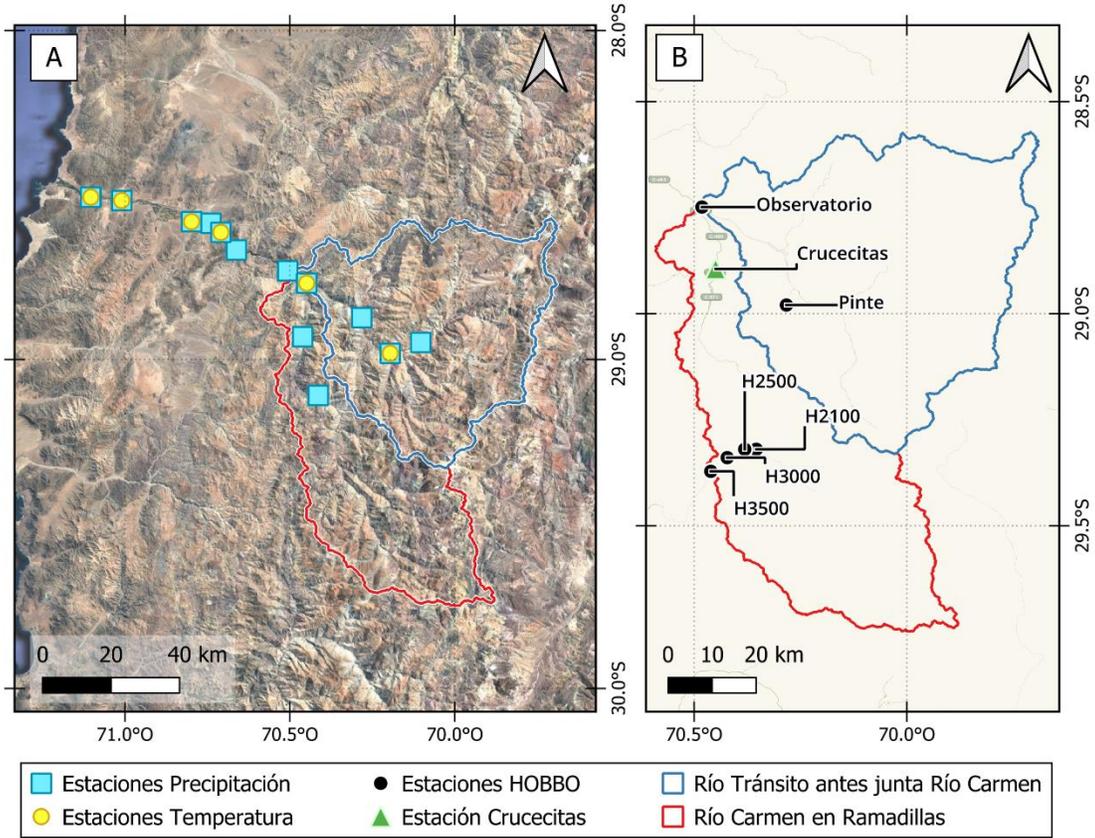
Atributo	Río Tránsito	Río Carmen
Área (km <sup>2</sup> )	4105	3039
Elevación mínima (m s.n.m.)	778	786
Elevación media (m s.n.m.)	3494	3639
Elevación máxima (m s.n.m.)	6114	5485
Pendiente media (°)	24,43	25,38
Suelo con vegetación (%)	29,7	20,1
Suelo desnudo (%)	69,7	79,4
Largo del río principal (km)	146,2	179,4

### 2.2 Datos

#### 2.2.1 Observaciones hidrometeorológicas

Los datos de precipitación y temperatura horaria fueron obtenidos a partir de estaciones meteorológicas nacionales con registros del evento de abril del 2024 (Figura 1A); además, se utilizaron los registros de los sensores HOBO y estación meteorológica Crucecitas, instaladas por el equipo de investigadores de este artículo (Figura 1B). Los sensores HOBO, son sensores de bajo costo, autónomos y de fácil lectura inalámbrica mediante tecnología Bluetooth, estos fueron configurados para registrar de forma horaria la temperatura y humedad del aire. La estación crucecitas fue instalada con sensores de precipitación,

temperatura, y humedad, para registros de cada 10 minutos. La Tabla 2 enumera estas estaciones, indicando su ubicación geográfica, elevación, y variable considerada para el análisis.



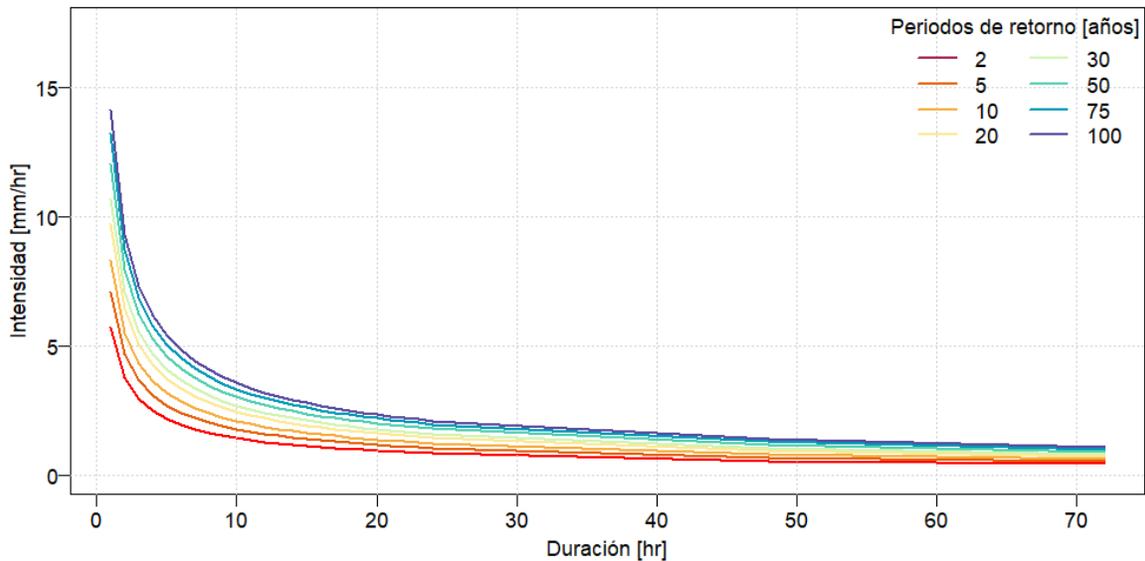
**Figura 1:** (A) Cuencas en estudio y red meteorológica nacional con registros del evento de abril en 2024. (B) Ubicación de los sensores HOBO y la estación meteorológica Crucecitas usadas en este estudio.

**Tabla 2:** Estaciones meteorológicas con registros horarios de precipitación (P) y/o temperatura (T) en la zona de estudio. La estación sombreada (Alto del Carmen), fue utilizada para construir curvas IDF representativas de la zona.

Nombre	Institución	Latitud	Longitud	Elevación (m s.n.m.)	P	T
Río Conay en las Lozas	DGA	-28,949	-70,103	1564	X	
El Tránsito	DGA	-28,873	-70,282	1098	X	
Río Carmen en el Corral	DGA	-29,109	-70,414	1770	X	
San Félix	DGA	-28,931	-70,461	1173	X	
Río Huasco en Algodones	DGA	-28,731	-70,507	734	X	
Santa Juana	DGA	-28,667	-70,663	533	X	
Vallena DGA	DGA	-28,586	-70,740	419	X	
Freirina Nicolasa	DMC	-28,517	-71,010	156	X	X

Nombre	Institución	Latitud	Longitud	Elevación (m s.n.m.)	P	T
CE Huasco Vallenar	AgroMet	-28,581	-70,798	466	X	X
Freirina	AgroMet	-28,507	-71,104	95	X	X
El Parral	AgroMet	-28,982	-70,196	1364	X	X
Imperial Alto	AgroMet	-28,614	-70,709	483	X	X
Alto del Carmen	AgroMet	-28,768	-70,449	822	X	X
H2100	AMTC	-29,320	-70,354	2165		X
H2500	AMTC	-29,320	-70,381	3204		X
H3000	AMTC	-29,339	-70,422	3041		X
H3500	AMTC	-29,372	-70,461	3527		X
Observatorio	AMTC	-28,749	-70,482	977		X
Pinte	AMTC	-28,980	-70,283	1443		X
Crucecitas	AMTC	-28,894	-70,449	1075	X	X

Con el fin de poder caracterizar el evento, se construye la curva IDF con los datos de la estación Alto del Carmen (Fila sombreada en la Tabla 2), con registros horarios desde enero de 2010 hasta la actualidad. Según se muestra en la Figura 2, intensidades mayores a 10 milímetros en una hora tienen periodos de retorno sobre los 30 años.



**Figura 2:** Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para la estación Alto del Carmen en el periodo 2010-2024.

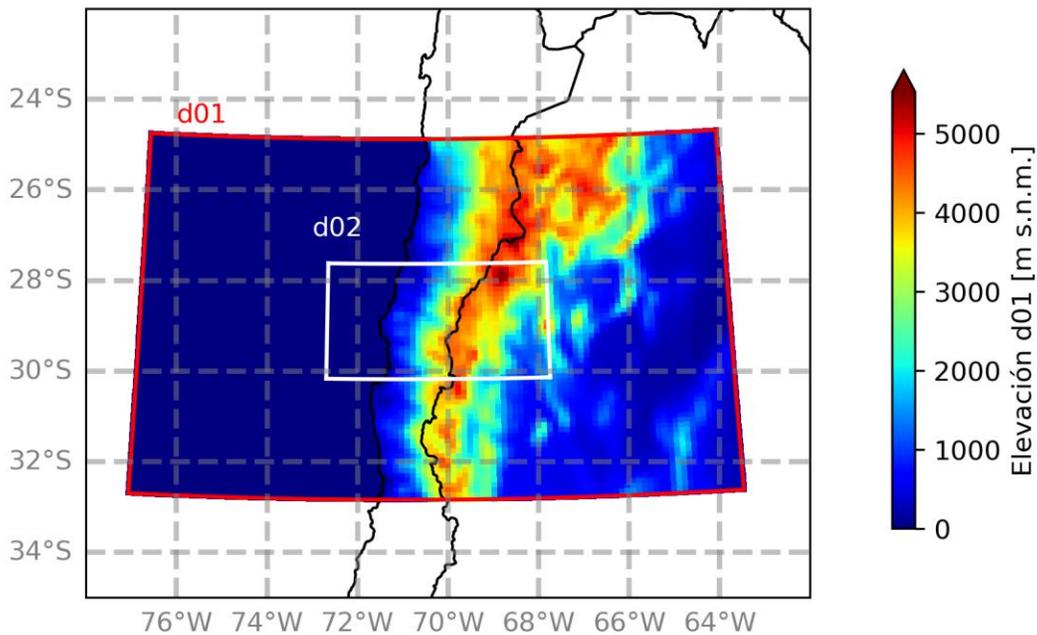
### 2.2.2 Modelación numérica en WRF

Para simular el evento de precipitación, se utilizó el modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al. 2008) considerando dos dominios anidados *d01* y *d02* (Figura 3), y como condición inicial y de borde el modelo *Global Forecasting System* (GFS; NOAA, 2011). El modelo GFS posee una resolución horizontal de ~28 km, y alimenta

el primer dominio *d01* que resuelve la meteorología a una resolución espacial de 12 km. Las salidas de *d01*, a su vez, alimentan el dominio interno *d02*, que tiene una resolución espacial 4 km. En ambos dominios se emplearon los esquemas físicos utilizados por Lagos-Zúñiga et al. (2024) y Yañez-Morroni et al. (2018) en los Andes subtropicales, los cuales se detallan en la Tabla 3. En el caso del dominio interno (*d02*), se resuelve explícitamente la precipitación convectiva.

**Tabla 3:** Esquemas físicos utilizados para el modelo WRF.

Proceso	Esquema	Referencia
Onda corta	Dudhia	Dudhia et al. (1989)
Onda larga	RRTM	Mlawer et al. (1997)
Nubes convectivas dom01	Grell 3D	Grell (1993)
Microfísica de nubes	WSM6	Hong et al. (2006a)
Capa superficial	MM5 Monin-Obukhov	Jiménez et al. (2012)
Modelo Superficie Terrestre	Noah-MP	Niu et al. (2011)
Capa Límite	YSU	Hong et al. (2006b)



**Figura 3:** Dominios simulados en WRF; *d01* (rojo) es el dominio externo (resolución de 12 km), y *d02* (blanco) el dominio interno (resolución de 4 km). La barra de colores muestra la elevación del primer dominio.

### 2.3 Levantamiento de datos en terreno

Entre los días 22 y 27 de abril, una semana después del evento, se realizó un terreno de reconocimiento para identificar los efectos del evento meteorológico en las cuencas del río El Tránsito y El Carmen. La Figura 4 muestra ejemplos de los flujos de detritos y flujos de barro registrados en terreno mediante fotografías dron en laderas y quebradas. Este evento tuvo la particularidad de situarse en la parte alta del río El Carmen y río El Tránsito, la cual

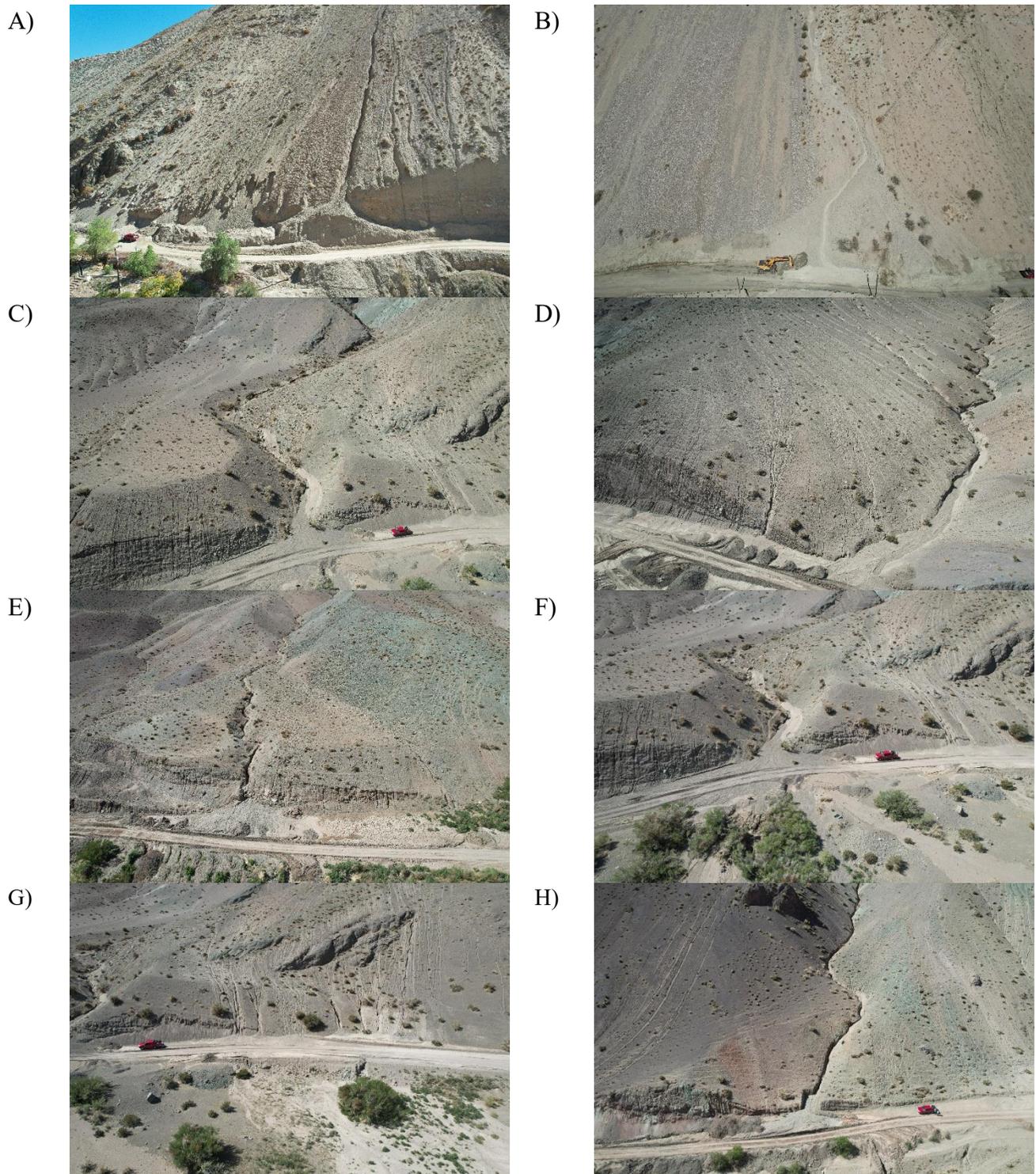
es una zona escasamente habitada. Tanto laderas como quebradas activadas depositaron sedimento en la ruta, afectando la conectividad en el valle, pero sin afectar viviendas. Hacia aguas abajo en ambos valles no se evidenció la ocurrencia de flujos de detritos. La Figura 4.C corresponde a la quebrada de análisis presentada en la Figura 6, la cual se estudia en detalle más adelante.

A partir de estas imágenes resulta evidente que la intensidad de la lluvia superó la capacidad del suelo de absorber el agua generando cárcavas en las laderas. Las laderas con presencia de sedimento fino son más propensas a generar estas estructuras, ya que la mezcla de agua y sedimento fino le permite al flujo arrastrar sedimento de mayor tamaño como arena y, en algunos casos, gravas (Figura 4.A y Figura 4.G). En la zona de estudio se ha observado que las laderas tienden a generar cárcavas que aportan sedimento durante los eventos al cauce principal (Marín et al. 2020, Uribe 2020).

Sólo se registraron mediante puntos georeferenciados (GPS) los flujos de detritos ocurridos en quebradas. Estos puntos se presentan con cruces rojas en la Figura 6. Los flujos de detritos observados corresponden a flujos viscosos con una presencia significativa de gravas. Prueba de esto es que los flujos se detienen rápidamente al perder confinamiento generando profundidades de depósito de hasta casi 1 metro en la zona del cruce de la carretera. Si bien se existen indicios de la ocurrencia de oleadas como depósitos cortados por flujos posteriores o lóbulos apilados, no se evidencian cambios significativos de granulometría o tipo de material entre oleadas. Por último, si bien existen marcas de un flujo líquido posterior en la superficie de los depósitos, este escurrimiento más diluido no fue capaz de generar incisiones significativas lo que indica que una precipitación intensa, pero de corta duración.

## **2.4 Metodología**

Para estudiar el valor agregado de nuevas estaciones y sensores para el estudio de tormentas convectivas en la zona alta del río Huasco, este estudio considera cuatro pasos: (1) Análisis de la tormenta de abril del 2024 mediante la caracterización sinóptica, la estimación de la isoterma cero y precipitación utilizando métodos de extrapolación espacial tradicionales en hidrología: inverso de la distancia (IDW), y gradientes orográficos. Este análisis utiliza tanto la red de estaciones públicas (Figura 1A), como los sensores HOBO y la estación meteorológica Crucecitas instalados en terreno (Figura 1B). (2) Simulaciones numéricas en WRF para el evento, (3) Evaluación del periodo de retorno del evento para distintas duraciones de la tormenta, obtenidas desde observaciones como del modelo WRF, en una de las quebradas activada, contrastando montos observados y simulados. Se comparan los resultados de la estación Crucecitas con los resultados de una “quebrada de análisis” en la parte alta de río El Carmen (Figura 6).



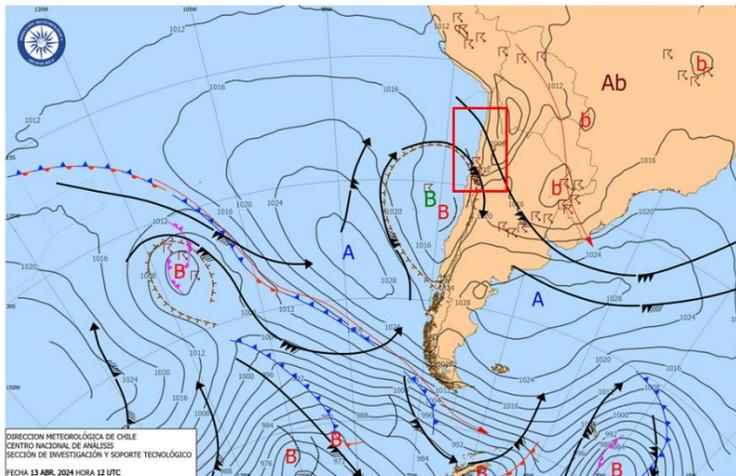
**Figura 4:** Flujos de detritos identificados en terreno.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

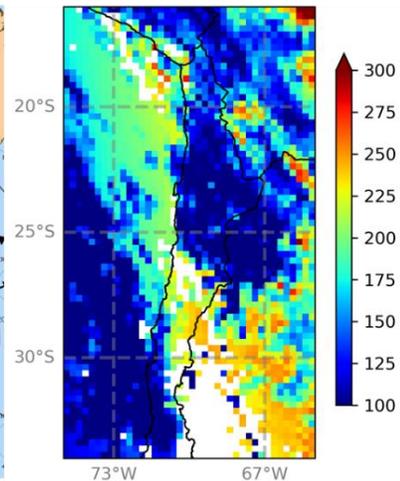
#### 3.1 Análisis de la tormenta abril 2024

El evento de abril de 2024 estuvo dominado por un sistema de baja presión en superficie acoplado a una baja presión en altura (baja segregada), que provocó un jet en altura desde el Noroeste acompañado por actividad eléctrica, tal como se muestra en la carta sinóptica elaborada por la DMC para el 13 de abril de 2024 a las 12 UTC (8 am hora local, Figura 5A). Por otro lado, el satélite GOES16 muestra intensidades de onda larga desde las nubes en el sector cordillerano a la misma hora de la carta analizada, con valores sobre  $230 \text{ W/m}^2$ , indicando la formación de cúmulos con vapor de agua, así como de bandas de nubes en tonos azulados con intensidades de  $100 \text{ W/m}^2$  (Figura 5B).

a) Carta sinóptica DMC 13/Abril/2024 12 UTC

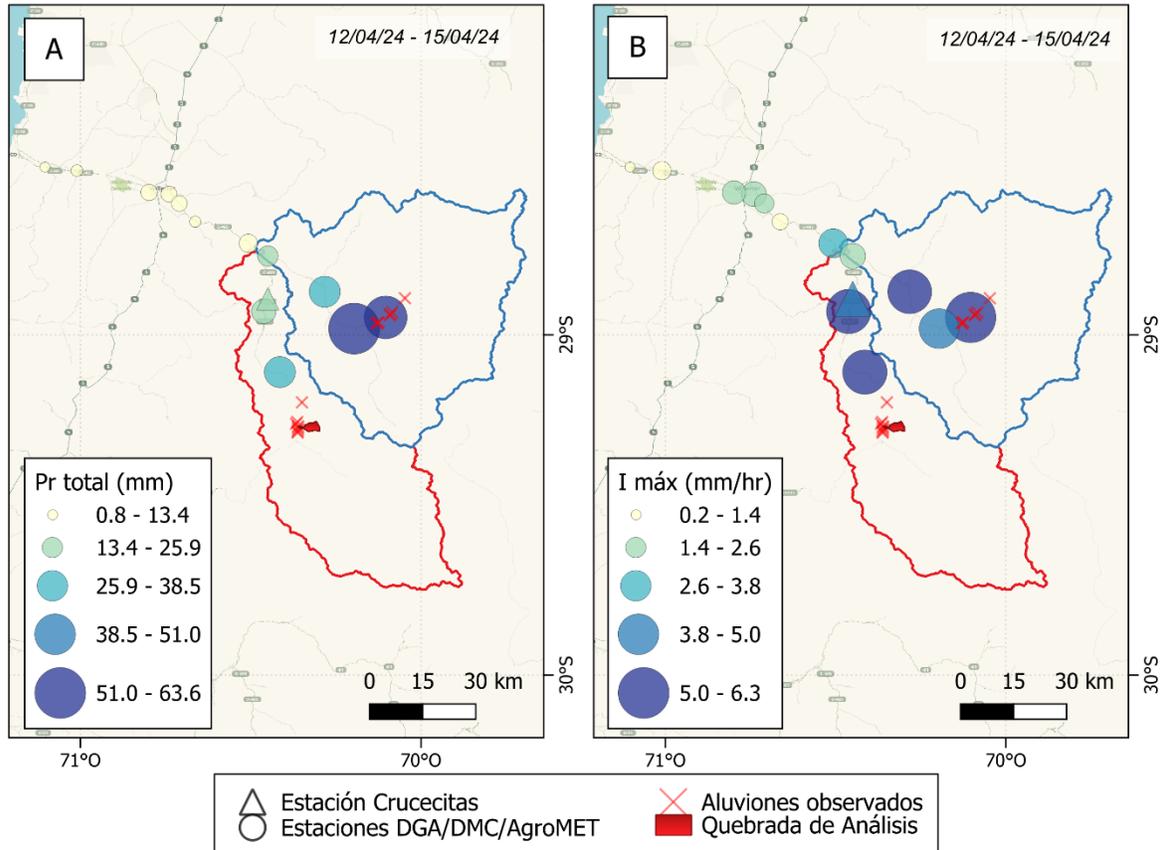


b) OLR GOES 16 [ $\text{W/m}^2$ ]



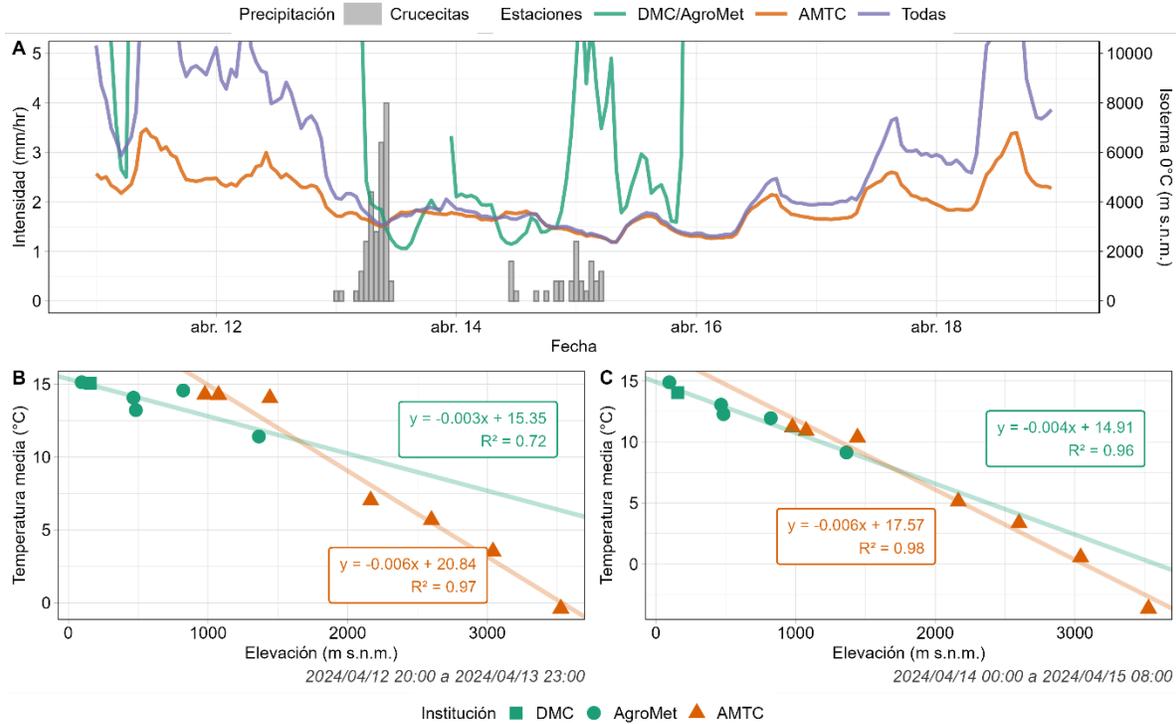
**Figura 5.** A) Carta sinóptica del día 13 de abril de 2024 a las 12 UTC (8 am, hora local). En el recuadro rojo se demarca la zona de estudio, se aprecia en los símbolos la presencia de formación de nubes con un jet en altura desde el NW, acompañado por fuerte actividad eléctrica, mientras que en las costas del Pacífico central se muestra la presencia de una baja presión. B) Imagen GOES16 de la Onda corta reflejada en el tope de la atmósfera (OLR) para la misma fecha y hora.

Los registros de estaciones pluviométricas presentaron precipitaciones entre 0,8 y 63,6 mm durante el evento, con intensidades horarias máximas entre 0,2 y 6,3 mm/h. El evento presentó una distribución con un marcado gradiente orográfico de precipitaciones ( $3\text{mm}/100\text{m}$  en la precipitación total, Figura 6), con montos más importantes en el río El Carmen, pero con intensidades máximas similares en ambos ríos. En la Figura 7A se aprecia que el evento constó principalmente de dos días de precipitación, comenzando en la noche del 12 de abril, precedido por elevaciones de isoterma cero sobre los 3.000 [m s.n.m.], y que durante el segundo día del evento (14 de abril), se produjo un descenso en las temperaturas traducido en una isoterma cero en torno a los 2.400 [m s.n.m.]



**Figura 6:** Medición de estaciones meteorológicas y quebradas aluvionadas. (A) Precipitación total registrada entre los días 12 y 15 de abril del 2024 en las estaciones meteorológicas DGA, DMC, y AgroMet. (B) Intensidad horaria máxima registrada durante el evento en las estaciones meteorológicas.

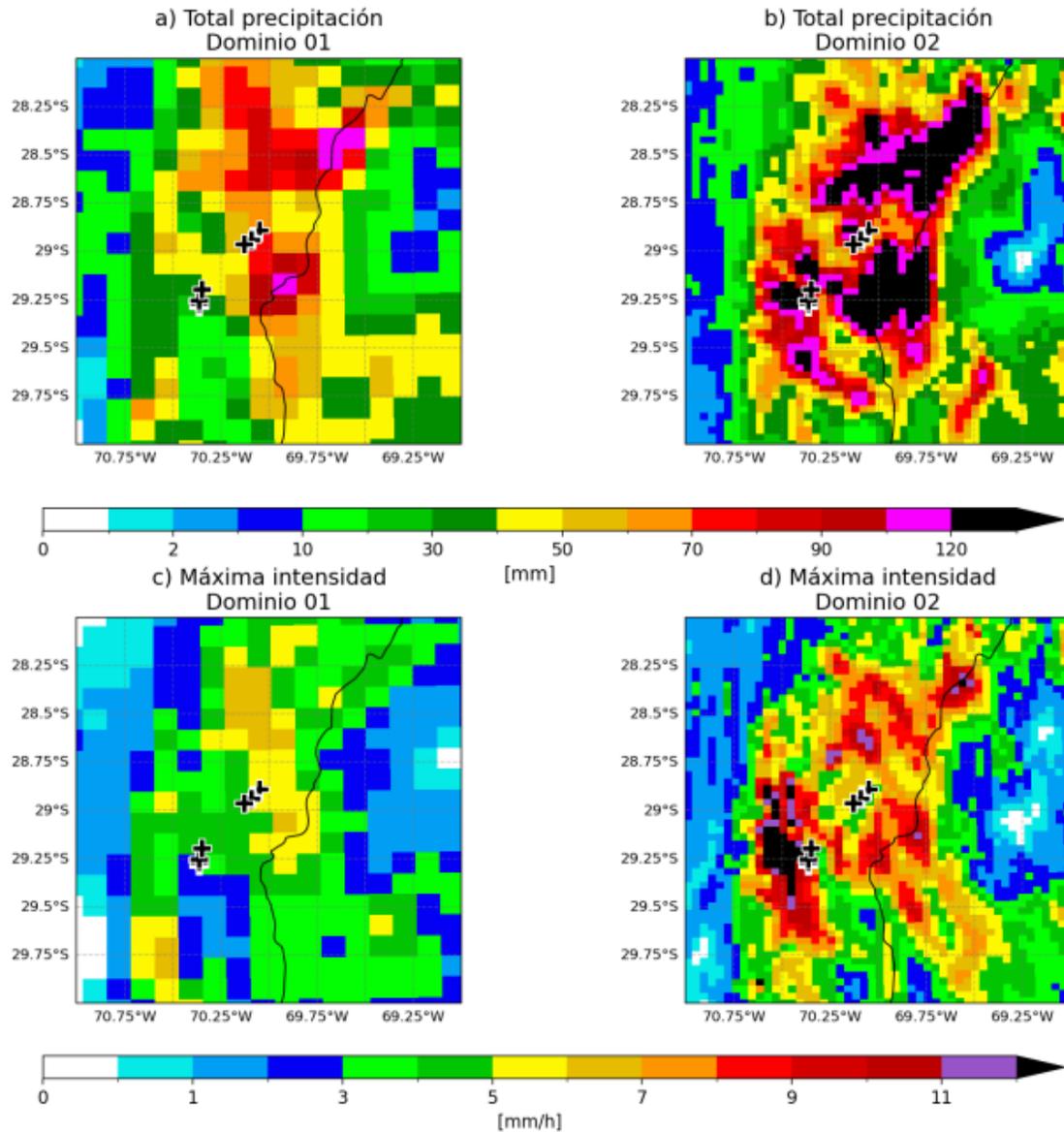
Al analizar el comportamiento de los gradientes verticales de temperatura obtenidos de distintos grupos de estaciones (Figuras 7B y 7C), es posible apreciar una desconexión entre las estaciones más altas (HOBO) y las estaciones públicas (DMC y AgroMet). Considerando las estaciones públicas, se estimarían isotermas cero más elevadas en promedio, salvo algunas horas durante la ocurrencia del evento (Figura 7A). Por otro lado, es evidente el cómo las estaciones en altura influyen fuertemente la estimación de la isoterma cero, recalcando su importancia y utilidad de este tipo de observaciones en condiciones de alerta, y con diversos fines hidrológicos.



**Figura 7:** A) Elevación temporal de la isoterma 0°C según gradientes orográficos en diferentes conjuntos de estaciones. B) Ajuste lineal para las temperaturas medias de los días 12 y 13 de abril, y C) 14 y 15 de abril según estaciones meteorológicas nacionales y las instaladas por el grupo de investigadores.

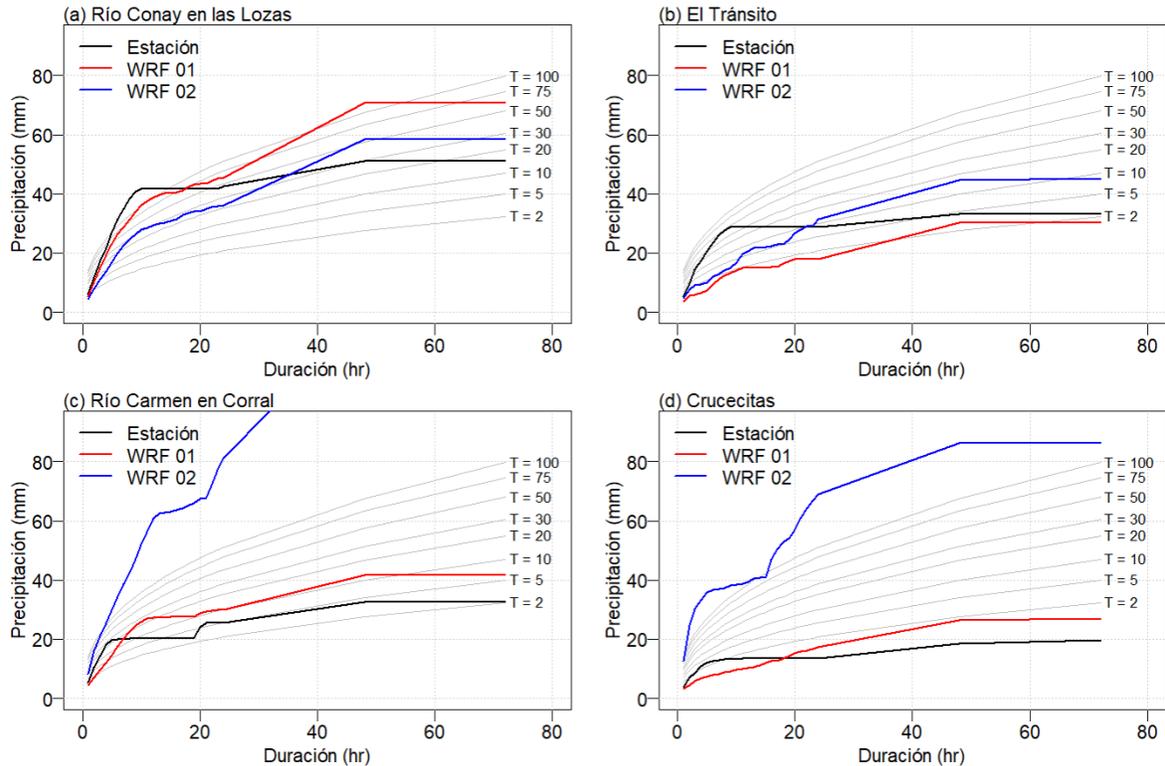
### 3.2. Simulación numérica de la tormenta

Al analizar las simulaciones numéricas en WRF es evidente la ganancia espacial obtenida tanto para los montos totales de precipitación (Figura 8A-B), como para las intensidades máximas simuladas (Figura 8C-D), en todo el dominio de estudio, en contraste a las observaciones puntuales. Por otro lado, las simulaciones que resuelven explícitamente la precipitación convectiva simulan montos de hasta un 50% superiores a los acumulados en el dominio externo, alcanzando máximos por sobre los 120 mm en los días del evento, el doble de los montos máximos observados por las estaciones meteorológicas. En el caso de las intensidades, también se nota que el dominio interno simula intensidades por sobre los 13 mm/hr, mientras que el dominio externo alcanza máximos cercanos a 9 mm/hr, ambos valores bastante por sobre el máximo observado de 6,3 mm/hr. Del mismo modo se aprecia que los montos máximos simulados por el dominio02 se ubican cercanos a las quebradas activadas, mientras que el modelo no convectivo, simula montos más moderados para estas zonas (cruces + en Figura 8).



**Figura 8:** Precipitación total simulada en (A) el dominio *d01* y (B) el dominio *d02*. Los paneles inferiores muestran la intensidad máxima simulada en (C) *d01* y (D) *d02*. Los puntos marcados con '+' son las quebradas aluvionadas.

Al comparar las curvas de intensidad-duración (ID) de la tormenta registrada en las estaciones meteorológicas con las simulaciones del modelo WRF (Figura 9), se observa que en las estaciones río Conay y el Tránsito ambas simulaciones de WRF tienen una distribución similar, mientras que en las estaciones río Carmen en Corral y Crucecitas la simulación con convección sobrestima notablemente los montos de precipitación. Para el caso de la estación Río Conay en las Lozas, las observaciones indican que 10 horas de duración, el evento fue incluso de periodos de retorno mayores a 100 años, y en el Tránsito cercanos a 50 años de periodo de retorno. En el caso de Crucecitas y Río Carmen en Corral, es evidente la sobre estimación de los modelos WRF por sobre los 100 años de periodo de retorno para todas las duraciones analizadas.



**Figura 9:** Curvas ID de las precipitaciones registradas por las estaciones meteorológicas (a) río Conay en las Lozas, (b) el Tránsito, (c) río Carmen en Corral y (d) Crucecitas y las simuladas por WRF 01 y 02 para las mismas ubicaciones.

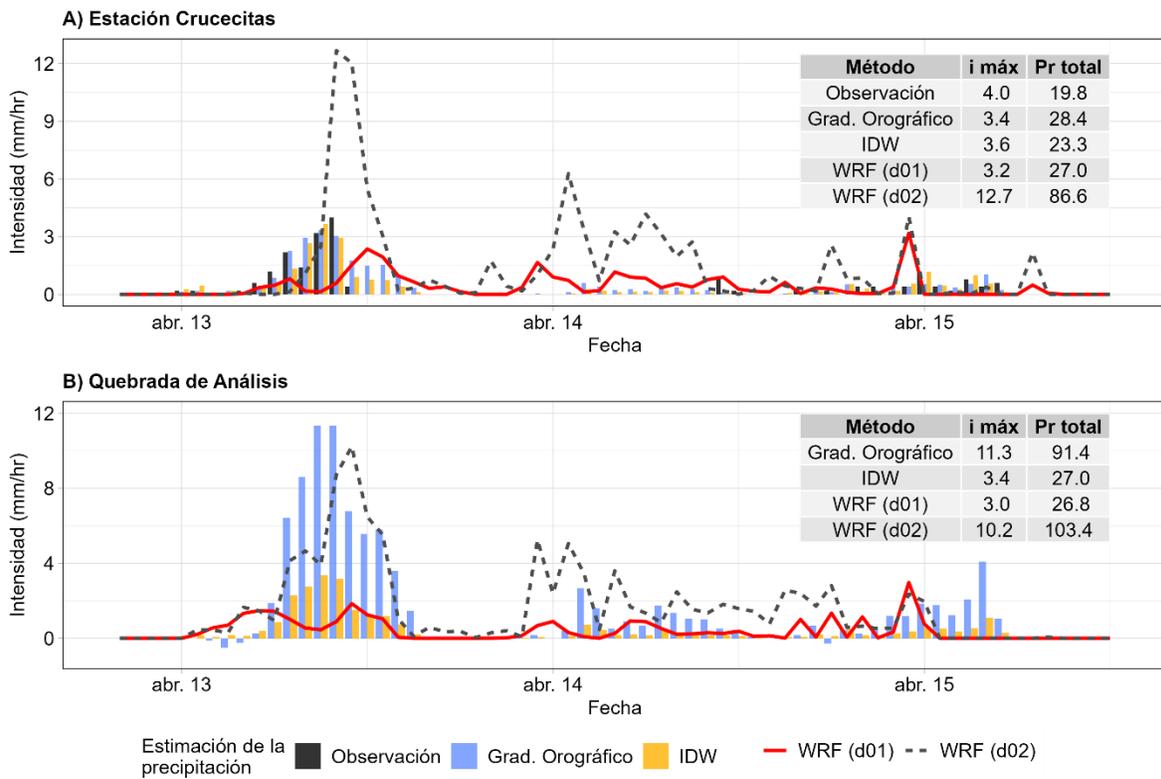
### 3.3. Análisis del evento en quebrada activada

La quebrada de análisis se encuentra en la cuenca del Río Carmen (Figura 6); esta presenta un área total de 10,94 km<sup>2</sup> y elevaciones entre los 2107 y 4205 m s.n.m., por lo que el cálculo de su área pluvial es sensible a la ubicación de la isoterma 0°C durante los días 12 y 13 de abril.

Previo a estimar la precipitación horaria en la quebrada de análisis, se procedió a estimar la precipitación en la estación Crucecitas considerando otras estaciones meteorológicas (Tabla 2) y el modelo WRF. La Figura 10A muestra que todas las estimaciones en la estación Crucecitas presentan pulsos no observados entre las 12:00 del 13 de abril y 22:00 del 14 de abril; las intensidades máximas del gradiente orográfico y el inverso de la distancia son similares en magnitud y hora de ocurrencia al registrado por la estación (4,0 mm/hr a las 10:00 del 13 de abril). Sin embargo, las precipitaciones totales estimadas superan la registrada durante el evento (19,8 mm), especialmente por el modelo WRF para el dominio *d02* (+337%).

Las estimaciones de precipitación en la quebrada de análisis (Figura 10B) presentan tres pulsos de precipitación importantes: la noche del 13 de abril, la mañana del 14 de abril, y la

mañana del 15 de abril. Debido a su alta elevación, las estimaciones con el gradiente orográfico presentan algunos pulsos negativos, mostrando una debilidad de este método; la precipitación estimada con el inverso de la distancia es ligeramente menor a la estimada para su estación más cercana (Río Carmen en el Corral; 32,6 mm y 5,4 mm/hr). La estimación del modelo WRF *d02* en la quebrada de análisis es mayor que el resto de los métodos, similar al caso de Crucecitas, con similitudes temporales con las precipitaciones estimadas con el gradiente orográfico. Estas diferencias en los modelos podrían explicarse tanto por la convección, como por efectos orográficos exacerbados por el incremento de la resolución horizontal del dominio, sin embargo, debido a la falta de mayores registros, no es posible realizar una observación exhaustiva en zonas de mayor elevación, siendo la estación Conay en Las Lozas la de mayor elevación (1564 m s.n.m.), la que entregó un comportamiento más similar a las simulaciones



**Figura 10:** Estimaciones de precipitación horaria en A) estación Crucecitas, y B) la quebrada de análisis. Se comparan los montos observados (barras negras), con los estimados por gradiente orográfico (barras azules) y por inverso de la distancia (barras amarillas). Adicionalmente, se entregan las estimaciones del modelo WRF para los dominios *d01* y *d02*.

Cómo muestra la Figura 10B, las intensidades horarias máximas durante el 13 de abril suceden a las 9:00 (gradiente orográfico = 11,3 mm/hr, IDW = 3,4 mm/hr) y a las 11:00 (WRF *d01* = 1,8 mm/hr, WRF *d02* = 10,2 mm/hr). La Figura 7A muestra que la elevación de la isoterma 0°C ronda entre los 3009 a 3694 m s.n.m (9:00) y 2494 a 3309 m s.n.m. (11:00), lo cual se traduce en una disminución alrededor de 19% y 94% del área pluvial si se utiliza la red meteorológica nacional, en contraste con una disminución del 55% y 43% al considerar adicionalmente las observaciones de las estaciones HOBO instaladas (Tabla 4).

**Tabla 4:** Elevación de la isoterma 0°C y área pluvial de la quebrada de análisis para el día 13 de abril de 2024.

Hora	Estaciones de temperatura	Elevación de la isoterma 0°C (m s.n.m.)	Área pluvial (km <sup>2</sup> )
9:00	DMC/AgroMet	3694	8,9
	AMTC	3009	4,4
	Todas	3080	4,9
11:00	DMC/AgroMet	2494	0,7
	AMTC	3309	6,4
	Todas	3281	6,2

Al considerar estas áreas pluviales para las intensidades máximas del día 13 de abril, se obtienen los volúmenes de agua potenciales a escurrir en la quebrada (Tabla 5). La estimación de los volúmenes de agua muestra diferencias significativas, del doble de volumen estimado en base a estaciones bajas, versus usar los HOBOS AMTC. Pero por otro lado, los métodos de estimación de precipitación también reflejan importantes diferencias, dependiendo de la hora analizada, por ejemplo a las 09 horas del 13/04, al usar gradientes orográficos se obtienen volúmenes 25 veces superiores en la quebrada, que al usar el modelo WRF convectivo, mientras que para las 11 horas, estas diferencias se invierten, siendo el modelo WRF convectivo el que simula un 50% más de volúmenes que utilizar un gradiente orográfico para extrapolar las precipitaciones medidas. De todos modos, al no contar con observaciones suficientes en la quebrada analizada, no es posible indicar cuál de todas las estimaciones es la más certera respecto a lo que realmente transportó el sedimento durante el evento.

**Tabla 5:** Volúmenes líquidos (m<sup>3</sup>) en la quebrada de análisis según los métodos de estimación de precipitación para el día 13 de abril de 2024

Hora	Método estimación de la precipitación	Intensidad (mm/hr)	Volúmenes líquidos estimados según estaciones de temperatura consideradas [m <sup>3</sup> ]		
			DMC/Agro Met	AMTC	Todas
09:00	Grad. Orográfico	11,3	100.570	49.720	55.370
	IDW	3,4	30.260	14.960	16.660
	WRF (d01)	0,5	4.450	2.200	2.450
	WRF (d02)	3,9	34.710	17.160	19.110
11:00	Grad. Orográfico	6,8	4.760	43.520	42.160
	IDW	1,5	1.050	9.600	9.300
	WRF (d01)	1,8	1.260	11.520	11.160
	WRF (d02)	10,2	7.140	65.280	63.240

#### 4. CONCLUSIONES

Ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos de naturaleza convectiva, que pueden gatillar aluviones en el norte y centro del país, el monitoreo de variables meteorológicas resulta relevante para poder mejorar la comprensión de los detonantes que modulan este tipo de eventos. En este sentido, es evidente la desconexión del gradiente vertical de temperaturas del valle del Huasco, en contraste a las observaciones en altura instaladas en la cuenca, producto de procesos de meso escala que no son extrapolables hacia zonas andinas. Las diferencias en estimaciones de isoterma cero pueden presentar variaciones de varios miles de metros al extrapolar las observaciones del valle hacia zonas cordilleranas, traduciéndose en dificultades adicionales para el forzamiento meteorológico de cualquier estudio hidrológico en la zona.

El levantamiento de terreno posterior al evento permitió identificar zonas afectadas por flujos de detritos, particularmente en quebradas localizadas a gran altitud y alejadas de la red convencional de monitoreo. Las quebradas activadas se ubican a más de 30 kilómetros de la estación pública más cercana cuyo registro de precipitación reportó intensidades máximas menores a 7 mm/hr. En contraste, las simulaciones numéricas realizadas en WRF, que resuelven explícitamente la convección, entregaron estimaciones superiores a los 13 mm/hr en los sectores donde se registró la activación de quebradas. Ante la falta de registros directos de precipitación en altura, la validación directa de estas simulaciones resulta desafiante e incierta; sin embargo, los registros de aluviones permiten inferir cuán distintas pueden ser las condiciones meteorológicas en zonas cordilleranas respecto de aquellas estimadas mediante métodos tradicionales de extrapolación desde estaciones de menor altitud. La concordancia entre las zonas aluvionadas identificadas en terreno y las áreas con altas intensidades simuladas refuerza la hipótesis de que los métodos convencionales son insuficientes para la caracterización de los eventos de precipitación. En consecuencia, la integración entre observaciones en terreno, sensores instalados en altura y modelación numérica que incorpora procesos convectivos explícitos permite una mejor caracterización de los gatillantes meteorológicos de flujos de detritos en regiones montañosas.

Ante la ocurrencia de eventos de naturaleza continua, el monitoreo horario o inferior (e.g., solo la estación Crucecitas y DMC tenían registros más frecuentes por hora), distribuidas espacialmente y a diferentes cotas, en zonas donde existe la amenaza aluvional, como el norte del país; así como el contar con simulaciones numéricas que resuelvan la convección, permite entregar nuevas condiciones de borde para el estudio de la problemática aluvional, puesto que métodos tradicionales no son del todo capaces de explicar los volúmenes de sedimentos transportados durante el evento, debido a la extrapolación de montos moderados de precipitación en zonas más bajas. Por el contrario, la determinación de áreas pluviales en base a estaciones de valle entrega sobreestimaciones áreas pluviales, complejizando aún más el análisis de este tipo de eventos. De este modo, la integración de estas herramientas permitirá el avance de estudios transdisciplinarios en la problemática aluvional, desde la escala sinóptica y procesos de meso escala, hasta la escala de quebrada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento del proyecto basal ANID-PIA Project AFB180004 del AMTC. Se agradece también a las instituciones DGA, DMC y AgroMet, quienes permiten acceder de forma expedita a la consulta de las principales variables hidroclimáticas de Chile en plataformas del CR2 como Vismet (<https://vismet.cr2.cl/>). Se agradece además el soporte técnico en la instalación de los sensores de terreno y rescate de mediciones de los investigadores Giovanni Arredondo, Catalina Jerez, y Salvador Quezada.

Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de super-cómputo del NLHPC1 (ECM-02). Los sensores HOBBO, estación Crucecitas, y levantamiento de datos en terreno fueron financiados por el proyecto FONDEF ID22I10122 “Guía metodológica para el diagnóstico y cálculo de la amenaza aluvional presente y futura” dirigido por el Dr. Santiago Montserrat.

## REFERENCIAS

- Aceituno, P. (1996). “Elementos del clima en el Altiplano Sudamericano”. *Revista Geofísica-IPGH*, Vol. 44, pp. 37-55.
- Aceituno, P., Boisier, J. P., Garreaud, R., Rondanelli, R., & Rutllant, J. A. (2021). Climate and weather in Chile. *Water resources of Chile*, 7-29.
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H. E., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., ... & Thinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111606.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., & Rondanelli, R. (2018, April). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU general assembly conference abstracts* (p. 19739).
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). Actualización del balance hídrico nacional, S.I.T. N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile. Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Dudhia, J. (1989), Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci*, 46(20), 3077–3107
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., ... & Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes part I: main climatic features. *Frontiers in Earth Science*, 8, 64.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in geosciences*, 22, 3-11.
- Garreaud, R., Falvey, M., & Montecinos, A. (2016). Orographic precipitation in coastal southern Chile: Mean distribution, temporal variability, and linear contribution. *Journal of Hydrometeorology*, 17(4), 1185-1202.
- Gómez, T., Cepeda, J., Lagos-Zúñiga, M. & S. Montserrat. (2017). Modelación hidrológica de la tormenta 25m en la cuenca del río Huasco: validación de caudales usando datos sedimentológicos. XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica SOCHID. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121(3), 764-787.
- Hong, S. Y., & Lim, J. O. J. (2006a). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42(2), 129-151.
- Hong, S. Y., Y. Noh, and J. Dudhia (2006b), A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Weather Rev.*, 134(9), 2318–2341.
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., & García-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3), 898-918.
- Lagos Zúñiga, M. Á. (2024). Convective precipitation in the subtropical Andes of Central Chile: physical mechanisms and climate change projections. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención fluidodinámica, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Marín, M., V. Fariás y G. Pantoja (2020). Efectos Geológicos del Evento Meteorológico del Norte de Chile de Enero 2020: Observaciones entre El Tránsito y Valeriano, Comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama. *Informe técnico*, 2020. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 35 p. Santiago.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- NOAA National Centers for Environmental Prediction (NCEP). 2011, updated 2023. NOAA/NCEP Global Forecast System (GFS) Atmospheric Model. [09 April 2024 – 06 April 2024]
- Rondanelli, R., Fleming, Z., Campillo, J.M., Lagos-Zúñiga, M., Boisier, J.P., García, Y. (2023). Gradiente de precipitación orográfico en los Andes Centrales subtropicales. Simposio internacional Clima y Resiliencia en Tiempos de Cambio. Center for Climate and Resilience Research (CR)2. Santiago y Viña del Mar, Chile.
- SERNAGEOMIN (2017). Efectos geológicos de los aluviones de Quebrada Paipote y Chollay, 23 de enero de 2017. Región de Atacama. Elaborado por el Servicio Nacional de Geología y Minería: Enrique Opazo y Alejandro Alfaro. INF-ATACAMA-01.2017.
- Scaff, L., Rutllant, J. A., Rahn, D., Gascoin, S., & Rondanelli, R. (2017). Meteorological interpretation of orographic precipitation gradients along an Andes west slope basin at 30 S (Elqui Valley, Chile). *Journal of Hydrometeorology*, 18(3), 713-727.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... & Powers, J. G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR technical note*, 475(125), 10-5065.
- Uribe, F. (2020). Informe Geológico de Remoción en Masa del 27 de Enero de 2020 en el Sector El Tránsito, Comuna Alto del Carmen, Región de Atacama. *Informe Técnico*, 2020. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 47 p. Santiago.
- Viale, M., & Nuñez, M. N. (2011). Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central Andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4), 481-507.

- Wilcox, A. C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otárola, S., ... & Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8035-8043.
- Yáñez-Morroni, G., Gironás, J., Caneo, M., Delgado, R., & Garreaud, R. (2018). Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 9(8), 304.

### **ACERCA DE LOS AUTORES**

**Miguel Lagos Zúñiga** es Ingeniero Civil, Magister en Recursos y Medio Ambiente Hídrico y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Fluidodinámica de la Universidad de Chile. Actualmente es Profesor Asistente del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María, e Investigador Asociado del *Advanced Mining Technology Center* (AMTC). Miguel se ha desempeñado como especialista en hidrología y meteorología, participando en diversos estudios de cambio climático y eventos extremos en Chile y América del Sur.

**Marcia Paredes Aravena** es Ingeniera Civil y Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Actualmente es Investigadora Asociada del *Advanced Mining Technology Center* (AMTC). Marcia se ha dedicado al estudio de interacciones de procesos hidrológicos con coberturas de suelo en la cuenca del Cachapoal, modelación hidrológica, y al análisis hidrológico de eventos aluvionales.

**Diego Pinto Garay** es Ingeniero Civil de la Universidad de Chile. Actualmente es Ingeniero de proyectos del *Advanced Mining Technology Center* (AMTC). Diego se ha dedicado al análisis y generación de forzantes meteorológicas, así como en la modelación hidrológica, participando en proyectos relacionados con la disponibilidad hídrica, eventos extremos y aluviones.

**Alex Garcés** es Ingeniero Civil y Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Cuenta con diez años de experiencia en consultoría y docencia. Actualmente se desempeña como investigador en el Centro de Tecnología Avanzada para la Minería (AMTC) de la Universidad de Chile y está realizando su tesis en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería mención Fluidodinámica en la misma Universidad. Se especializa en el uso de programas de modelación numérica de escurrimiento superficial, sistemas de información geográfica, y lenguajes de programación. También se ha especializado en el uso de drones para el levantamiento de información en terreno.

**Santiago Montserrat** es Ingeniero Civil, Magister en Recursos y Medio Ambiente Hídrico y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Fluidodinámica de la Universidad de Chile, con más de 18 años de experiencia en estudios de hidrología e hidráulica. Investigador asociado del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC) de la Universidad de Chile. Experto en estudios medioambientales, hidrodinámica y calidad de aguas, transporte de sedimentos, flujos aluvionales, estudios hidrológicos y de cambio climático. Experiencia en gestión de equipos multidisciplinarios para proyectos de ingeniería e investigación incluyendo estudios experimentales, monitoreo en terreno y modelación numérica en 1, 2 y

3 dimensiones. Participación reciente en estudios de ingeniería y de investigación en proyectos de modelación y mitigación aluvional, incluyendo monitoreo en terreno

# EXPOSICIÓN DE INFRAESTRUCTURA CRÍTICA Y ESTIMACIÓN DE COSTOS DE RECONSTRUCCIÓN EN ÁREAS AFECTADAS POR LOS ALUVIONES DE MARZO 2015 EN LA CUENCA DEL SALADO: ANÁLISIS INTEGRADO DE LA INFORMACIÓN CAPTURADA POR SERNAGEOMIN.

NATALIA GARRIDO URZÚA, HUGO NEIRA SANTANDER

<sup>1</sup>SERNAGEOMIN

Natalia.garrido@sernageomin.cl

<sup>2</sup>SERNAGEOMIN

Hugo.neiras@sernageomin.cl

## RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo analizar la exposición territorial y los costos estimados de reconstrucción de infraestructuras afectadas por los aluviones de marzo de 2015 en las ciudades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro, con base en los datos geoespaciales proporcionados por SERNAGEOMIN. A través de un análisis geoespacial detallado, se estima la magnitud de la infraestructura expuesta a los flujos, así como la posible inversión necesaria para su recuperación.

En el caso de Chañaral, se identifica que la exposición de infraestructuras es principalmente vial y energética, sin presencia de jardines infantiles, relaves ni otras infraestructuras críticas, lo que refleja una vulnerabilidad más baja en comparación con otras áreas. En El Salado se observa que, aunque sólo se cuenta con un jardín Junji, la afectación de este tipo de infraestructura puede tener impactos significativos en la dinámica social y económica local. Finalmente, Diego de Almagro presenta una mayor concentración de infraestructuras expuestas, lo que implica una mayor complejidad en su recuperación.

Se calculan los valores aproximados de inversión necesaria para cada zona, considerando la infraestructura expuesta en 2025 y empleando el indicador oficial del Ministerio de Vivienda (16,21 UF/m<sup>2</sup>).

Este artículo contribuye a la discusión sobre la resiliencia territorial y la preparación ante futuros eventos aluvionales, destacando la relevancia de integrar los datos geoespaciales en los procesos de toma de decisiones para la planificación y reconstrucción en zonas vulnerables. A 10 años desde el evento de 2015, los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de realizar ajustes y actualizaciones periódicas en los planes de gestión de riesgos y recuperación, especialmente a la luz de las lecciones aprendidas y la evolución de los costos de construcción.

**Palabras claves:** Aluviones 2015, Vulnerabilidad, Resiliencia territorial, Sernageomin, Remociones en masa, Chañaral, El Salado, Diego de Almagro, Atacama, Reconstrucción.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo se desarrolla en la cuenca del río Salado, ubicada en la región de Atacama, provincia de Chañaral. La cuenca tiene una extensión de 175 km y una superficie de 7.400 km<sup>2</sup>, el río Salado presenta un escurrimiento muy esporádico. El trabajo en detalle se focaliza en las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro (Figura 1).

El evento meteorológico ocurrido entre el 24 y 26 de marzo 2015 se caracterizó por intensas lluvias desde la precordillera hasta la costa. En la precordillera se registró el máximo de precipitación caída de 92,5 mm en la Estación Intelec de Codelco. La lluvia fue la principal desencadenante de flujos aluviales en la Quebrada El Salado.

Estos flujos aluviales impactaron las ciudades ubicadas en torno al río, con alta energía y carga sedimentaria, generando destrucción de infraestructura, inmuebles, vía férrea, vehículos, depósitos de relaves y otras instalaciones a su paso.

A 10 años del evento, este trabajo tiene por objetivo principal analizar la exposición actual de la infraestructura en el área afectada por el evento 2015. Para esto se presentan los datos de altura de inundación y depósito recopilados en el marco del trabajo de emergencia en el valle del río Salado, se estima la infraestructura expuesta actual en los centros urbanos y se valoriza el costo de reconstrucción según Guía Minvu.

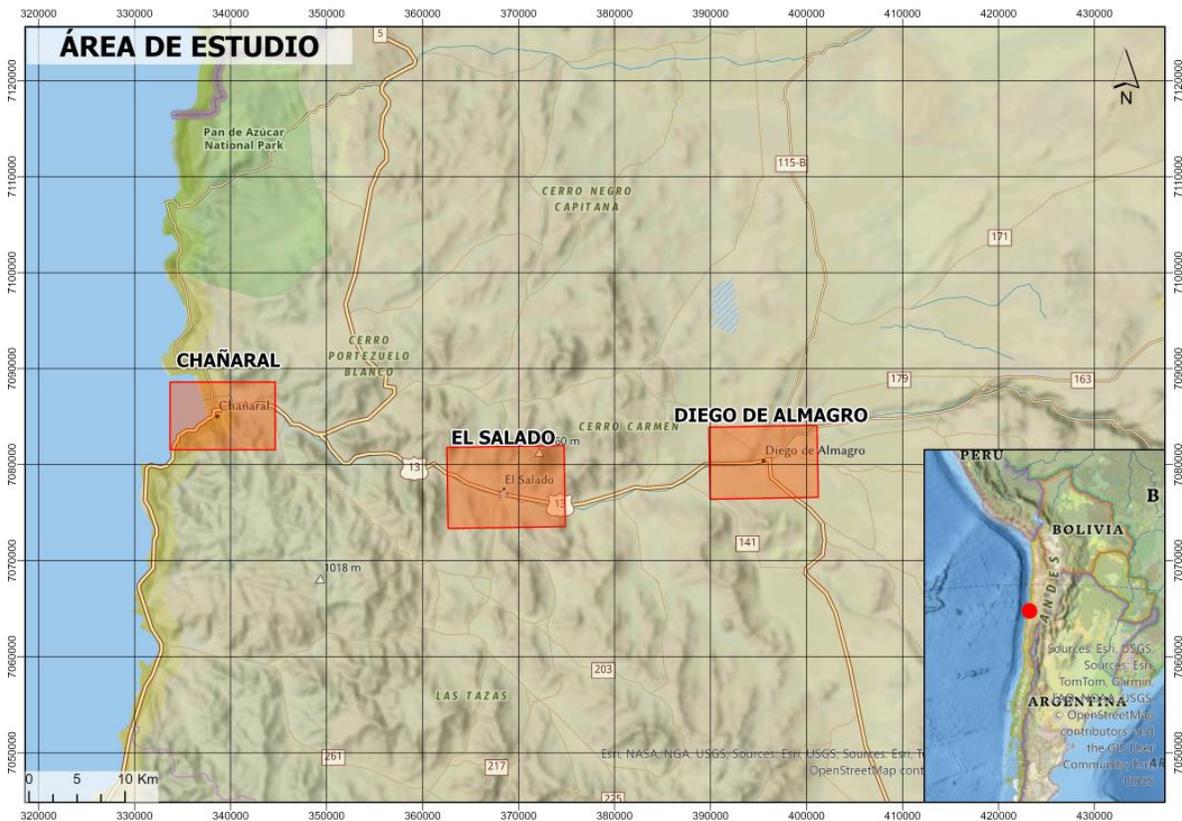


Figura 1. Ubicación área de estudio.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Definición de áreas afectadas en 2015.

Previo al trabajo de terreno se realizó la fotointerpretación mediante fotografías aéreas proporcionadas por SAF, de las áreas afectadas por los aluviones, con énfasis en las zonas pobladas. En la campaña de terreno se redefinieron estas áreas fotointerpretadas en base a observaciones in situ.

### 2.2. Captura de datos de altura de depósito e inundación.

La medición de las alturas de depósito e inundación se realizó con cinta métrica, buscando como referencia la topografía previa al evento. Las coordenadas de los puntos de terreno fueron capturadas con GPS en datum WGS84 huso 19S. La distribución de los puntos capturados está condicionada por la accesibilidad del territorio durante la campaña de terreno.



**Figura 2.** Mediciones en terreno. Izq.: Medición de altura de inundación en área urbana Chañaral. Der.: Medición altura depósito e inundación sector urbano Diego de Almagro.

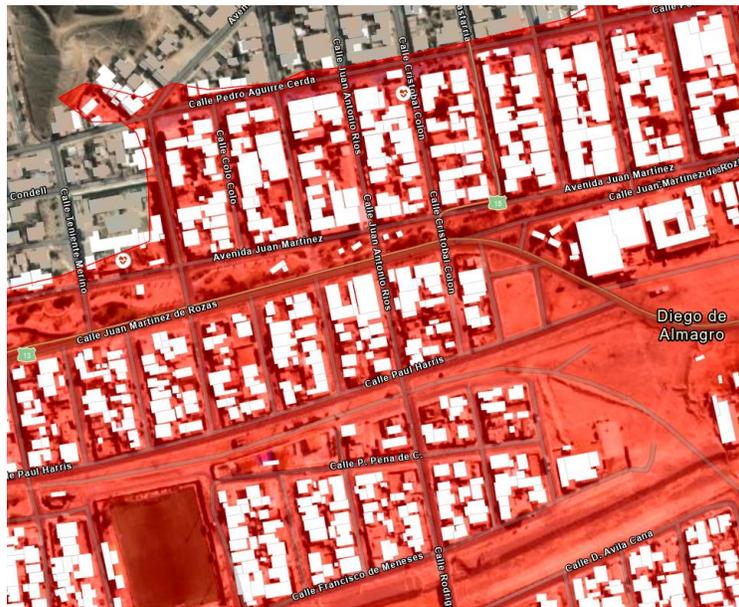
### 2.3. Definición de infraestructura expuesta en 2025

La definición de la infraestructura expuesta en 2025 se abordó mediante una metodología que combina técnicas avanzadas de modelado geoespacial y análisis de datos, centradas en la identificación precisa de infraestructuras susceptibles a riesgos derivados de aluviones y remociones en masa en las zonas afectadas por el evento de 2015. El proceso se estructuró bajo los siguientes pasos.

#### 2.3.1 Modelado de Infraestructuras con Inteligencia Artificial (IA)

El análisis comenzó con la aplicación de una secuencia de comandos (Sirko et al., 2021) de Open Buildings (Footprint), un modelo de inteligencia artificial (IA) especializado en la detección automática de edificaciones a partir de imágenes satelitales de alta resolución. El algoritmo, basado en redes neuronales profundas, identificó las huellas de las construcciones a nivel global y fue configurado para seleccionar solo aquellas con un intervalo de confianza  $\geq 75\%$ , lo que garantiza una alta precisión en la representación espacial y evita la inclusión de datos inciertos. Este umbral se estableció considerando los estándares de calidad

requeridos para un análisis de impacto a gran escala y la alta variabilidad de la infraestructura en las zonas de estudio. Esta metodología (Sirko et al., 2021) se apoya en redes neuronales convolucionales (CNN) entrenadas para identificar patrones complejos en las imágenes y distinguir con alta precisión entre infraestructuras construidas y otros elementos del terreno (Figura 3). El uso de esta técnica permitió automatizar la identificación de estructuras a gran escala, mejorando tanto la eficiencia como la exactitud del proceso de mapeo en áreas afectadas por el aluvión.



**Figura 3.** Modelado de Infraestructuras con Inteligencia Artificial se identificaron las huellas de las construcciones a nivel global y fue configurado para seleccionar solo aquellas con un intervalo de confianza  $\geq 75\%$ , caso ejemplo del sector urbano de Diego de Almagro, polígonos blancos: infraestructura identificada en 2025; en rojo: el área de afectación del año 2015.

### 2.3.2 Datos Espaciales Avanzados

Se calculó el área de cada construcción en metros cuadrados ( $m^2$ ), proporcionando una medida de la extensión física de las infraestructuras que facilita la evaluación de la exposición al riesgo en función del tamaño y su ubicación en áreas de alta vulnerabilidad.

Para mejorar la interpretación visual de los datos y evitar la sobre concentración de elementos modelados, especialmente en sectores urbanos densos. Se aplicó una técnica de agrupación espacial a las infraestructuras detectadas. Esta agrupación no modifica los datos originales ni su análisis cuantitativo, sino que permite representar de forma más clara la magnitud y distribución de la exposición. De este modo, se facilita la comprensión territorial del fenómeno, haciendo evidente la densidad de infraestructura expuesta sin perder detalle sobre su ubicación general. Esta representación es especialmente útil en etapas de visualización de resultados y comunicación de hallazgos a actores no técnicos.

### 2.3.3 Identificación de Infraestructuras Críticas

Para garantizar que se incluyeran las infraestructuras de mayor relevancia en el análisis, se incorporaron elementos clasificados como infraestructuras críticas, utilizando datos complementarios de diversas fuentes, como el catastro de relaves de Sernageomin. Entre las infraestructuras críticas consideradas se incluyen:

- **Depósitos de relaves:** Estructuras mineras de almacenamiento de residuos que, en caso de exposición a eventos extremos como aluviones o precipitaciones intensas, pueden comprometer su estabilidad física, generando riesgos significativos de colapso, dispersión de material contaminante y afectación a ecosistemas y asentamientos humanos cercanos (Datos públicos depósito de relaves, SERNAGEOMIN).
- **Jardines Infantiles JUNJI:** Infraestructura educativa destinada a la primera infancia, cuya geolocalización se utilizó para identificar puntos sensibles en el territorio. Su presencia en zonas expuestas permite caracterizar espacialmente la vulnerabilidad de grupos etarios altamente dependientes, como niños, frente a eventos extremos (IDE Chile).
- **Centros de Salud:** Se geolocalizaron establecimientos asistenciales públicos de atención primaria y secundaria como parte del análisis de infraestructura crítica. Su identificación permite incorporar a la modelación espacial puntos estratégicos para la respuesta sanitaria en emergencias, dada su relevancia en la capacidad de atención frente a eventos con múltiples víctimas o afectación masiva (IDE Chile).
- **Estaciones fotovoltaicas:** Se incorporaron mediante coordenadas geográficas conocidas las instalaciones de generación solar, como parte del sistema energético regional. Su inclusión permite evaluar la exposición de activos claves en la matriz energética, particularmente en contextos de transición hacia fuentes renovables y considerando su vulnerabilidad ante procesos de remoción en masa (IDE Chile).
- **Carreteras y líneas de transmisión:** Se integraron las principales vías de conectividad terrestre y redes de transmisión eléctrica mediante capas vectoriales. Estos componentes son esenciales tanto para el funcionamiento económico como para la logística de respuesta ante emergencias, por lo que su exposición geoespacial permite anticipar potenciales interrupciones en el flujo de personas, bienes y servicios vitales (IDE Chile).

### 2.3.4 Integración de Infraestructuras en Áreas de Riesgo

Una vez identificadas y geoespacialmente modeladas las infraestructuras expuestas mediante técnicas de detección automática y recopilación de capas críticas, se procedió a su integración con el polígono de afectación asociado al evento aluvional de 2015, delimitado en terreno. Esta superposición espacial permitió cuantificar y localizar las infraestructuras emplazadas dentro de la zona de afectación de 2015. El cruce de información proporciona una caracterización de la exposición directa y establece una línea base para escenarios prospectivos (como el correspondiente a 2025), facilitando la estimación del impacto potencial en términos físicos, económicos y funcionales sobre los servicios públicos, la infraestructura productiva y la conectividad territorial.

## 2.4. Cálculo de costo de reconstrucción

Este enfoque metodológico permite realizar una estimación preliminar del costo de reconstrucción basado en información geoespacial de las áreas afectadas y en la aplicación de un valor unitario estandarizado por metro cuadrado. La elección del indicador de 16,21 UF/m<sup>2</sup>, definido por el Ministerio de Vivienda (MINVU, 2025), responde a su carácter oficial y representativo para obras de edificación genérica en contextos urbanos. Esta unidad de medida se aplicó de manera uniforme sobre el total de superficie construida, permitiendo generar una estimación homogénea para todas las localidades analizadas.

La conversión de UF a dólares estadounidenses se realizó utilizando un valor referencial de 1 UF = 30 USD, con el fin de expresar los resultados en una moneda de análisis internacionalmente comprensible. La fórmula aplicada considera únicamente el área construida, sin discriminar por tipo de infraestructura ni estado previo de conservación, lo cual se justifica por la naturaleza exploratoria y comparativa del presente ejercicio metodológico. Si bien esta aproximación no contempla variaciones tipológicas ni particularidades constructivas, permite establecer una base cuantitativa para futuras proyecciones de impacto económico ante eventos aluvionales en zonas urbanas.

Para estimar de forma referencial la inversión necesaria para la reconstrucción de la infraestructura, se utilizaron los datos geoespaciales disponibles y se aplicó el costo unitario de 16,21 UF/m<sup>2</sup>, según lo establecido por el Ministerio de Vivienda (MINVU, 2025).

El primer paso del análisis consistió en calcular el costo total en Unidades de Fomento (UF). Utilizando la fórmula:

$$\text{Costo Total (UF)} = \text{Área Total (m}^2\text{)} \times \text{Costo por m}^2 \text{ (UF/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Para expresar este monto en dólares estadounidenses, se realizó la conversión utilizando un valor referencial de 1 UF = 30 USD. De esta forma, el costo total en dólares se estimó en:

$$\text{Costo Total (USD)} = \text{Costo Total (UF)} \times 30 \text{ USD/UF} \quad (2)$$

Este valor representa la inversión bruta necesaria para la reconstrucción de la totalidad de las infraestructuras, considerando los supuestos adoptados y utilizando promedios referenciales.

### 3. RESULTADOS

Como resultado del trabajo de respuesta de la emergencia marzo 2015, se obtienen datos de alturas de depósito e inundación y cartografía de las áreas afectadas, para este artículo se presenta un análisis de la infraestructura actual dentro del área afectada en 2015, estimando un costo a la posible reconstrucción, según se indica en el apartado 2.

Se aborda este contenido para cada localidad estudiada.

#### 3.1. Chañaral

##### 3.1.1. Descripción del evento en Chañaral

Aproximadamente, a las 06:00 del 25 de marzo, se registró el primer pulso de flujo que localmente superó los márgenes de la Quebrada El Salado. A las 12:00 se registró un pulso mayor, que inunda y destruye el centro de la ciudad de Chañaral, bajo la calle Merino Jarpa. La duración del flujo e inundación asociada se prolongó por al menos 24 horas (Contreras et al., 2015).

Los depósitos en la quebrada el Salado presentan un espesor máximo, observado en la desembocadura de la quebrada de 3,5 m (punto B, Tabla 1), y en el eje principal de la quebrada, de aproximadamente 2 m (punto D, Tabla 1).

El depósito está compuesto por una intercalación de niveles centimétricos de gravas matriz soportadas (matriz arcilla a arenas) con escasas gravas clastosuportadas. Los fragmentos que constituyen las gravas son generalmente líticos angulosos de hasta 40 cm, además el depósito contiene elementos antrópicos como maderas (tablones, ramas y durmientes), vehículos (autos y camiones), restos de la línea férrea, bolsas, telas, entre otros (Contreras et al., 2015).

Cada uno de los niveles de depósito observado presenta una característica gradación inversa y están cubiertas por una capa de lodo que sella el depósito, caracterizada por desarrollar grietas de desecamiento en superficie. La inundación arrastró consigo fragmentos de escombros entre los que se observaron vehículos o partes de estos, tablones y abundante basura (Figuras 4 y 5).



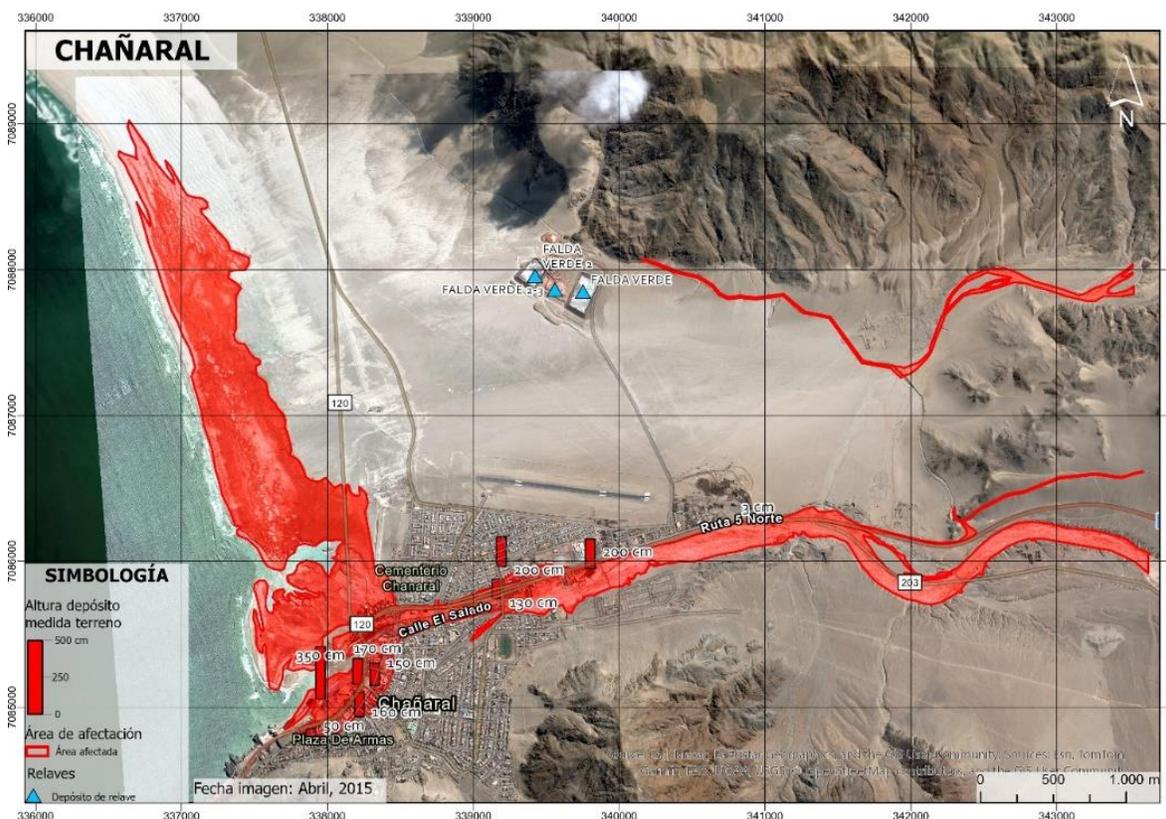
**Figura 4.** Efectos en la ciudad de Chañaral. Izq.: Depósito en sector delta (punto B, Tabla 1). Der.: Depósito en sector centro.

### 3.1.2. Alturas de inundación y depósito en Chañaral

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos en terreno de las mediciones de espesores de depósito y de altura de inundación, el área afectada se presenta en la figura 5.

**Tabla 1.** Registro de datos, ciudad de Chañaral. (Contreras et al., 2015)

ID	UTM ESTE	UTM NORTE	DEPÓSITO (CM)	INUNDACIÓN (CM)	DESCRIPCIÓN
A	339192	7085827	200	250	Cuerpo de bomberos
B	337954	7085054	350	450	Punta Sur Oeste Chañaral
C	337886	7084800	50	90	Esquina SW calles sin nombre
D	339802	7085950	200	300	Cauce RÍo Salado Sector E Chañaral
E	340758	7086256	3	10	Límite N inundación cauce RÍo Salado
F	338219	7084971	160	210	Centro: Merino Jarpa/ Los Baños
G	338305	7085100	170	257	Centro: Merino Jarpa/ Conchuelas
H	338325	7085148	150	250	CESFAM Merino Jarpa
I	339162	7085745	130	240	Cauce, cruce calle Jorge Rivera



**Figura 5.** Área afectada con datos de alturas de depósitos obtenidos en terreno. Comuna de Chañaral, sector Chañaral (adaptado de Contreras et al., 2015).

### 3.1.3 Análisis de infraestructura expuesta en 2025 en Chañaral

Aplicando la metodología indicada en los apartados 2.3 y 2.4, se obtiene que, en Chañaral, la suma total del área construida en la ciudad es de aproximadamente 52.507,58 m<sup>2</sup>, proveniente de 348 infraestructuras individuales cuyos tamaños varían entre 7,76 m<sup>2</sup> (mínimo) y 1.772,99 m<sup>2</sup> (máximo), con un valor promedio de cerca de 151 m<sup>2</sup>.

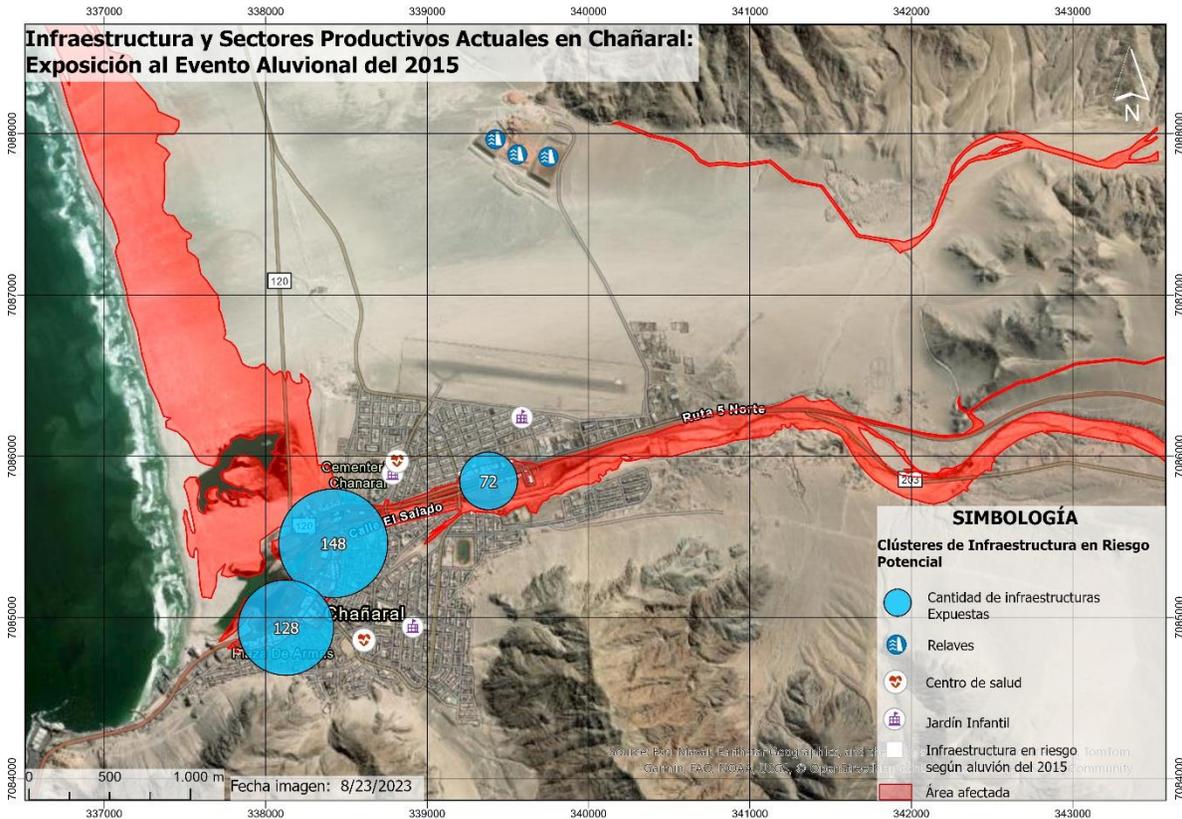
Aplicando la fórmula 1, se obtiene:

$$\text{Costo Total (UF)} = 52.507,58 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ UF/m}^2 \approx 851.148 \text{ UF}$$

Y luego, para obtener el costo en dólares, se aplica la fórmula 2, resultando:

$$\text{Costo Total reconstrucción (USD)} \approx 25.534.440 \text{ USD}$$

Este valor representa la inversión bruta necesaria para la reconstrucción de la totalidad de las infraestructuras en Chañaral, considerando los supuestos adoptados y utilizando promedios referenciales (Figura 6).



**Figura 6.** Distribución espacial de infraestructuras y sectores productivos en Chañaral, resaltando los núcleos críticos expuestos en función del evento aluvional de 2015. El mapa integra datos actualizados de área construida y tipologías diversas, ofreciendo un marco referencial para evaluar la vulnerabilidad y planificar estrategias de mitigación ante futuros eventos similares.

En la zona afectada por los aluviones de 2015 en Chañaral, se identifican actualmente infraestructuras viales y energéticas, además de un conjunto significativo de 348 edificaciones cuya función específica no ha sido categorizada, pero que se encuentran dentro del área afectada por el evento de marzo 2015 (Figura 6).

Aunque no se registran jardines infantiles, centros de salud, relaves u otras instalaciones críticas reconocidas, la magnitud de la superficie construida en esta zona advierte sobre una exposición no menor. La falta de información detallada sobre estas edificaciones no implica una baja vulnerabilidad, ya que podrían incluir viviendas, comercio, instalaciones productivas o equipamiento urbano relevante. Esta condición subraya la necesidad de avanzar en una caracterización más precisa del territorio para una mejor gestión del riesgo.

El mapa permite visualizar cómo, aun en ausencia de grandes instalaciones críticas identificadas, la afectación de estas infraestructuras podría generar disrupciones importantes en la dinámica económica, social y funcional de la comuna frente a un evento aluvional de magnitud similar.

### 3.2. El Salado

#### 3.2.1 Descripción del evento en El Salado

Producto del evento, el área urbana quedó dividida en dos sectores: norte y sur. Múltiples construcciones fueron dañadas, en la parte central del pueblo (Figura 7). La ruta C- 13, que conecta El Salado con Chañaral y Diego de Almagro, fue destruida en la parte central de la localidad y parcialmente cubierta en distintos segmentos (Garrido et, al., 2015).

La quebrada del río Salado canalizó los flujos principales, que generaron la mayor destrucción. (Figura 8). Los depósitos encontrados en la quebrada el Salado presentan un espesor máximo, observado en el eje principal de la quebrada, de aproximadamente 2,5 m (punto J, Tabla 2). Estos depósitos están compuestos por una intercalación de niveles centimétricos de gravas matriz soportadas con escasas gravas clastosoportadas.



**Figura 7.** Fotografías afectación sector El Salado. Izq.: Marca de altura de inundación en vivienda sector sur. Der.: Zona cero, se observa inmueble rojo con un piso de altura de inundación.

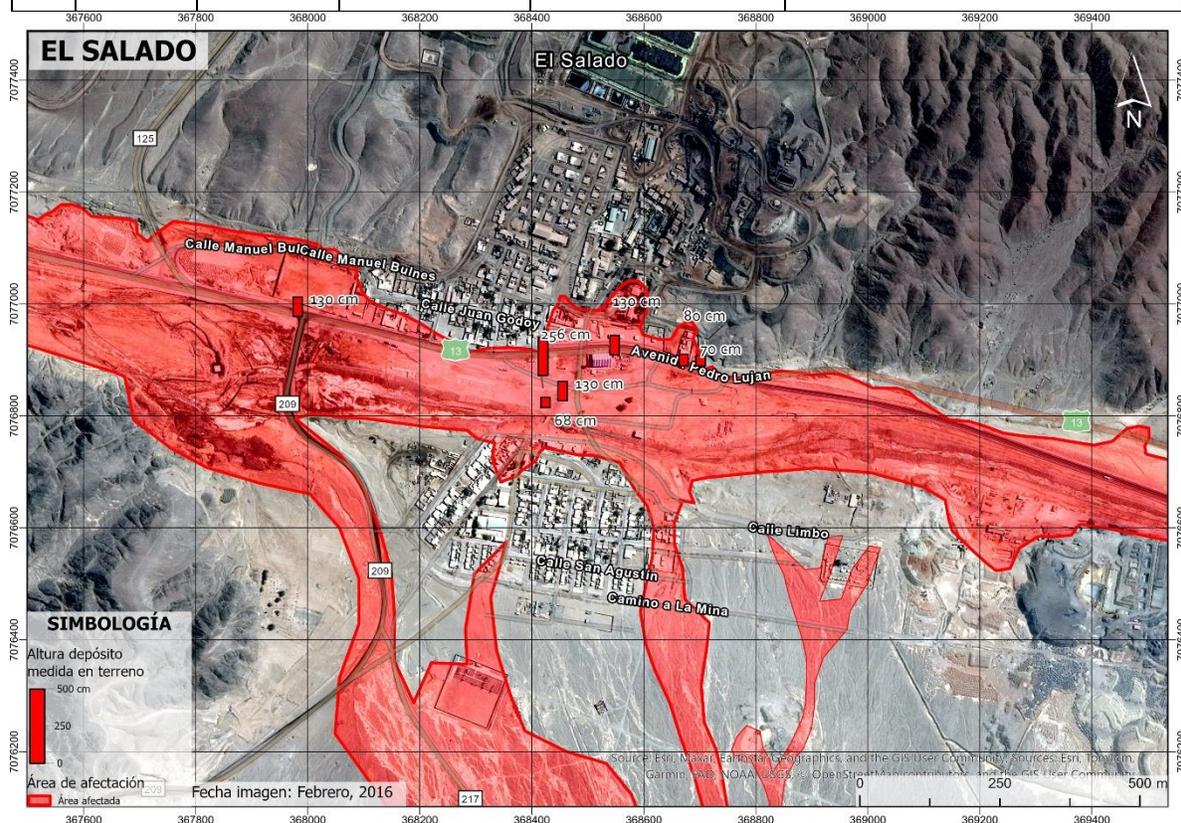
Adicionalmente se observó, en postes y murallas de la zona urbana, marcas de inundación y salpicaduras que alcanzan entre 2,5 m y 3,5 m (puntos J, L y M, Tabla 2, Figura 7) (Garrido et al., 2015).

### 3.2.2. Alturas de inundación y depósito en El Salado

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos en terreno de las mediciones de espesores de depósito y de altura de inundación, la figura 8 presenta el área afectada.

**Tabla 2.** Registro de datos, El Salado, comuna de Chañaral. (Garrido et al., 2015).

ID	UTM ESTE	UTM NORTE	DEPÓSITO (CM)	INUNDACIÓN (CM)	DESCRIPCIÓN
J	368420	7076850	256	300	Cauce Río Salado
K	368427	7076815	68	134	Casa ribera sur Río Salado
L	368455	7076827	130	350	Bandera de Chile, cruce río
M	368548	7076909	130	260	Esquina NE rutas C13/C209
N	368679	7076889	70	210	Carabineros
O	367982	7076978	130	212	Estadio
P	368671	7076889	80	200	Viviendas



**Figura 8.** Área afectada con datos de alturas de depósito obtenidos en terreno. Comuna de Chañaral, sector El Salado (adaptado de Garrido et al., 2015).

### 3.2.3 Análisis de infraestructura expuesta en 2025 en El Salado

Para estimar de forma referencial la inversión necesaria para la reconstrucción de la infraestructura en El Salado, se utilizaron los datos disponibles de 152 infraestructuras, cuya área total construida es de 14.600 m<sup>2</sup>. Estas estructuras presentan una variabilidad

considerable en sus dimensiones, con un área mínima de 10 m<sup>2</sup>, un máximo de 785 m<sup>2</sup> y un valor promedio de aproximadamente 96 m<sup>2</sup>.

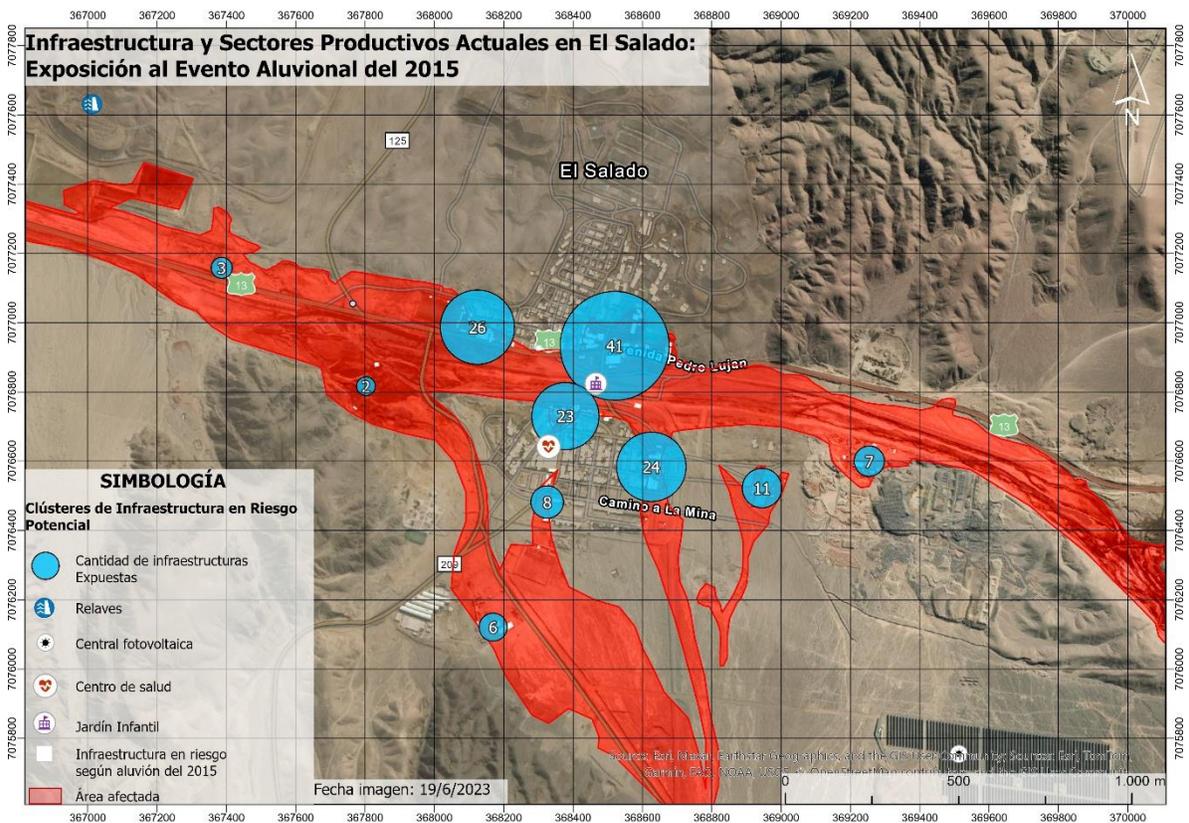
Aplicando la fórmula 1, se obtiene:

$$\text{Costo Total (UF)} = 14.600 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ UF/m}^2 \approx 236.666 \text{ UF}$$

Para obtener el costo en dólares, se aplica la fórmula 2, resultando:

$$\text{Costo Total reconstrucción (USD)} \approx 7.100.000 \text{ USD}$$

Este valor representa una estimación referencial del costo global de reconstrucción de la infraestructura en El Salado (Figura 9).



**Figura 9.** Distribución espacial de infraestructuras y sectores productivos en El Salado, resaltando los núcleos críticos expuestos en función del evento aluvional de 2015. El mapa integra datos actualizados de área construida y tipologías diversas, ofreciendo un marco referencial para evaluar la vulnerabilidad y planificar estrategias de mitigación ante futuros eventos similares.

En la zona afectada en 2015 se encuentra hoy en día únicamente 1 jardín Junji, lo que refleja una exposición relativamente baja en comparación con otras áreas. Sin embargo, la presencia de este equipamiento, en conjunto con el análisis de las infraestructuras y sectores productivos locales, evidencia que incluso una exposición limitada en zonas estratégicas puede generar impactos significativos en la operatividad y prestación de servicios en El Salado frente a un evento aluvional similar. Este mapa destaca no solo la ubicación del único

activo crítico, sino también el potencial efecto que la afectación de este elemento podría tener sobre la dinámica económica y social de la comunidad.

### 3.3. Diego de Almagro

#### 3.3.1 Descripción del evento en Diego de Almagro

A medianoche del miércoles 25 de marzo comenzó a llover intensamente. Debido a esto, los pobladores evacuaron hacia el lado sur del río (testimonio oral). En la estación Pampa Austral Sur fue registrado un máximo de precipitaciones de 11 mm/h a las 7 am. Al mismo tiempo, debido a las precipitaciones caídas en la precordillera, el río Salado comienza a desbordarse, sobrepasando los límites de su cauce. Entre las 12 y 13 h del día 25, el río Salado tuvo un caudal suficiente como para llevar camiones y vehículos incorporados en su flujo (Ramírez et al., 2015).

La quebrada del río Salado, que canalizó el flujo principal, fue el lugar de mayor destrucción (Figura 10). Los depósitos dejados por los aluviones en la quebrada el Salado, presentan un espesor máximo, observado en el eje principal, de aproximadamente 1,9 (punto X, Tabla 3). Estos sedimentos están compuestos por una intercalación de niveles, de espesor centimétrico de gravas insertas en una matriz más fina y escasos niveles en que los fragmentos se tocan entre ellos (Ramírez et al., 2015).



**Figura 10.** Fotografías afectación sector Diego de Almagro. Izq.: Destrucción de vivienda y vehículo sector cauce. Der.: Depósito e inundación en Galpón esquina Manuel Antonio Matta con Juan Martínez.

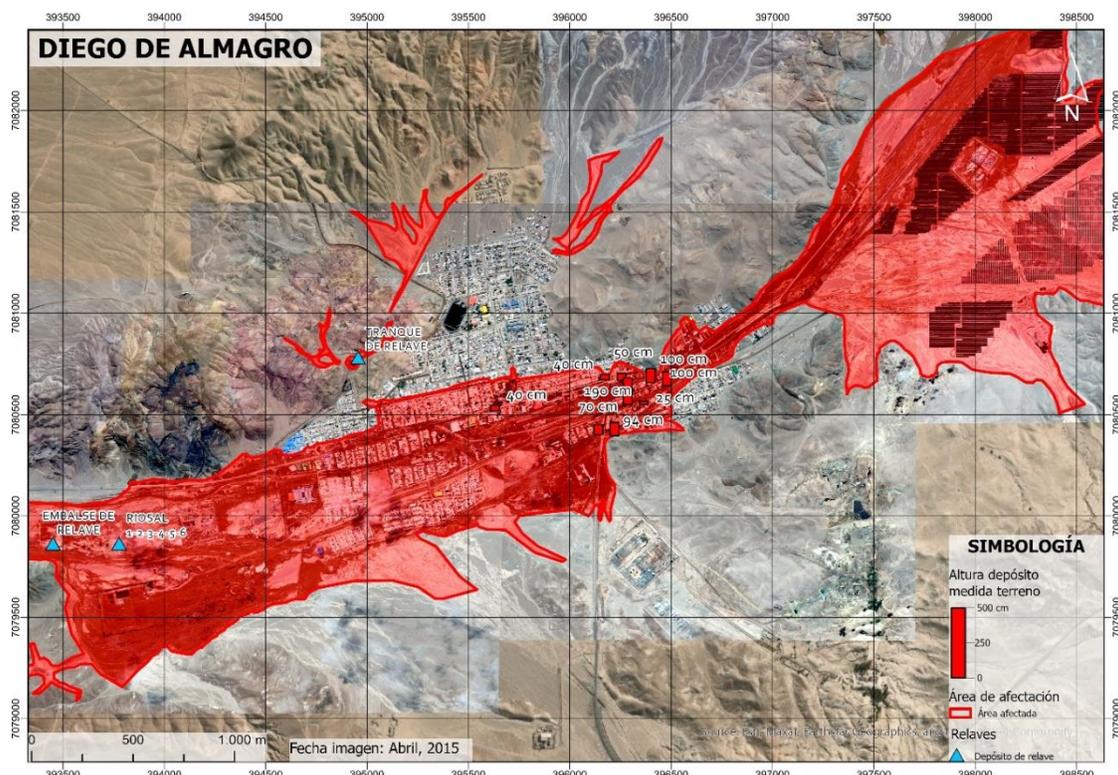
Las medidas del espesor del depósito y de la altura de inundación se presentan en la Tabla 3. Las alturas máximas de inundación, medidas en postes y murallas de la zona urbana, alcanzan hasta 1,5 m, (puntos T, V, Y y Z, Tabla 3). Otros sectores afectados en las cercanías de la ciudad corresponden al depósito de relave de la Planta Riosal (ex planta Amenábar) y planta fotovoltaica, ubicada aguas arriba de Diego de Almagro, que fue parcialmente afectada por escorrentías y flujos de barro, los que dañaron parcialmente las instalaciones (Ramírez et al., 2015).

### 3.3.2 Alturas de inundación y depósito en Diego de Almagro

En la Tabla 3 se muestran los valores obtenidos en terreno de las mediciones de espesores de depósito y de altura de inundación, la figura 11 presenta el área afectada.

**Tabla 3.** Registro de datos, comuna de Diego de Almagro (Ramírez et al., 2015).

ID	UTM ESTE	UTM NORTE	DEPÓSITO (CM)	INUNDACIÓN (CM)	DESCRIPCIÓN
Q	396437	7080642	100	S/I	Viviendas
R	396256	7080669	50	S/I	Viviendas
S	395631	7080519	40	55	Vereda sur plaza
T	396399	7080657	100	150	Copec
U	396370	7078615	3	25	Ruta C-17
V	396206	7080396	94	114	Cerro S Línea del tren
W	396141	7080402	70	95	Casa N Línea del tren
X	396362	7080573	190	260	Cauce
Y	396365	7080549	25	95	Casa terraza 1 al S del cauce
Z	396173	7080670	40	80	Juzgado de garantía



**Figura 11.** Área afectada con datos de alturas de depósitos obtenidos en terreno. Comuna de Diego de Almagro, sector Diego de Almagro. (adaptado de Ramírez et al., 2015).

### 3.3.3 Análisis de infraestructura expuesta en 2025 en Diego de Almagro

Para estimar de forma referencial la inversión necesaria para la reconstrucción de la infraestructura en la ciudad de Diego de Almagro, se analizaron 2.069 infraestructuras localizadas dentro del área afectada por el evento aluvional de 2015. Estas edificaciones presentan una amplia variabilidad en sus dimensiones, con superficies que van desde los 9 m<sup>2</sup> hasta los 1.317 m<sup>2</sup>, y un promedio de aproximadamente 206 m<sup>2</sup> por estructura. La superficie total construida estimada asciende a 211.910,74 m<sup>2</sup>.

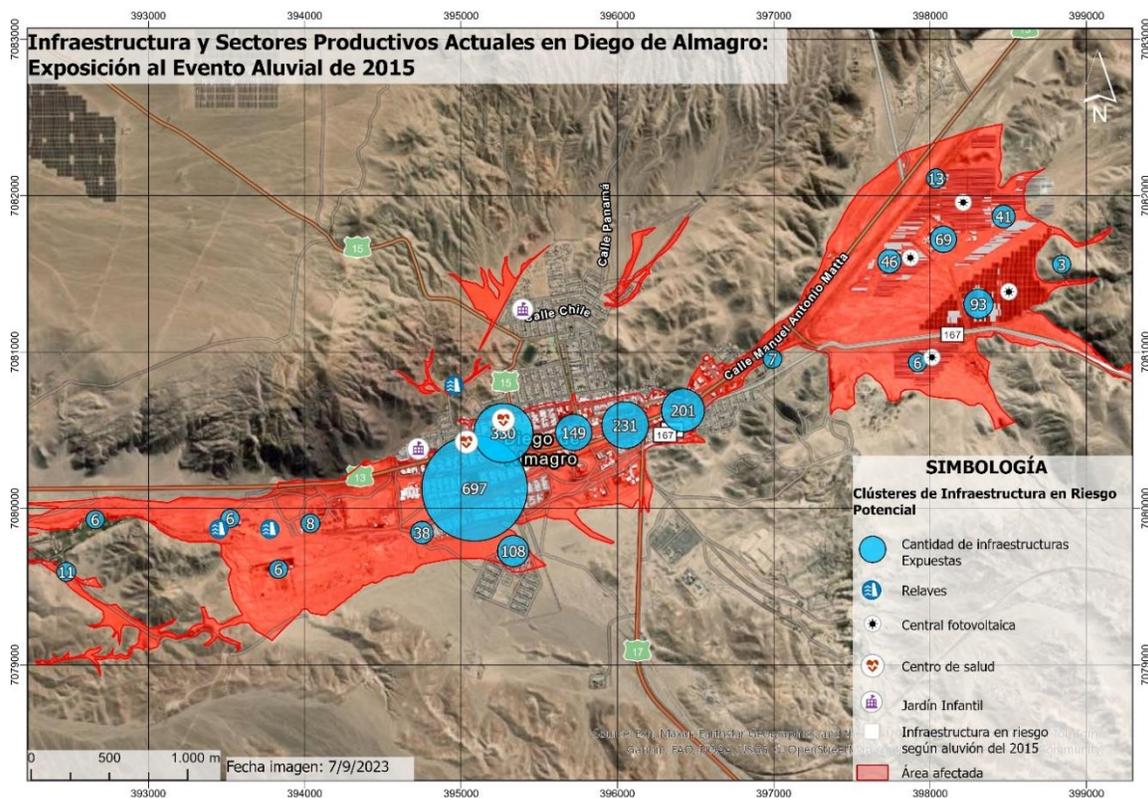
Aplicando la fórmula 1, se obtiene:

$$\text{Costo Total (UF)} = 264.785,68 \text{ m}^2 \times 16,21 \text{ UF/m}^2 \approx 4.292.176 \text{ UF.}$$

Para obtener el costo en dólares, se aplica la fórmula 2, resultando:

$$\text{Costo Total reconstrucción (USD)} \approx 128.765.280 \text{ USD.}$$

Este valor representa la inversión bruta necesaria para la reconstrucción de la totalidad de las infraestructuras en Diego de Almagro, considerando los supuestos adoptados y utilizando promedios referenciales (Figura 12).



**Figura 12.** Distribución espacial de infraestructuras y sectores productivos en Diego de Almagro, resaltando los núcleos críticos expuestos en función del evento aluvional de 2015. El mapa integra datos actualizados de área construida y tipologías diversas, ofreciendo un marco referencial para evaluar la vulnerabilidad y planificar estrategias de mitigación ante futuros eventos similares.

En la zona afectada en 2015 se encuentran hoy en día 3 relaves, 2 centros de salud, 1 jardín Junji y 4 centrales fotovoltaicas. La presencia actual de estas instalaciones, junto con el conjunto de infraestructuras y sectores productivos analizados, evidencia la alta vulnerabilidad que podría comprometer la operatividad integral de Diego de Almagro en un escenario de evento aluvional similar. Este mapa destaca no solo la exposición de la infraestructura crítica, sino también el potencial impacto en lugares estratégicos cuya afectación podría perturbar significativamente la prestación de servicios y la actividad económica esencial de la ciudad.

#### 4. DISCUSIÓN

Desde la geología entendemos los procesos de remoción en masa como eventos recursivos, naturales y predecibles en su distribución espacial, así el evento 2015 marca un precedente de la magnitud que pueden adoptar eventos de flujos ante precipitaciones intensas y prolongadas en el desierto chileno, no es el evento máximo probable, tampoco es el peor escenario, y en el contexto de variabilidad climática, podemos asumir que es esperable y posible un evento de magnitudes similares en el “presente geológico”, por tanto nos resulta inevitable hacernos la pregunta: “¿cuál sería hoy el costo de reconstrucción si vuelve a suceder?”.

Como parte del análisis territorial y de riesgo realizado a diez años de los eventos aluvionales de 2015, se estimó el costo de reconstrucción referencial de las infraestructuras expuestas en las localidades de Chañaral, El Salado y Diego de Almagro. Esta estimación se basa en datos geoespaciales disponibles y en un valor unitario de 16,21 UF/m<sup>2</sup> definido por el Ministerio de Vivienda (MINVU, 2025) para fines de cálculo. El objetivo de este ejercicio es dimensionar, en términos económicos, la magnitud de la inversión pública y/o privada que sería necesaria ante un evento de similares características. A continuación, se presenta el desglose por localidad y el total estimado de inversión requerida.

##### Costo Total Estimado de Reconstrucción

- Chañaral: 25.534.440 USD
- El Salado: 7.100.000 USD
- Diego de Almagro: 128.765.280 USD

Suma Total  $\approx$  161.399.720 USD

Desde el punto de vista **social**, la inversión referencial de aproximadamente 161 millones de dólares para la reconstrucción de estas tres áreas evidencia un reto considerable, ya que afecta directamente a comunidades enteras. La afectación de infraestructuras críticas no sólo implica la pérdida de bienes materiales, sino también una potencial interrupción en el acceso a servicios básicos—salud, educación y energía—, lo cual repercute en la calidad de vida y el bienestar de la población. Queda claro que, tras 10 años desde el evento de 2015, es imperativo fortalecer la resiliencia social para enfrentar futuros eventos, promoviendo la

integración de planes de preparación y respuesta que contemplen no solo la recuperación física de los bienes, sino también la reparación del tejido social y la garantía de derechos fundamentales.

En el ámbito **político**, estos costos implican una toma de decisiones compleja por parte de las autoridades a nivel local y nacional. La magnitud de la inversión requerida demanda una reestructuración de las prioridades presupuestarias y una coordinación interinstitucional robusta. Los responsables políticos se enfrentan al desafío de diseñar estrategias de prevención y mitigación que vayan más allá de la respuesta inmediata ante desastres, promoviendo una planificación territorial que disminuya la exposición a futuros eventos adversos. Además, es fundamental que se establezcan políticas de transparencia y rendición de cuentas para asegurar que los recursos destinados a la reconstrucción se utilicen de manera eficiente y beneficien efectivamente a las comunidades en riesgo.

Por último, desde la perspectiva **económica**, la cifra referencial de 161 millones de dólares representa no sólo un gasto extraordinario en términos de inversión pública, sino también una oportunidad para replantear el modelo de desarrollo e inclusión de estrategias de resiliencia. Para afrontar este desafío, podría ser necesario involucrar tanto al sector privado como a organismos internacionales, con el objetivo de diversificar las fuentes de financiamiento y disminuir la carga fiscal directa. Además, incorporar ajustes futuros—teniendo en cuenta la inflación y la evolución de los costos de construcción—es esencial para mantener la relevancia y efectividad de la planificación. La experiencia acumulada en la última década debe incentivar a invertir en infraestructura segura y adaptada, lo que a largo plazo puede generar beneficios económicos al reducir el impacto de desastres y facilitar una recuperación más rápida y sostenida.

## 5. CONCLUSIONES

A casi diez años de los aluviones de 2015, la Región de Atacama (Gobierno Regional de Atacama, 2024) ha consolidado un importante aprendizaje institucional, expresado en la formulación de la Estrategia Regional de Desarrollo (ERDA 2024–2034)<sup>1</sup>. Esta hoja de ruta reconoce de manera explícita los riesgos climáticos y la necesidad urgente de fortalecer la resiliencia territorial, con énfasis en la gestión adecuada de residuos, la preparación ante emergencias y la seguridad de las comunidades.

El Objetivo Estratégico N° 8 de la ERDA promueve la infraestructura para la protección del territorio y las personas, e incorpora medidas concretas como el desarrollo de infraestructura adaptativa (Objetivo Específico 22) y la implementación de sistemas de alerta temprana y capacitación (Objetivo Específico 23).

---

<sup>1</sup> Estrategia Regional de desarrollo de Atacama 2024-2034.

Ver, <https://goreatacama.gob.cl/estrategia-regional-de-desarrollo-de-atacama/>

La estimación referencial del costo de reconstrucción total para las localidades de Chañaral (25.534.440 USD), El Salado (7.100.000 USD) y Diego de Almagro (128.765.280 USD) asciende a un total aproximado de 161.399.720 USD, considerando valores promedio de superficie construida y el costo por metro cuadrado establecido por el Ministerio de Vivienda (MINVU, 2025).

A diez años del evento aluvional de 2015, este análisis evidencia la magnitud de la inversión necesaria ante un escenario de afectación similar y la urgencia de reflexionar sobre nuestra capacidad de respuesta y preparación. Desde una perspectiva social, la exposición de infraestructuras críticas como centros de salud, jardines infantiles o viviendas revela una fragilidad persistente que compromete directamente la calidad de vida y la seguridad de las personas. Tal como señala ONU-Hábitat (2020), la resiliencia urbana no sólo depende de la infraestructura, sino también de una planificación territorial inclusiva que considere los riesgos climáticos y la equidad en el acceso a servicios esenciales.

Desde el punto de vista económico, el costo de reconstrucción proyectado es significativamente alto, pero representa una fracción del impacto total cuando se consideran las pérdidas de vidas humanas, pérdidas en la productividad, interrupción de servicios, y desplazamiento de personas. Como advierte el BID (2017), cada dólar invertido en prevención y planificación puede ahorrar múltiples veces su valor en reconstrucción y recuperación. Esto sugiere que un enfoque proactivo en la gestión del riesgo no sólo es más humano, sino también financieramente más inteligente.

En términos políticos e institucionales, la experiencia del 2015 impulsó avances relevantes, como la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONEMI, 2014), que promueve una gobernanza del riesgo descentralizada y articulada. Sin embargo, la persistencia de áreas expuestas indica que los aprendizajes aún no se han consolidado completamente en los instrumentos de planificación urbana ni en la inversión pública sectorial. Según CEPAL (2021), una recuperación efectiva requiere además de infraestructura, de reconstrucción institucional, capacidades técnicas y fortalecimiento del tejido social.

Finalmente, la pregunta sobre si estamos preparados sigue siendo válida. A pesar de los avances normativos y técnicos, el escenario actual en estas localidades sugiere que la resiliencia territorial sigue siendo una tarea pendiente, especialmente en contextos locales donde convergen vulnerabilidades históricas, baja inversión y desafíos de gobernanza. Tal como plantea la OCDE (2024), construir regiones resilientes no es sólo un desafío técnico, sino también político y cultural: exige compromiso sostenido, visión de largo plazo y participación activa de las comunidades.

## **AGRADECIMIENTOS**

Imposible enviar este documento sin agradecer a todas y todos quienes participaron de la respuesta a la emergencia marzo 2015 en Sernageomin, en la Subdirección de Geología: Mario Pereira, en los controles del Departamento de Geología Aplicada: Manuel Arenas, y

en la Unidad de Peligros Geológicos: Francisca Falcón, en fotointerpretación previa al trabajo de terreno los colegas: José Antonio Naranjo, Natalia Astudillo, Cristian Ramírez, Cristian Faunes y Paula Olea. En la campaña de terreno del valle El Salado: el colega Juan Pablo Contreras y a cargo del vehículo Gonzalo Núñez. En los registros durante el evento a: Pedro Berríos y Marcelo Solari. En las otras campañas de terreno que no están representadas en este trabajo pero que conforman el equipo de trabajo de la emergencia: Alejandro Alfaro, Enrique Opazo, Mónica Marín, Natalia Sepúlveda. A los colegas de otras unidades que prestaron apoyo voluntariamente: Miguel Ortiz, Ricardo Velasquez, Esteban Salazar, Ismael Murillo, Felipe Fuentes, Rodolfo Ferrando, Felipe Coloma, Roberto Merino. A las secretarías que hacen funcionar el mundo con sus hilos mágicos: Sandra Villar, Alicia Styles y Miriam Valenzuela.

## REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2017). Desastres naturales y desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe. BID. <https://publications.iadb.org/es/informe-de-sostenibilidad-del-bid-2017>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021). Desastres y desigualdad en una crisis prolongada: hacia sistemas de protección social universales, integrales, resilientes y sostenibles en América Latina y el Caribe. CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/47375>
- Contreras, J.P., et al. 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015 en la comuna de Chañaral: Descripción de los aluviones y áreas propuestas para evacuación, campamentos de emergencia y acopio de sedimentos en Chañaral, comuna Chañaral, provincia de Chañaral, región de Atacama (INF-Atacama-07). Servicio Nacional de Geología y Minería: 22 p. Santiago. Informe Inédito. <https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/14923.pdf>
- Garrido, N., et al. 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015: Descripción de los aluviones y áreas propuestas para evacuación, campamentos de emergencia y acopio de sedimentos en El Salado, comuna de Salado, provincia de Chañaral, región de Atacama (INF-Atacama-09). Servicio Nacional de Geología y Minería: 15 p. Santiago. Informe Inédito. <https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/14925.pdf>
- Gobierno Regional de Atacama. (2024). Estrategia Regional de Desarrollo de Atacama 2024-2034. <https://goreatacama.gob.cl/estrategia-regional-de-desarrollo-de-atacama/>
- Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile (IDE Chile). (s. f.). Geoportal de Chile. <https://www.geoportal.cl/catalog>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2025). Fija valores unitarios de construcción para aplicar en cálculo de derechos de permisos municipales. Santiago, Chile: MINVU. <https://documentos.minvu.cl/server/api/core/bitstreams/25360289-c259-49fb-93b5-7d5ca6d417f6/content>

- OECD (2024), Compendium of Good Practices on Quality Infrastructure 2024: Building Resilience to Natural Disasters, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/54d26e88-en>.
- Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) & Sistema Nacional de Protección Civil. (2014). Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres. Gobierno de Chile. [https://www.dipres.gob.cl/597/articles-133189\\_doc\\_pdf.pdf](https://www.dipres.gob.cl/597/articles-133189_doc_pdf.pdf)
- ONU-Hábitat. (2020). Guía para la planificación urbana resiliente. Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <https://onu-habitat.org/index.php/guia-de-resiliencia-urbana>
- Ramirez, C., et al. 2015. Efectos geológicos del evento meteorológico del 24 y 25 de marzo de 2015: Descripción de los aluviones y áreas propuestas para evacuación, campamentos de emergencia y acopio de sedimentos en Diego de Almagro, comuna de Diego de Almagro, provincia de Chañaral, región de Atacama (INF-Atacama-04). Servicio Nacional de Geología y Minería: 19 p. Santiago. Informe Inédito. <https://catalogobiblioteca.sernageomin.cl/Archivos/14920.pdf>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (s. f.). Datos públicos depósito de relaves. SERNAGEOMIN. <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- Sirko, W., Kashubin, S., Ritter, M., Annkah, A., Bouchareb, Y. S. E., Dauphin, Y., Keysers, D., Neumann, M., Cisse, M., & Quinn, J. A. (2021). Continental-scale building detection from high resolution satellite imagery. arXiv:2107.12283. <https://arxiv.org/abs/2107.12283>

### **ACERCA DE LOS AUTORES**

**Natalia Garrido Urzúa** es geóloga de la Universidad de Chile, con un Diplomado en Gestión para la Reducción de Riesgo de Desastres de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile, cuenta con más de 10 años de experiencia en evaluación de remociones en masa para la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. Se desempeña desde el año 2011 en el departamento de Geología Aplicada del Sernageomin a nivel central (2011-2014), región de Los Lagos (2011-2020) y desde 2020 a la actualidad en la región de Coquimbo.

**Hugo Neira Santander** es Cartógrafo Geomático y Magíster en Geografía y Geomática por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Posee estudios de postgrado en Geomática y un Diplomado en Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial por la Universidad de Chile. Especialista en GeoData Science, cuenta con experiencia en Machine Learning y análisis de GeoBig Data. Se desempeñó como jefe del Departamento de Geomática del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y actualmente lidera el Subdepartamento de Analítica Territorial, donde encabeza el equipo geoespacial. Además, es representante ministerial en la Política Geoespacial de Chile e investigador adjunto del Núcleo Milenio Océano, Patrimonio y Cultura.

## APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL SOFTWARE faDebrisFOAM EN QUEBRADA LA PLAZA, ATACAMA, MEDIANTE DATOS DE TERRENO.

ALEX GARCÉS<sup>1</sup>, IVÁN CAMPOS<sup>2</sup>, SANTIAGO MONTSERRAT<sup>3</sup>,  
ALDO TAMBURRINO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chile.  
[agarces@uchile.cl](mailto:agarces@uchile.cl), ORCID: 0000-0001-9462-6167

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile  
[ivancampos@ug.uchile.cl](mailto:ivancampos@ug.uchile.cl)

<sup>3</sup>Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chile.  
[santiago.montserrat@amtc.uchile.cl](mailto:santiago.montserrat@amtc.uchile.cl)

<sup>4</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Advanced Mining Technology Center,  
Universidad de Chile, Santiago, Chile  
[atamburr@ing.uchile.cl](mailto:atamburr@ing.uchile.cl)

### RESUMEN

Los flujos de detritos constituyen uno de los fenómenos naturales más destructivos en ambientes de montaña, especialmente cuando afectan zonas pobladas. La modelación numérica de este fenómeno representa una herramienta clave para caracterizar su alcance y, así, determinar zonas bajo amenaza. En este trabajo se presenta la aplicación y validación del modelo numérico faDebrisFOAM, desarrollado en OpenFOAM bajo el esquema de áreas finitas, para simular el evento aluvional ocurrido el 27 de enero de 2020 en la quebrada La Plaza, Región de Atacama, Chile.

Este modelo incorpora un sistema de ecuaciones de conservación promediadas en la vertical para una mezcla de densidad variable, que permite representar los procesos de erosión y depositación. La simulación fue construida a partir de un modelo digital de elevación previo al evento (2017), un levantamiento fotogramétrico post evento y la estimación del volumen de sedimentos movilizados. A través de hidrogramas sintéticos (triangulares) y parámetros reológicos calibrados, se reprodujo la dinámica del flujo, incluyendo patrones de escurrimiento, puntos de avulsión y distribución espacial del depósito.

Los resultados muestran una buena coherencia entre el modelo y las observaciones de terreno, validando la capacidad de faDebrisFOAM para representar eventos sobre topografías reales. Sin embargo, se identifican limitaciones asociadas a la resolución espacial en zonas de pendientes abruptas, lo que sugiere posibles líneas de trabajo futuro.

**Palabras claves:** flujos de detritos, modelación numérica, erosión, depositación, openFOAM, fotogrametría.

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los flujos aluvionales generados a partir de eventos extremos de precipitación tienen un impacto significativo en la evolución morfológica del sistema fluvial (Aguilar et al., 2020). Estos eventos cobran mayor relevancia cuando ocurren en zonas pobladas ya que impactan directamente a las personas y la infraestructura. En entornos de alta montaña, las tormentas de precipitación intensa pueden activar el movimiento del material no consolidado, generando flujos de detritos con concentraciones volumétricas de sólidos de hasta 60 % (Calvo y Savi, 2009). Los flujos de detritos se diferencian de las inundaciones en la ley de resistencia necesaria para representar su escurrimiento ya que las interacciones sólido-fluido y sólido-sólido son capaces de cambiar el comportamiento reológico de la mezcla (Iverson, 1997; Takahashi, 2014). En los últimos años, este tipo de flujos han sido reconocidos como una amenaza importante, que afecta la infraestructura, las actividades económicas y la vida humana. Las pérdidas económicas asociadas con los cinco mayores eventos de flujos de detritos registrados entre 1980 y 2017 fueron de al menos USD 1.600 millones, con casi 1.000 personas muertas o desaparecidas (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017).

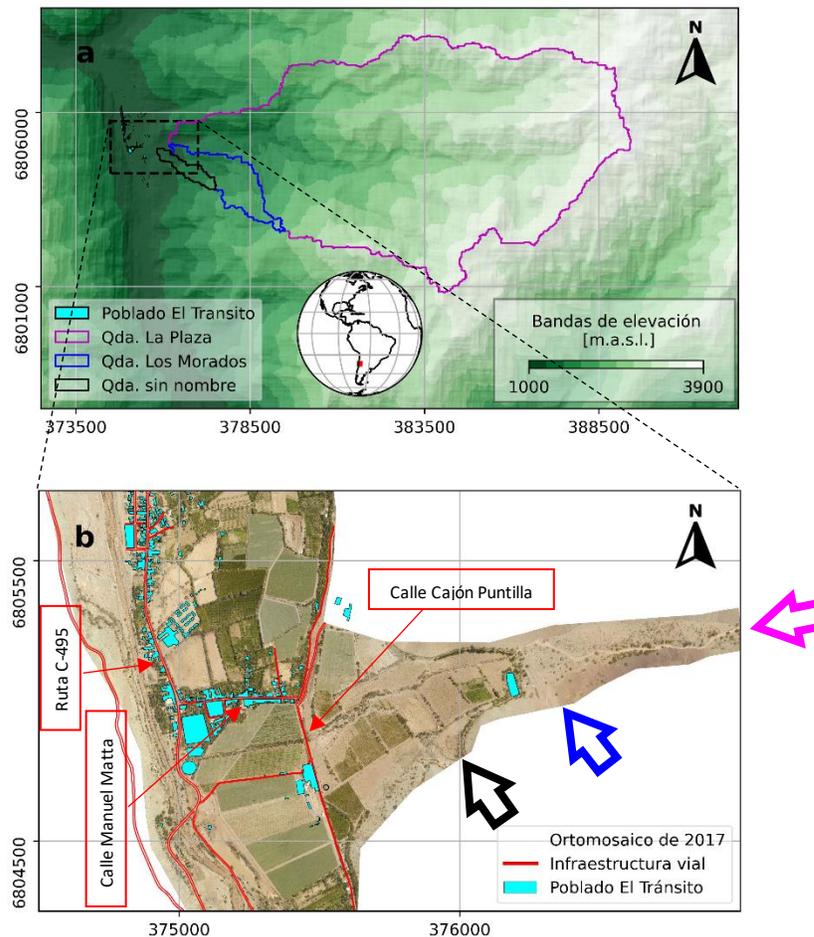
Los modelos computacionales para la simulación de flujos de detritos se han convertido en una herramienta clave para evaluar su comportamiento y magnitud (Frey et al., 2016; Garcés y Montserrat, 2021). Sin embargo, su implementación exige definir parámetros con altos niveles de incertidumbre, generando que los resultados difieran de la realidad (Zegers et al., 2020). Además, simplificaciones sobre modelos de elevación digital, concentración de sedimentos o los hidrogramas utilizados para simulaciones de flujo de detritos también impactan en la exactitud con que un flujo de detritos es reproducido por la simulación (Rickenmann et al., 2006; Rickenmann, 2016). Estudios han reportado una buena respuesta entre los resultados de modelos de flujo aluvional cuando se tienen mediciones posteriores al evento: la profundidad del depósito de sedimentos, volumen de sedimento depositado o área de inundación (Zegers et al., 2020). La información de terreno como el mapeo de las diferentes formas deposicionales y erosivas o la identificación de las relaciones de contacto entre depósitos permiten realizar una cronología de las diferentes oleadas de flujos durante un mismo evento (Garcés et al., 2022; Cabré et al. 2025a; Cabré et al. 2025b). En consecuencia, los registros topográficos secuenciales son claves para caracterizar estos cambios morfológicos con gran precisión en toda el área afectada (Garcés et al., 2021).

La Universidad de Chile está desarrollando el modelo numérico “faDebrisFOAM” de áreas finitas que permite incorporar los procesos de erosión y depositación mediante un conjunto de ecuaciones de conservación promediadas en la vertical (González, 2021; González y Tamburrino, 2022). Estas ecuaciones, válidas para un fluido equivalente de densidad variable, se resuelven sobre una geometría tridimensional de lecho móvil, el cual se adapta en función del material incorporado y depositado por el flujo aluvional mediante un algoritmo de modificación de terreno (TMA, por sus siglas en inglés). En este trabajo se presenta el estudio del evento aluvional ocurrido en enero del 2020 en el sector de El Tránsito, región de Atacama. La información topográfica pre y post evento junto con la cuantificación de los volúmenes erosionados y depositados en el abanico aluvional fueron calculados por Garcés et al. (2021). Utilizando esta información y el modelo numérico faDebrisFOAM se presentan los resultados del modelo, con objetivo de validar su funcionamiento para simular flujos de detritos. Finalmente, se discute respecto de las capacidades actuales del modelo y el trabajo futuro para seguir mejorándolo.

## 2. SITIO DE ESTUDIO

Quebrada La Plaza está asociada a una cuenca de 59 km<sup>2</sup> en el valle de Huasco, comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama. El abanico aluvial asociado con quebrada La Plaza se caracteriza por recibir las descargas de dos quebradas menores de área igual a 0.9km<sup>2</sup>, Qda. sin nombre, y 2.7 km<sup>2</sup>, Qda. Los Morados (Figura 1). Según la carta geológica de Salazar et al. (2013), en estas quebradas existen depósitos fluviales, coluviales, aluviales y depósitos de remociones en masa (Pleistoceno-Holoceno), los cuales son depósitos no consolidados de sedimento susceptibles a ser removidos durante eventos de precipitación intensa.

Este abanico se amalgama con la terraza fluvial sobre la que se ubica el poblado de El Tránsito. Esto se evidencia en la composición del suelo ya que esta área presenta depósitos fluviales del río El Tránsito, así como a depósitos aluviales provenientes de las quebradas. El suelo sobre el cual se emplaza el poblado de El Tránsito corresponde a gravas y arenas no consolidadas a parcialmente consolidadas, de edad pleistocena-holocénica.



**Figura 1.** Zona de Estudio. (a) Cuencas activadas y que afectaron al poblado de El Tránsito. (b) Abanico aluvial en 2017 donde se identifica la infraestructura del pueblo. El color de las flechas indica el punto de descarga de los flujos provenientes de cada quebrada presentada arriba en el mismo color.

## 2.1 Evento aluvional del 27 de enero de 2020

Entre los días 26 y 28 de enero un evento de precipitación azotó el valle de El Tránsito cuya mayor intensidad ocurrió el día 27 de enero. Los habitantes de la zona indican que el 27 de enero hubo precipitaciones de tipo aguanieve, granizos y tormentas eléctricas en el sector cordillerano de El Tránsito (Marín et al., 2020). En particular para la zona de estudio, los habitantes indican que el flujo de detritos que afectó al pueblo ocurrió pasadas las 17 horas con una oleada principal, muy ruidosa, que duró cerca de 20 minutos (Uribe et al., 2020), seguida de oleadas de menor intensidad. El flujo de detritos dejó una persona fallecida, 26 albergadas, 40 viviendas con daño mayor y 50 con daño menor (Marín et al., 2020). Por otra parte, este evento provocó cortes e interrupciones en conectividad y servicios básicos que afectó directamente a más 400 personas (Uribe, 2020).

Los habitantes describen la lluvia como cálida, con rayos y caída de granizos. Es interesante que la ocurrencia de granizos durante la activación de quebradas también ha sido reportada en otros eventos (Romero et al. 2022). Lamentablemente, el evento de precipitación se debió a una lluvia convectiva muy local lo que impidió que las estaciones meteorológicas midieran correctamente el evento de precipitación. La activación de cárcavas en las cabeceras de las cuencas lo cual aportó abundante material arcilloso y arenoso a los flujos. La intensidad de los flujos de detritos ocurridos se evidencia mediante los registros de alturas de ola de hasta 8 metros y abundantes bloques rodados de 2 a 3 metros de diámetro que fueron arrastrados por el flujo de detritos hasta el poblado de El Tránsito (Tabla 1.)

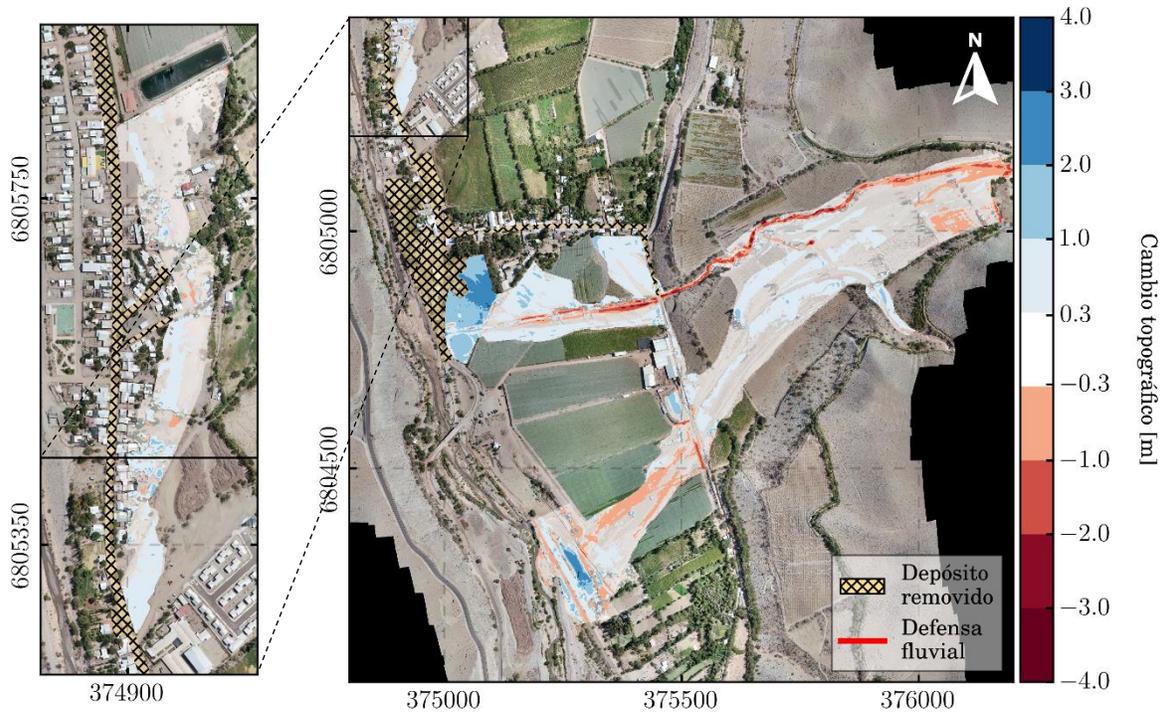
**Tabla 1.** Observaciones de terreno levantadas por SERNAGEOMIN

Fuente: Marín et al. (2020) y Uribe (2020)

Ubicación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Observaciones
La Plaza	376477	6804909	Zona de confluencia con quebrada Los Morados. Depósitos superficiales coluviales de potencia centimétrica conformados por material arcilloso y detrítico que mediante escorrentía de ladera (cárcavas) alimenta localmente las quebradas.
La Plaza	376256	6805133	Bloque rodado de más de 3 m de diámetro
La Plaza	375011	6804740	Bloques rodados de 2-3 m de diámetro
La Plaza	376269	6805122	Confluencia de Qda. La Plaza con Qda. Los Morados: Depósito de barro de $\pm 100$ m ancho y 0.5-0.8 m altura.
Los Morados	376408	6804906	Cárcavas y estrías en la base de ladera sur, impronta de aluvión de 6-8 m de altura y 2 m de ancho.
Los Morados	376326	6804976	Bloque de dos metros de diámetro.
Los Morados	376366	6804987	Límite este de depósito de barro de 3 m ancho, 50 cm potencia: grava media clasto soportada en matriz de arcilla, clastos angulosos, tamaño $\pm 1$ cm.
Abanico descarga sur	375534	6804574	Depósito de 0.6-1.1 m de altura y 113 m de ancho. Principalmente constituido por barro arcilloso y variable proporción de material detrítico, gravas, guijas, bloques rodados de hasta 2 m de diámetro.

IDIEM (2019) estudió el valle de El Tránsito desde la confluencia de estero Chollay y estero Conay (aguas arriba) hasta la confluencia de Río El Tránsito con Río El Carmen (aguas abajo). Para dicho estudio se levantó en 2017 una topografía con 1 metro de resolución que incluye el abanico de quebrada La Plaza (Figura 1). Este levantamiento sirve como topografía pre-evento del 2020 ya que entre 2017 y 2020 no se implementaron intervenciones en la zona de estudio. Garcés et al. (2021) realizaron un levantamiento fotogramétrico mediante dron pocos días después de ocurrido el evento aluvional, logrando una detallada descripción de los patrones de erosión y depositación en el abanico aluvial (Figura 2). En esta figura, los tonos rojos indican erosión y los tonos azules indican depositación. En blanco transparente se indican zonas dentro del rango de incertidumbre del método de levantamiento por lo que estas zonas pueden ser interpretadas como zonas de transporte de sedimentos. Debido a que el evento se produjo en oleadas, también existe la posibilidad de que zonas donde el sedimento de los frentes más viscosos y de mayor carga de sedimento se depositó, hayan sido retrabajados por flujos sucesores más diluidos (Garcés et al. 2021). Al momento del levantamiento, los trabajos de remoción del depósito ya habían comenzado, por lo que el polígono achurado de la Figura 2 indica la zona del depósito removido a la fecha del levantamiento fotogramétrico. El volumen de sedimentos removido se estimó mediante marcas observables en las paredes de edificaciones y postes de iluminación.

Como resultado de este análisis se obtuvo un volumen total depositado de 132.000 m<sup>3</sup> (92,000 m<sup>3</sup> como resultado de la diferenciación de DEM's y 40,000 m<sup>3</sup> de la estimación del sedimento removido) y un volumen de material erosionado de 33,500 m<sup>3</sup>.



**Figura 2.** Cambio topográfico del abanico aluvial de La Plaza debido al evento aluvional ocurrido el 27 de enero de 2020. Fuente: Reproducida con autorización de Garcés et al. (2021).

### 3. METODOLOGÍA

El modelo que se desea validar es faDebrisFOAM, un solver de openFOAM desarrollado en la Universidad de Chile (González, 2021; González y Tamburrino, 2022), el cual que sigue en proceso de mejora. faDebrisFOAM resuelve un sistema de ecuaciones que representa el movimiento de un flujo detrítico somero sobre una superficie levemente curvada. Este supuesto es clave para poder promediar las ecuaciones en la vertical. El promedio en la vertical se aplica mediante un sistema de coordenadas ortogonal local alineado con la curvatura del terreno. Gracias a esto, el vector velocidad continúa siendo tridimensional al tratarse de una superficie tridimensional. A diferencia de otros modelos (Frank et al., 2017; Bartelt et al., 2017), este enfoque permite evitar tener que definir la curvatura del terreno, lo cual es difícil de generalizar en el caso de mallas no estructuradas.

Para simplificar la complejidad de la mezcla de agua, sedimento fino y sedimento grueso, este programa utiliza una mezcla equivalente cuya densidad y comportamiento reológico varían dependiendo de la proporción de agua y sedimento en la mezcla.

El programa también es capaz de incorporar los procesos de erosión y depositación mediante tasas de intercambio de material entre el flujo y el terreno. Para tomar en cuenta el efecto que estos procesos tienen sobre la topografía, el programa cuenta con un algoritmo de modificación del terreno (TMA, por sus siglas en inglés).

Rauter y Tuković (2018) desarrollaron un sistema de ecuaciones para flujos granulares someros sobre superficies curvilíneas levemente curvadas y Rauter et al. (2018) lo implementaron en un solver de OpenFOAM llamado faSavageHutterFoam (Rauter et al., 2018). Tomando este solver como punto de partida, el desarrollo de faDebrisFoam incorpora: (1) flujo de densidad variable; (2) volumen de control definido con una superficie modificable; (3) inclusión del TMA; (4) condición de borde de flujo a partir de un hidrograma; (5) incorporación de ecuaciones de erosión, depositación y fricción, válidas para flujos detríticos.

El sistema de ecuaciones que resuelve faDebrisFoam se presenta de la Ec. (1) a la Ec. (5) (González, 2021). La Ec. (1) corresponde a la ecuación de continuidad de la mezcla sólido-líquida. La Ec. (2) corresponde a la ecuación de continuidad de la masa de agua. La Ec. (3) corresponde a la proyección tangencial de la ecuación de momentum de la mezcla agua-sedimento, mientras que la Ec. (4) a la proyección normal. La Ec. (5) corresponde a la ecuación de continuidad para el sedimento de la capa erosionable que representa el lecho. Estas ecuaciones son válidas para un elemento cualquiera de superficie  $S_B$  y vector normal  $n_b$  que formen parte de una superficie curva tridimensional.

$$\frac{\partial(\rho h S_B)}{\partial t} + \int_{S_b} \nabla \cdot (\rho h \bar{u}) dS = \rho_b u_b S_B \quad (1)$$

$$\frac{\partial(C_w h S_B)}{\partial t} + \int_{S_b} \nabla \cdot (C_w h \bar{u}) dS = C_{wb} u_b S_B \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h \bar{u} S_B) + \int_{S_b} \chi \nabla_s \cdot (\rho h \bar{u} \bar{u}) dS = \rho h \mathbf{g}_s S_B - \boldsymbol{\tau}_b S_B - \frac{1}{2} \int_{S_b} \nabla_s (p_b h) dS \quad (3)$$

$$p_b = \mathbf{n}_b \left( \rho h \mathbf{g}_n - \frac{1}{S_B} \int_{S_b} \chi \nabla_n \cdot (\rho h \bar{u} \bar{u}) dS - \frac{1}{2 S_B} \int_{S_b} \nabla_n (p_b h) dS \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial (h_e S_B)}{\partial t} = -u_b S_B \quad (5)$$

### 3.1 Construcción del modelo para reproducir el evento 2020

La simulación del evento 2020 utiliza la topografía disponible previa al evento, levantada en 2017. El dominio de modelación corresponde al abanico aluvial de La Plaza desde los ápices de las quebradas Sin Nombre y Los Morados hasta su confluencia con río El Tránsito (Figura 3). El tamaño máximo para los elementos de área de la malla numérica fue de 8 m.

A partir del volumen de sedimento depositado (132.000 m<sup>3</sup>), se estimó el volumen de sedimento generado por las quebradas. Este sedimento fue prorrateado en las dos quebradas en función de su área, es decir, esto supone que el mismo rendimiento para ambas quebradas en cuanto a su producción de sedimento. Para construir el hidrograma de entrada al modelo de cada quebrada se consideró un hidrograma triangular cuyo caudal máximo está dado por la Ec. (6) (Rickenmann, 1999; Mitchell et al., 2022). El volumen total del aluvión se calcula mediante el volumen de sedimento y una concentración volumétrica que puede ser fija o variable. Se fijó la concentración volumétrica  $C_v = 0.55$  basado en observaciones de terreno del depósito que generó el flujo de detritos. Una vez conocido el volumen total del aluvión, la duración total del hidrograma se puede obtener directamente de la Ec. (7) ya que se trata de un hidrograma triangular.

$$Q_p = c V^{5/6} \quad (6)$$

$$t_d = \frac{2}{c} V^{1-(5/6)} \quad (7)$$

Donde  $Q_p$  es el caudal detrítico máximo,  $t_p$  es el tiempo desde el inicio del hidrograma hasta el instante en que ocurre el caudal detrítico máximo,  $t_d$  es el tiempo total de duración del hidrograma y  $c$  es una constante que toma valores entre 0.001 y 1.0 (Ikeda et al., 2019). Los hidrogramas triangulares para las condiciones de borde de entrada quedan descritos por los parámetros presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones de borde de entrada – La Plaza, evento 2020.

Ubicación	Volumen sedimentos [m <sup>3</sup> ]	$Q_p$ [m <sup>3</sup> /s]	$C_v$ [-]	$t_p$ [s]	$t_d$ [s]	$c$ [-]
Qda sin Nombre	31500	56.1	0.55	408.8	2044	0.01 para flujos de barro
Qda Los Morados	100450	147.3	0.55	495.5	2479	0.01 para flujos de barroso

Para representar los esfuerzos disipativos/resistivos asociados al escurrimiento de un aluvión se eligió utilizar la ley de resistencia conocida como modelo cuadrático (O'Brien et al, 1993) ya que ésta ha sido utilizada en el mismo valle y calibrado en quebradas de características similares (Zegers et al. 2020).

**Tabla 3.** Parámetros reológicos para el modelo cuadrático (Zegers et al. 2020).

$\alpha_1$ [poises]	$\beta_1$ [-]	$\alpha_2$ [dynas/cm <sup>2</sup> ]	$\beta_2$ [-]	$K$	$n$
0.00075	14.39	0.0152	18.7	1166	0.05

Donde  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son parámetros de calibración de terreno;  $K$  es un parámetro de resistencia para flujo laminar y  $n$  es el coeficiente de Manning.

Para modelar la variación temporal del lecho erosionable  $he$  mediante la Ec. (5) es necesario estimar la tasa de intercambio neta  $u_b$ , correspondiente a la diferencia entre la tasa de incorporación de sedimento ( $u_{bE}$ ) y la tasa de depositación de sedimento ( $u_{bD}$ ). Es decir,  $u_b = u_{bE} - u_{bD}$ .

La tasa de incorporación de sedimento ( $u_{bE}$ ) al flujo se estimó mediante el modelo planteado por Frank et al. (2015), el cual es utilizado por RAMMS. Este modelo tiene la ventaja de que la tasa máxima de incorporación de material se encuentra limitada, lo que impide que el modelo arrastre todo el sedimento en un solo paso temporal (Frank et al., 2015). Los datos deben ser ingresados a faDebrisFOAM en unidades de sistema internacional, por lo que los valores de  $dz/d\tau$  y  $\tau_c$ , usualmente referidos en  $kPa$ , deben ser expresados en pascuales. La tasa de incorporación de sedimento se obtiene mediante la Ec. (9), la cual a su vez depende de la tasa máxima potencial de erosión  $e_m$  (Ec. 8).

**Tabla 4.** Parámetros del modelo de *entrainment*.

$E_R$ [m/s]	$dz/d\tau$ [m/Pa]	$\tau_c$ [Pa]
0.05	$10^{-4}$	500

$$e_m \begin{cases} 0 & \text{si } \tau < \tau_c \\ \frac{dz}{d\tau}(\tau_b - \tau_c) & \text{si } \tau \geq \tau_c \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{bE} = E_R \text{ si } e_t \leq e_m \quad (9)$$

La Figura 3 presenta el dominio de modelación y la zona donde se activan los modelos de *entrainment* y depositación. Para la misma zona se definió un lecho erosionable de máximo de 2 m de profundidad. Es importante que la zona donde se activa el *entrainment* y la depositación no interseque las condiciones de borde de entrada ya que el programa se vuelve inestable.

La tasa de depositación de sedimento ( $u_{bD}$ ) se estima mediante el modelo de Fagents y Baloga (2006), el cual estima dicha tasa mediante la velocidad de sedimentación  $v_s$  de una partícula característica según la Ec. (10).

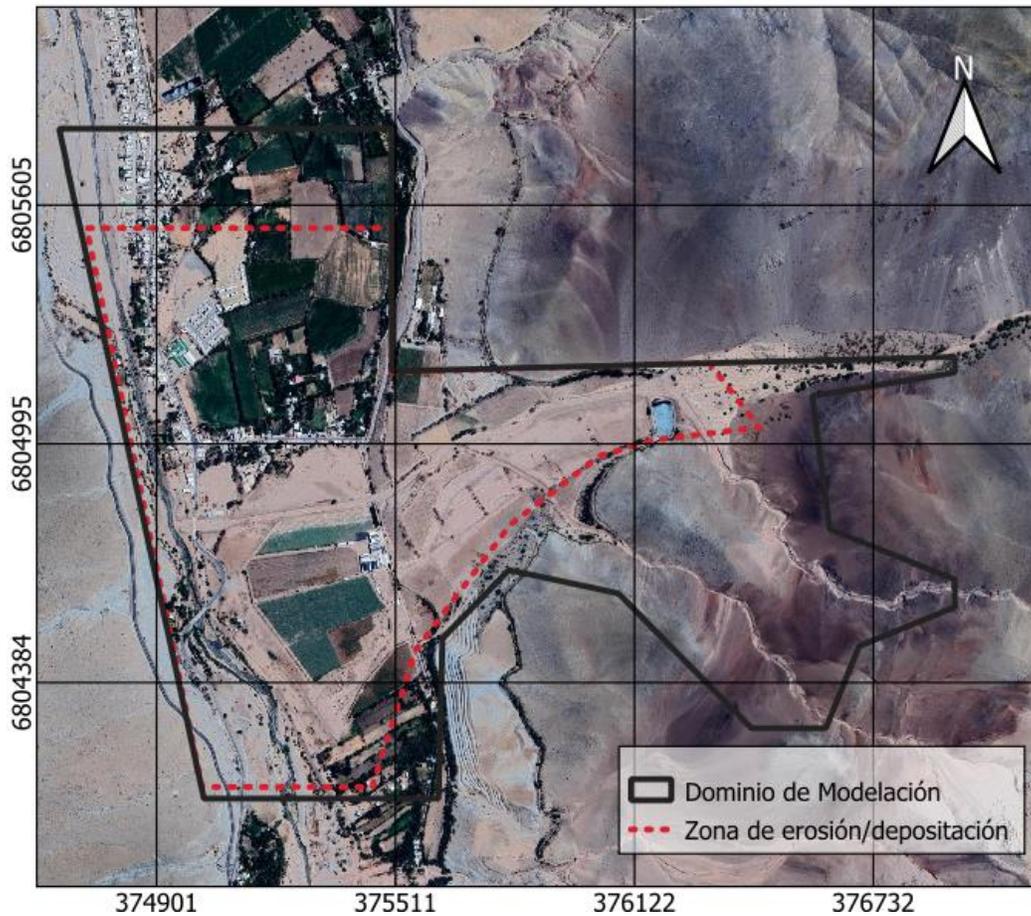
$$u_{bD} = v_s \frac{\rho - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (10)$$

Donde  $\rho$  corresponde a la densidad de la mezcla sólido-líquido,  $\rho_s$  a la densidad del sólido, y  $\rho_w$  a la densidad del agua. Considerando el valor de  $C_v$  utilizado para los hidrogramas establecidos, se obtiene  $\rho$  a partir de la Ec. (11) (Tabla 5).

$$\rho = C_v \rho_s + (1 - C_v) \rho_w \quad (11)$$

**Tabla 5.** Parámetros del modelo de depositación.

$\rho_w$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$v_s$ [m/s]
1000	2650	1908	0.001

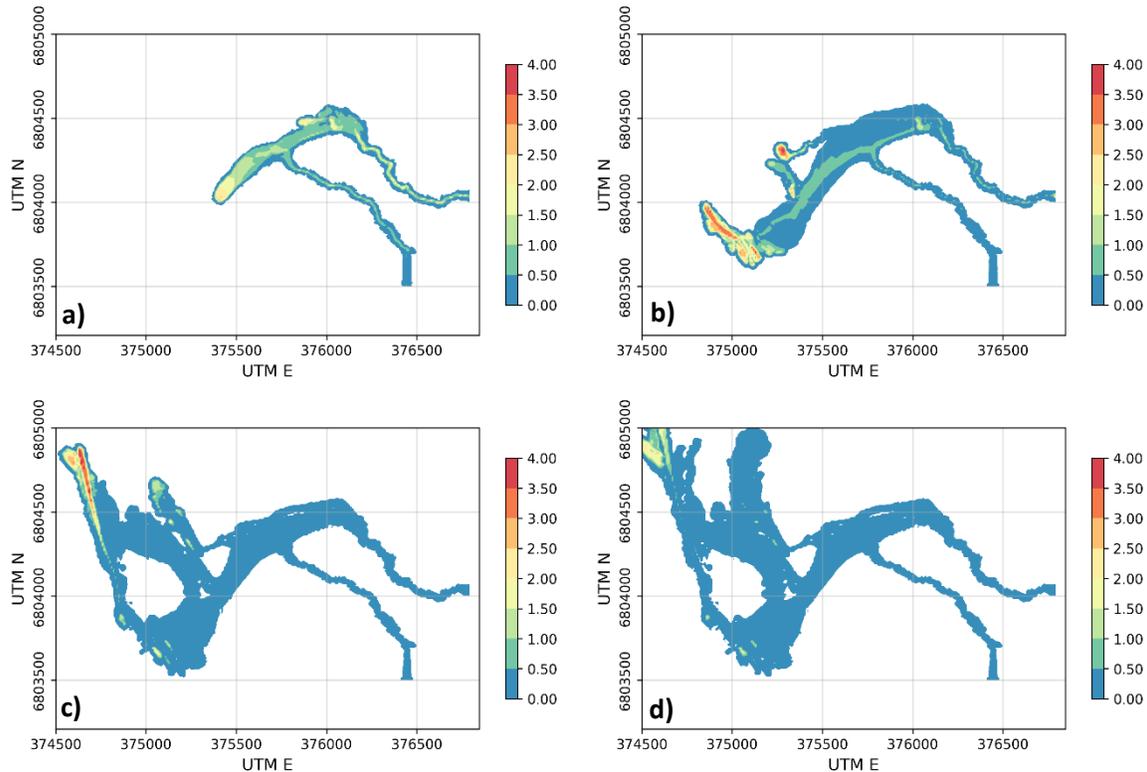


**Figura 3.** Delimitación de zona de incorporación de material desde el lecho, UTM 19S WGS 84. Fuente: desarrollada para modelación del evento 2020.

## 4. Resultados

### 4.1 Área y altura de inundación

El principal resultado de este trabajo es la simulación calibrada para reproducir el evento aluvional 2020 mediante el uso de faDebrisFOAM. El caudal máximo de entrada al modelo en las quebradas ocurre a los 410 s y 500 s mientras que la duración total de estos hidrogramas es de 2050 y 2500 s (Tabla 2). Esta duración de los hidrogramas conversa correctamente con la descripción de habitantes del poblado, quienes describen una oleada principal que fluyó a través del pueblo por cerca de 20 minutos y luego continuó escurriendo con menor intensidad. A pesar de que el hidrograma dura 2500 s, el tiempo total de la simulación es 5000 s para asegurar que el aluvión escurra en su totalidad a través del dominio de modelación.



**Figura 4.** Alturas de escurrimiento resultantes en metros. a) tiempo 1000 s, b) tiempo 2000 s, c) tiempo 4000 s, y d) tiempo 5000 s

La Figura 4 presenta cuatro pasos temporales (1000 s, 2000s, 4000s, y 5000s) de la altura de escurrimiento simulada por faDebrisFOAM. En la Figura 4.a se observa el frente de la primera onda, mientras que en la Figura 4.b el flujo llega al río. En la Figura 3.c ya es visible que la zona afectada por el evento de 2020 es reproducida correctamente por el modelo respecto de lo visto en terreno (Figura 2 vs Figura 4). La principal diferencia entre lo real y lo simulado corresponde a la ramificación que escurra paralelo al río El Tránsito en la Figura 4.d ( $t=5000s$ ). Esto responde a que la topografía utilizada se encuentra limpia de vegetación y viviendas. En realidad, el aluvión fue encausado por la calle Cajón puntilla y luego por la calle Manuel Matta (Figura 1), donde las viviendas jugaron un rol clave en encausar el

escurrimiento. Por el contrario, al haber eliminado las viviendas, el flujo simulado escurre libremente hacia el norte sin encontrar obstáculos.

El evento aluvional de 2020 corresponde a un aluvión con varios puntos de avulsión (Figura 5). En la ramificación del aluvión que escurre hacia el sur, el flujo cruza el camino Cajón Puntilla donde se desvía y afecta un galpón agrícola (Punto de avulsión a1). Por otra parte, el escurrimiento norte proveniente de quebrada Los Morados presenta 3 puntos de avulsión. El primero (Punto de avulsión a2) corresponde a la confluencia ambos flujos aluvionales, lo que fuerza que gran parte de los flujos provenientes de quebrada Los Morados se desvíe hacia el canal construido, que corresponde a la ramificación norte de la quebrada. En el punto donde dicho canal intercepta la calle Cajón Puntilla, parte del flujo es capaz de seguir aguas abajo por el canal. Sin embargo, una porción significativa del flujo se desvía hacia el norte afectando directamente a las casas de calle Manuel Matta (Punto de avulsión a3). Finalmente, el tramo del canal previo a la confluencia con río El Tránsito fue incapaz de transportar el aluvión, bloqueándose, desbordando, y generando una nueva avulsión (Punto de avulsión a4). A partir de esto los desbordes del canal impactaron nuevamente el poblado de El Tránsito, siendo una escuela lo más más afectado.

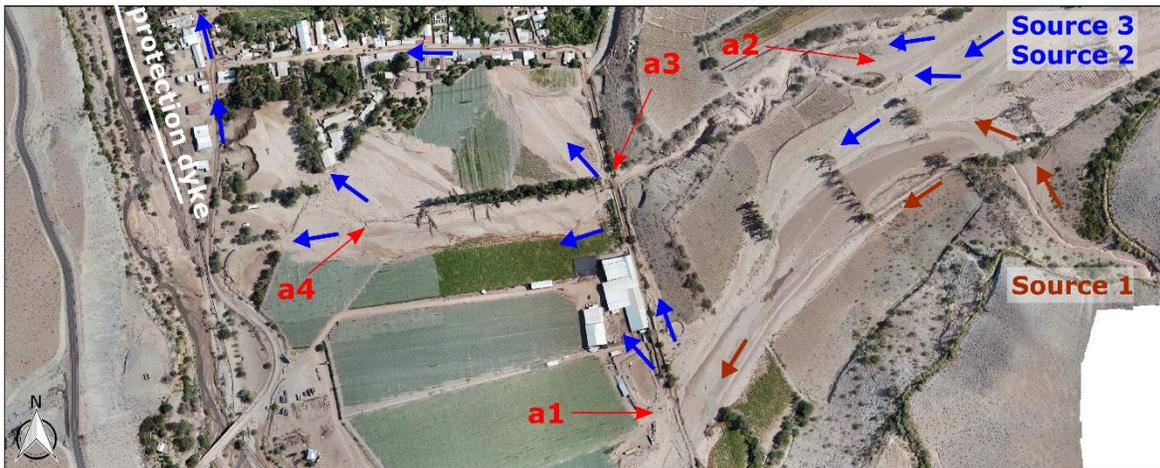


Figura 5. Puntos de avulsión a1 a a4.

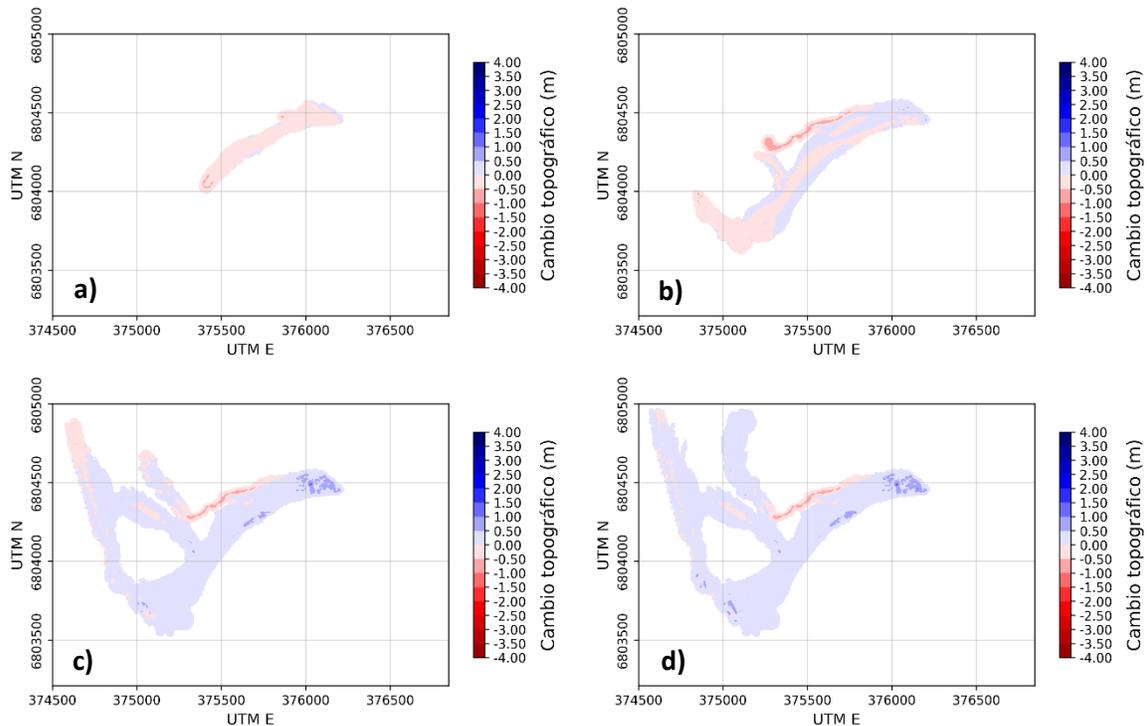
En el tramo de aguas arriba de la Figura 5 en la quebrada La Plaza, los depósitos corresponden a un flujo de barro y grava más viscoso, dentro del cual se reconocen bloques de rocas de gran tamaño de hasta 1-3 m de diámetro. Aguas abajo, paralelo al río, sólo el barro y material detrítico más fino fueron capaces de fluir hasta por cerca de 1.7 km gracias a que se canalizó por la ruta C-495 y calles aledañas. En estos sectores la inundación alcanzó niveles de 10-50 cm de altura.

#### 4.2 Procesos de erosión y depositación

La Figura 6 presenta los patrones de erosión y depositación para los mismos pasos temporales de la Figura 5. En la Figura 6.a se puede ver que el aluvión genera una erosión en los primeros instantes debido al gran caudal ingresado por el hidrograma. En la Figura 6.b ( $t = 2000$  s) se observa que la ramificación norte ocurre erosión debido a que se trata de un canal angosto y

profundo. Por el contrario, la ramificación sur no presenta un canal definido, permitiendo que el escurrimiento abarque un mayor ancho y menor altura de escurrimiento. Para  $t = 4000$  s y  $t = 5000$  s (Figuras 6.c y 6.d), los procesos de erosión y depositación prácticamente han terminado excepto en la avulsión hacia el norte desde el punto de avulsión a3. Esto se debe a que no hay flujo ingresando al modelo desde  $t=2500$  s por lo que la inundación en el abanico es mínima hacia el final de la simulación.

Finalmente se observa que la situación final de erosión/depositación simulada por faDebrisFOAM (Figura 6.d) guarda estrecha relación con la situación detectada en terreno mediante el DoD (Figura 2).



**Figura 6.** Cambio topográfico simulado mediante faDebrisFOAM. a) tiempo 1000 s, b) tiempo 2000 s, c) tiempo 4000 s, y d) tiempo 5000 s

## 5. DISCUSIÓN

El patrón de erosión/depositación donde el aluvión genera erosión en el centro de su sección transversal y depositación hacia los costados se repite en varios puntos y pasos temporales a lo largo de la simulación (ver punto de avulsión a3 y a4). Esto se debe a que una mayor altura de escurrimiento genera mayores esfuerzos de corte basal. A medida que la altura de escurrimiento disminuye hacia los extremos de la sección transversal, el esfuerzo de corte basal baja hasta un punto por debajo del esfuerzo de corte basal crítico, anulando el *entrainment* y, por lo tanto, la erosión. Cuando esto ocurre, la tasa de depositación domina los procesos de intercambio de sedimento flujo-suelo, generando la depositación de sedimento en los extremos de la sección transversal.

Este patrón de erosión/depositación también es visible en el levantamiento de terreno. A modo de ejemplo se presenta la Figura 7, la cual es un acercamiento entorno al punto de avulsión a3. En esta zona existe una clara oleada que desborda del canal y fluye en dirección NW hacia las casas de calle Manuel Matta. Aquí las marcas del flujo demuestran la evidente erosión al centro del escurrimiento y la depositación de sedimento a los costados del perfil transversal.



**Figura 7.** Patrón de erosión depositación entorno al punto de avulsión a3.

Otra ventaja relevante del modelo es su capacidad de representar el efecto que tiene la curvatura de la topografía sobre la que escurre el aluvión. En modelos puramente 2D el efecto de la curvatura debe incorporarse explícitamente, mientras que faDebrisFOAM, al tratarse de un modelo de áreas finitas sobre una superficie curvilínea y un vector velocidad que tiene 3 dimensiones, el efecto de curvatura está intrínsecamente considerado. El trabajo actual de este grupo de investigación es beneficiarse de esta capacidad para calibrar el flujo que ocurrió en las quebradas (aguas arriba del ápice) ya que se cuenta con marcas de inundación que registran de buena manera la sobreelevación por curvas en varios tramos de sus cauces.

La principal limitación del modelo en su estado actual corresponde a la necesidad de que no existan paredes verticales, especialmente cuando se activa el TMA. Cuando se desea simular cambios en la topografía, instancias donde el vector normal (que describe un elemento de área) se acerca a la horizontal el modelo presenta problemas de estabilidad debido a cómo

calcula los cambios en la topografía. Esto puede evitarse aumentando el tamaño de los elementos de área, sin embargo, se pierde resolución de lo que se busca representar.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la simulación del evento aluvional de enero de 2020 mediante faDebrisFOAM evidencian que el modelo es capaz de representar de forma adecuada la zona afectada por el flujo de detritos, incluyendo los patrones de erosión y depositación observados en terreno.

La validación realizada con datos topográficos pre y post evento demuestra que faDebrisFOAM reproduce adecuadamente el flujo principal, sus ramificaciones y los puntos de avulsión, reconociendo la interacción entre el terreno y la dinámica del flujo. En particular, la capacidad del modelo de simular flujos sobre superficies curvilíneas tridimensionales permite incorporar de forma inherente el efecto de la curvatura del terreno en los patrones de escurrimiento, diferenciándose de otros enfoques bidimensionales tradicionales.

Mediante este trabajo queda en evidencia la importancia del levantamiento detallado de información en terreno, especialmente en lo relativo a la caracterización del depósito post evento y a los testimonios locales, como insumos clave para la calibración reológica del modelo y la construcción realista de hidrogramas de entrada. La comparación entre los resultados simulados y las observaciones directas permite validar no solo la distribución espacial del depósito, sino también la duración del evento, alineándose con los relatos de los habitantes del sector.

Por otra parte, se identifican limitaciones relacionadas con la representación numérica de pendientes muy empinadas en zonas donde se activa el algoritmo de modificación de terreno (TMA). Este aspecto afecta la estabilidad del modelo y limita su resolución (tamaño de los elementos de área). El trabajo futuro de este modelo debería ir en la línea de cómo manejar esta limitación.

El *solver* faDebrisFOAM demuestra ser una herramienta con gran potencial para la simulación de flujos de detritos, por lo que se invita a investigadores y estudiantes a contribuir en el desarrollo de esta herramienta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Centro de Tecnología Avanzada para la Minería (AMTC), del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y al financiamiento basal del Proyecto AFB230001 ANID. Alex Garcés agradece la beca de Doctorado Nacional ANID 21191593.

## REFERENCIAS

- Aguilar, G., Cabré, A., Fredes, V., y Villela, B. (2020). Erosion after an extreme storm event in an arid fluvial system of the southern Atacama Desert: An assessment of the magnitude, return time, and conditioning factors of erosion and debris flow generation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(5), 1247–1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1247-2020>
- Bartelt, P., Bieler, C., Bühler, Y., Christen, M., Deubelbeiss, Y., Graf, C., McArdell, B. W., Salz, M., Schneider, M. (2017). RAMMS: Rapid Mass Movement Simulation. A numerical model for debris flows in research and practice. User Manual v1.7.0 - Debris Flow, manuscript update. November 2017. WSL Institute for Snow and Avalanche Research, Birmensdorf.
- Cabré, A., Garcés, A., Aguilar, G., Montserrat, S., Beriain, E., & Alfaro, F. O. (2025a). Construction, destruction and fan-river coupling dynamics during two consecutive debris flow events in an arid fluvial system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(4), e70041. <https://doi.org/10.1002/esp.70041>
- Cabré, A., Aguilar, G., Colombo, F., Antinao, J. L., & Iturra, D. (2025b). Flow-type controls on tributary alluvial fan formation along the Andes (18-34° S). *Journal of South American Earth Sciences*, 156, 105442. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105442>
- Calvo, B., y Savi, F. (2009). A real-world application of Monte Carlo procedure for debris flow risk assessment. *Computers & Geosciences*, 35, 967–977. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.002>.
- Fagents, S. A., y Baloga, S. M. (2006). Toward a model for the bulking and debulking of lahars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B10), B10201. <https://doi.org/10.1029/2005JB003986>
- Frank, F., McArdell, B. W., Huggel, C., y Vieli, A. (2015). The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: Examples from the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(11), 2569–2583.
- Frank, F., McArdell, B. W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M., y Vieli, A. (2017). Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(5), 801. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>
- Frey, H., Huggel, C., Bühler, Y., Buis, D., Burga, M. D., Choquevilca, W., Fernandez, F., García Hernández, J., Giráldez, C., Loarte, E., Masias, P., Portocarrero, C., Vicuña, L., y Walser, M. (2016). A robust debris-flow and GLOF risk management strategy for a data-scarce catchment in Santa Teresa, Peru. *Landslides*, 13, 1493–1507. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0669-z>
- Garcés, A., A. Cabré, G. Aguilar, A. Tamburrino y S. Montserrat (2021). “Caracterización de la evolución geomorfológica de sistemas fluviales mediante el uso de dron”. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Santiago, Chile. 2 13-15 de octubre.
- Garcés, A., Zegers, G., Cabré, A., Aguilar, G., Tamburrino, A., & Montserrat, S. (2022). A modeling methodology to study the tributary-junction alluvial fan connectivity during a debris flow event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(2), 377-393. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-377-2022>

- González, A. (2021). *Modelación numérica de los procesos de erosión/depositación en flujos detríticos. Aplicación en quebradas afluentes a Río El Carmen, Huasco*. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile (2021). Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182951>
- González, A., y A. Tamburrino (2022). faDebrisFOAM: nuevo solver de openFOAM que incorpora los procesos de erosión y depositación en la modelación de flujos detríticos. XX Jornadas de Mecánica Computacional (JMC), Valdivia, Chile. 6 y 7 de octubre.
- IDIEM. (2019). *Diseño de Obras Fluviales y de Control Aluvional cuenca Río El Carmen y Cuenca Río El Tránsito, Comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Informe Final.
- Ikeda, A., Mizuyama, T., y Itoh, T. (2019). Study of prediction methods of debris-flow peak discharge. En *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation* (pp. 709–715). Golden, USA, 10–13 de junio. <https://doi.org/10.25676/11124/173051>
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245–296. <https://doi.org/10.1029/97RG00426>
- Marín, M., V. Fariás y G. Pantoja (2020). *Efectos Geológicos del Evento Meteorológico del Norte de Chile de Enero 2020: Observaciones entre El Tránsito y Valeriano, Comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama*. Informe técnico, 2020. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 35 p. Santiago.
- Mitchell, A., Zubrycky, S., McDougall, S., Aaron, J., Jacquemart, M., Hübl, J., Kaitna, R., y Graf, C. (2022). Variable hydrograph inputs for a numerical debris-flow runout model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(5), 1627–1654. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1627-2022>
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y., & Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 119(2), 244-261.
- Rauter, M., Kofler, A., Huber, A., y Fellin, W. (2018). faSavageHutterFOAM 1.0: depth-integrated simulation of dense snow avalanches on natural terrain with OpenFOAM. *Geoscientific Model Development*, 11(7), 2923-2939. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2923-2018>
- Rauter, M., y Z. Tuković (2018). A finite area scheme for shallow granular flows on three-dimensional surfaces. *Computers & Fluids*, 166, 184-199. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.02.017>
- Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19(1), 47–77. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>
- Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B. W., y Hübl, J. (2006). Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. *Computational Geosciences*, 10, 241–264. <https://doi.org/10.1007/s10596-005-9021-3>
- Rickenmann, D. (2016). *Methods for the quantitative assessment of channel processes in torrents (steep streams)*. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research – IAHR Monograph. CRC Press/Balkema.
- Romero, J.E., F. Vergara-Pinto, G. Aguilar, A. Garcés y S. Montserrat (2022). @ Valley of Chile. *Landslides* 19, 865–883. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01830-2>

- Uribe, F. (2020). Informe Geológico de Remoción en Masa del 27 de Enero de 2020 en el Sector El Tránsito, Comuna Alto del Carmen, Región de Atacama. Informe Técnico, 2020. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 47 p. Santiago.
- Salazar, E., F. Coloma y C. Creixell (2013). Geología del área El Tránsito-Lagunillas, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 149: 106p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980 (p. 45). Ministerio de Minería de Chile. Recuperado de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf> (último acceso: 10 de abril de 2025)
- Takahashi, T. (2014). Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. 2<sup>nd</sup> Edition. Taylor & Francis.
- Zegers, G., P.A. Mendoza, A. Garcés & S. Montserrat (2020). Sensitivity and identifiability of rheological parameters in debris flow modeling. Natural Hazards and Earth System Sciences, 20(7), 1919-1930. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1919-2020>

### **ACERCA DE LOS AUTORES**

**Alex Garcés** es Ingeniero Civil y Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Cuenta con diez años de experiencia en consultoría y docencia. Actualmente se desempeña como investigador en el Centro de Tecnología Avanzada para la Minería (AMTC) de la Universidad de Chile y está realizando su tesis en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería mención Fluidodinámica en la misma universidad. Se especializa en el uso de programas de modelación numérica de escurrimiento superficial, sistemas de información geográfica, y lenguajes de programación. También se ha especializado en el uso de drones para el levantamiento de información en terreno.

**Iván Campos** es Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, con 3 años de experiencia en consultoría y docencia. Pasante de investigación en modelos numéricos bidimensionales en el Instituto Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Actualmente, estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile. Tiene experiencia en estudios de mecánica fluvial y análisis de inundaciones mediante modelación numérica en 1 y 2 dimensiones.

**Santiago Montserrat** es Ingeniero Civil, Magister en Recursos y Medio Ambiente Hídrico y Doctor en Ciencias de la Ingeniería, mención Fluidodinámica de la Universidad de Chile, con más de 18 años de experiencia en estudios de hidrología e hidráulica. Investigador asociado del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC) de la Universidad de Chile. Experto en estudios medioambientales, hidrodinámica y calidad de aguas, transporte de sedimentos, flujos aluvionales, estudios hidrológicos y de cambio climático. Experiencia en gestión de equipos multidisciplinarios para proyectos de ingeniería e investigación incluyendo estudios experimentales, monitoreo en terreno y modelación numérica en 1, 2 y

3 dimensiones. Participación reciente en estudios de ingeniería y de investigación en proyectos de modelación y mitigación aluvional, incluyendo monitoreo en terreno.

**Aldo Tamburrino** es Ingeniero Civil mención Hidráulica de la Universidad de Chile, M.Sc. y Ph.D. in Civil Engineering por la Universidad de Minnesota, EEUU. Es Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, donde enseña cursos de pre y postgrado en dicha universidad. Actualmente sus áreas de interés se centran fundamentalmente en hidráulica fundamental, flujos detríticos, granulares y de fluidos no-newtonianos.

# DESAFIOS EN LA EXPERIMENTACIÓN FÍSICA DE ALUVIONES: ANÁLISIS DEL CASO QUEBRADA DE MACUL EN CHILE

JAIME COTRONEO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Hidráulica

<sup>2</sup>Programa de Doctorado de Ingeniería Civil, Universidad de Chile  
jaime.cotroneo@inh.cl

## RESUMEN

La experimentación física de flujos aluvionales representa una herramienta fundamental para el diseño de obras de mitigación y la comprensión de estos fenómenos naturales destructivos. Este artículo analiza los desafíos metodológicos y las consideraciones técnicas para desarrollar modelos físicos que reproduzcan adecuadamente la dinámica de flujos detríticos, con énfasis en el caso de estudio de la Quebrada de Macul (Chile). Se discuten los principales obstáculos en el escalamiento de estos fenómenos, particularmente la imposibilidad de mantener simultáneamente todas las similitudes dinámicas entre prototipo y modelo. El análisis dimensional revela que la correcta representación de los esfuerzos predominantes (friccionales, colisionales y viscosos) requiere considerar números adimensionales como Bagnold, Savage y la relación entre altura de flujo y diámetro de partículas. Para el caso de la Quebrada de Macul, se determinó que el flujo aluvional de 1993 correspondió a un régimen inercial dominado por colisiones entre partículas (flujo pedregoso), con valores de  $Ba > 450$ ,  $Sa > 0,1$  y  $H/d_p < 10$ . La modelación física a escala 1:50 utilizando mezclas agua-arcilla como fluido intersticial permitió reproducir estas condiciones, manteniendo la similitud dinámica necesaria para evaluar la eficacia de estructuras de control. Los resultados demuestran que, pese a las limitaciones inherentes al escalamiento, los modelos físicos constituyen una aproximación valiosa para validar diseños de obras de protección y complementar simulaciones numéricas.

**Palabras claves:** flujos aluvionales, experimentación física, escalamiento, números adimensionales, obras de mitigación

## 1. INTRODUCCIÓN

Chile, por su configuración geográfica y su exposición a fenómenos naturales extremos, es un país altamente vulnerable a los flujos aluvionales. Estos eventos, caracterizados por la rápida movilización de sedimentos, agua y material orgánico, han marcado históricamente a comunidades asentadas en zonas precordilleranas y cauces secos. Ejemplo de ello son los catastróficos aluviones de marzo de 2015 en las regiones de Atacama y Antofagasta, que dejaron 31 personas fallecidas, 16 personas desaparecidas, 16.000 damnificados, 30.000 desplazados y alrededor de 164.000 afectados, además de daños a viviendas e infraestructura

crítica como puentes, edificios, rutas y caminos en el Norte Chico de nuestro país (CIGIDEN, 2015).

La recurrencia y severidad de estos eventos plantea desafíos significativos para la ingeniería hidráulica y la gestión de riesgos (Luo et al 2023). La complejidad física de los flujos aluvionales —mezclas heterogéneas de agua, sedimentos y material orgánico que se comportan como un continuo— dificulta su caracterización mediante enfoques puramente teóricos o numéricos. Estos flujos exhiben comportamientos no lineales donde interactúan múltiples fases (sólida y líquida) bajo regímenes que pueden variar desde dominados por fuerzas viscosas hasta controlados por colisiones entre partículas.

La modelación experimental de flujos aluvionales surge como una herramienta indispensable para abordar este desafío. A diferencia de las simulaciones numéricas, que enfrentan limitaciones para capturar la compleja interacción sólido-líquido-estructura, los modelos físicos permiten reproducir fenómenos clave como la segregación de partículas, la generación de presiones de poro y el impacto contra estructuras. No obstante, su implementación conlleva dificultades inherentes, particularmente en el escalamiento de parámetros físicos y en la representación dinámica de los esfuerzos predominantes (friccionales, colisionales y viscosos). Esto exige un enfoque basado en el entendimiento del fenómeno y para ello los definir los números adimensionales tiene un rol importante, como los de Bagnold (Ba), Savage (Sa), entre otros, que garantizan similitud dinámica entre prototipo y modelo.

El presente trabajo se centra en la experimentación física realizada para el diseño de obras en la Quebrada de Macul (Región Metropolitana, Chile), sitio del devastador aluvión de 1993. Los resultados destacan la importancia de replicar regímenes inerciales dominados por colisiones entre partículas, así como los retos asociados a la selección de fluidos intersticiales no newtonianos (mezclas agua-arcilla) para emular la viscosidad del prototipo.

Este artículo busca contribuir al conocimiento sobre metodologías experimentales para flujos aluvionales, abordando sistemáticamente los desafíos de escalamiento, la caracterización reológica de fluidos intersticiales y la representación de esfuerzos dominantes. Se discuten criterios para la selección de escalas apropiadas y se proponen lineamientos para futuras investigaciones que integren enfoques experimentales y numéricos. El objetivo final es proporcionar herramientas metodológicas que fortalezcan la resiliencia de comunidades vulnerables mediante el diseño de obras de mitigación más eficaces y adaptadas a las condiciones específicas de cada cuenca.

## **2. MECÁNICA DE LOS FLUJOS DE DETRITOS**

Un flujo de detritos o aluvión puede definirse como una mezcla de sólidos y líquido que se mueve por efecto de la gravedad como un continuo y que posee gran movilidad, alcanzando grandes distancias hasta su detención en terrenos muchas veces de baja pendiente. Estos ocurren cuando masas de sedimento agitadas y saturadas por agua deslizan a lo largo de una pendiente por acción de la fuerza de gravedad (Montserrat, 2005).

La fase sólida de un flujo de detritos está compuesta por sedimento natural presente en cauces y quebradas, con distribuciones granulométricas variadas y extendidas que pueden ir desde limos y arcillas hasta grandes rocas de varios metros de diámetro. Según Takahashi (2014), en el aluvión ocurrido en Venezuela en 1999, conocido como la "Tragedia de Vargas", se observaron rocas de tamaño superior a 10 metros.

La fase líquida o fluido intersticial está compuesta principalmente por agua. Sin embargo, se considera que aquellas partículas cuyo tiempo de sedimentación en aguas claras es superior al tiempo de duración del aluvión forman parte del fluido ambiente y se modelan como un fluido equivalente con sus propias características reológicas. Iverson (1997) estima que para aluviones con duraciones entre 10 y  $10^4$  segundos, estas partículas corresponden a limos y arcillas con diámetros inferiores a 0,0625 mm.

Para comprender dinámicamente un flujo de detritos, es fundamental analizar los diferentes esfuerzos que actúan en él. Un flujo aluvional está compuesto por una mezcla hiperconcentrada que consta de una fase líquida y una sólida. El esfuerzo total  $\tau$  que actúa en el flujo se descompone en varios componentes:

$$\tau = \tau_c + \tau_{ss} + \tau_{sf} + \tau_f + \tau_t \quad (1)$$

Donde  $\tau_c$  corresponde al esfuerzo por la fricción de las partículas,  $\tau_{ss}$  al esfuerzo de colisiones de partículas,  $\tau_{sf}$  al esfuerzo entre la fase líquida y sólida,  $\tau_f$  a los esfuerzos viscosos del fluido y  $\tau_t$  a los esfuerzos turbulentos del fluido.

A partir de definir de buena forma los esfuerzos predominantes del flujo a representar se puede construir una serie de números adimensionales que relacionen alguno de estos esfuerzos (Iverson 1997, Iverson & Delinger 2001 y Takahashi 2014).

- **Esfuerzos friccionales y inerciales (colisión de partículas):** La relación entre esfuerzos friccionales y la energía de colisiones se evalúa mediante el número de Savage (Sa). Valores menores a 0.2 indican predominancia de fuerzas friccionales, mientras que valores mayores determinan un régimen dominado por colisiones inerciales (Iverson & Denlinger, 2001).

$$S_a = \frac{\dot{\gamma}^2 \rho_s d_s}{N(\rho_s - \rho_m)g \tan\varphi} \quad (2)$$

donde  $\dot{\gamma}$  es la tasa de deformación del fluido,  $\rho_s$  es la densidad de los sólidos,  $\rho_m$  es la densidad de la mezcla o fluido equivalente,  $\varphi$  es ángulo de fricción interna de los granos,  $d_s$  es el diámetro característico de los sólidos,  $g$  la aceleración de gravedad y N representa el número de partículas en la columna de líquido, la cual se puede estimar como la altura relativa ( $H/d_s$ ), donde H es la altura característica del flujo.

- **Esfuerzos inerciales y viscosos:** Evaluados a través del número de Bagnold (Ba), que relaciona los esfuerzos inerciales de la fase sólida y los esfuerzos viscosos. Valores superiores a 400, predomina los esfuerzos inerciales (colisión entre

partículas), valores menores a 200 determina un régimen dominado por los esfuerzos viscoso del fluido.

$$Ba = \frac{\rho_s \lambda^{\frac{1}{2}} d_s^2}{\mu_m} \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\lambda = \left[ \frac{\phi^{1/3}}{\phi_*^{1/3} - \phi^{1/3}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

donde  $\lambda$  se define como la concentración lineal,  $\phi$  la concentración volumétrica de sólidos,  $\phi_*$  la concentración volumétrica de empaquetamiento (para esferas ordenadas de forma aleatoria corresponde aproximadamente a 0,62) y  $\mu_m$  la viscosidad de la mezcla o fluido equivalente.

- **Esfuerzos friccionales y viscosos:** El numero friccional  $N_f$  representa la relación entre los esfuerzos friccionales y los viscosos. Para valores superiores a 250 los esfuerzos friccionales dominan sobre los viscosos (Parsons et al. 2001).

$$N_f = \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{N(\rho_s - \rho_m)gd_s \tan\phi}{\dot{\gamma}^2 \mu} \quad (5)$$

- **Esfuerzos Inerciales (flujo) y viscosos:** El numero adimensional que relaciona estos esfuerzos es Reynolds.

$$Re \sim \frac{\rho_m UH}{\mu} \quad (6)$$

$$\rho_m = \rho_s \phi + \rho_f (1 - \phi) \quad (7)$$

donde U y H son la velocidad y altura características del flujo.

Otro aspecto para considerar y que viene a complementar la clasificación producto de los adimensionales es la clasificación dinámica de los flujos de detritos según Takahashi (2014), el cual propone una segregación para los flujos dinámicos, es decir, para aquellos con concentración volumétrica menor al 50 % (valores mayores al 50% se habla de flujos estáticos, dominados en gran parte por los esfuerzos de fricción coulombica) en donde participan los esfuerzos inerciales producto de las colisiones ( $\tau_{ss}$ ), turbulentos ( $\tau_t$ ) y viscosos ( $\tau_f$ ). De esta manera Takahashi divide a los flujos dinámicos en:

- **Pedregoso (“Stony”):**  $Ba > 450$  y  $H/d_p < 10$
- **Turbulento de Barro (“Turbulent-Muddy”):**  $Re > 1500$  y  $H/d_p > 30$ .
- **Viscosos (“Viscous”):**  $Re < 500$  y  $Ba < 40$ .

donde  $H/d_p$  es conocido como la altura relativa, H corresponde a la altura del flujo y  $d_p$  al diámetro característico.

Como se puede observar el prevalecer la dinámica de este tipo de flujos, considera varios esfuerzos extras, características que los hacen más complicado en poder entender la dinámica

de estos en comparación con los flujos con concentraciones volumétricas de sedimentos menores a 20 % aprox.

Aunque estos números adimensionales y clasificaciones se definen estrictamente para flujos constantes y uniformes, realizar una comparación de sus valores relativos resulta útil para escalar experimentos inestables y no uniformes, así como para comparar flujos naturales con flujos experimentales (Iverson et al 2010, Iverson 2015).

### **3. NECESIDAD DE LA EXPERIMENTACIÓN FÍSICA**

#### **3.1. Limitaciones de la observación directa en campo**

El estudio de los flujos de detritos en condiciones naturales presenta numerosas dificultades. La naturaleza impredecible y esporádica de estos eventos hace que la observación directa sea extremadamente complicada. Como señala Adams et al. (2019), "la complejidad de estos ambientes hace difícil estar en el sitio en el momento del flujo de detritos", lo que ha llevado a muchos investigadores a recurrir a modelos físicos.

Además, las condiciones iniciales y de contorno en eventos naturales son generalmente desconocidas o difíciles de cuantificar con precisión. La heterogeneidad del material involucrado, las variaciones en la topografía y las condiciones hidrológicas previas al evento introducen un alto grado de incertidumbre en las observaciones de campo.

#### **3.2. Limitaciones de los modelos numéricos**

Si bien los modelos numéricos ofrecen una alternativa para el estudio de los flujos de detritos, estos también presentan limitaciones significativas. La complejidad de los procesos físicos involucrados, que incluyen interacciones entre fases, comportamientos reológicos no lineales y fenómenos de escala múltiple, hace que su representación matemática sea extremadamente desafiante.

Como señala Iverson et al. (2010), muchos libros de texto representan erróneamente la mecánica de los flujos de detritos, atribuyéndoles una reología no-Newtoniana fija y asumiendo que los flujos son laminares y sujetos a condiciones de no deslizamiento en los límites. En contraste, los datos experimentales demuestran que la característica central de la mecánica de los flujos de detritos es el flujo bifásico heterogéneo, en el que la fricción en los límites es crucial y la resistencia local al flujo es una variable que evoluciona junto con la dinámica global.

#### **3.3. El papel complementario de la experimentación física**

La experimentación física emerge como una herramienta fundamental para superar las limitaciones tanto de la observación directa como de la modelación numérica. Los experimentos físicos permiten:

- Control de condiciones iniciales y de contorno: A diferencia de los eventos naturales, los experimentos pueden realizarse bajo condiciones controladas y reproducibles, facilitando el análisis sistemático de diferentes variables (Roelofs & Colucci 2022, De Haas et al 2018).
- Observación directa de procesos: Los experimentos permiten la observación directa de procesos que serían imposibles de capturar en eventos naturales, como la evolución de la presión de poros, la segregación granular y los mecanismos de deposición. (Johnson et al 2012, Haas & Woerkom 2016)
- Validación de modelos numéricos: Los datos obtenidos de experimentos físicos proporcionan una base sólida para la validación y calibración de modelos numéricos, mejorando su capacidad predictiva (Jing et al 2018).
- Estudio de fenómenos específicos: Los experimentos pueden diseñarse para aislar y estudiar fenómenos específicos, como la influencia de la rugosidad del lecho o el contenido de finos en la movilidad del flujo.
- La información obtenida de los experimentos es fundamental para dimensionar y validar estructuras de protección (canales de derivación, piscinas de retención) que mitiguen el impacto de flujos aluvionales. (Cui et al 2015, Li et al 2020)

## **4. DESAFÍOS EN LA EXPERIMENTACIÓN FÍSICA**

### **4.1. El Problema del Escalamiento**

El principal desafío al escalar un fenómeno natural a un modelo físico reducido es la imposibilidad de representar todas las características geométricas y físicas (fuerzas) presentes en el fenómeno real. Esto se debe a que, al reducir la escala, ciertas propiedades y relaciones físicas no se mantienen de manera proporcional.

En el caso de los flujos aluvionales, uno de los efectos de escala más relevantes es que una fracción de la curva granulométrica escalada tendrá diámetros inferiores a  $64 \mu\text{m}$ , por lo que esas partículas pasarán a ser parte del fluido intersticial y no podrán modelarse como partículas sólidas. Esto implica que los esfuerzos asociados a las colisiones de esas partículas no se pueden representar y deben considerarse como parte del fluido.

La presencia de partículas finas en el rango de  $d_s < 64 \mu\text{m}$  modifica significativamente las propiedades reológicas del fluido intersticial, incrementando su viscosidad efectiva y favoreciendo la generación de fluctuaciones en la presión de poros. Esto puede aumentar la tasa de generación de excesos de presión de poros y disminuir la difusión de estos excesos, lo que afecta la dinámica del flujo (Iverson, 1997; Iverson & George, 2014).

Para cuantificar estos efectos, Iverson (2015) propone el uso de un número adimensional que compara la tasa de difusión del exceso de presión de poros con la tasa de generación de estas fluctuaciones. Este número adimensional,  $\Pi_1$ , se define como:

$$\Pi_1 = \frac{kE}{U\mu H} \quad (8)$$

donde  $K$  es la permeabilidad hidráulica,  $E$  el módulo de Young del sedimento,  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido intersticial,  $U$  la velocidad promedio y  $H$  la altura del flujo. Valores altos de  $\Pi_1$  indican que la difusión del exceso de presión de poros ocurre más rápidamente que su generación, lo que puede no ser representativo de la realidad en modelos a escala reducida.

En este adimensional radica la dificultad de modelar a escala reducida los flujos aluvionales. Considerando que el flujo aluvional es un flujo gravitacional, parece razonable su escalamiento manteniendo el número de Froude. Es decir,  $\lambda_U = \sqrt{\lambda_H}$  en donde  $\lambda_H$  corresponde a la escala geométrica y  $\lambda_U$  es la escala de velocidades. Para mantener tanto el prototipo como en modelo la misma tasa de generación y difusión de excesos de presión de poros, se debe cumplir  $\lambda_{\Pi_1} = 1$ . Considerando  $\lambda_k = \lambda_E = 1$ , se tiene:

$$\lambda_\mu = \lambda_H^{-3/2} \quad (9)$$

Como ejemplo, para un modelo a escala 1:80, se tendría  $\lambda_\mu = 716$ . Es decir, la viscosidad tendría que ser 716 veces más grande en modelo que en prototipo. Esto sobre estimaría los esfuerzos viscosos y puede transformar un flujo turbulento en el prototipo en un flujo laminar en el modelo, alterando la dinámica real del fenómeno. Según Iverson (2015), no existe hasta ahora un escalamiento satisfactorio que resuelva este problema.

Debido a estas limitaciones, la alternativa más viable es construir modelos físicos lo más grandes posible, para acercarse a la realidad y minimizar los efectos de escala. Sin embargo, incluso en los modelos más grandes, como el canal de la USGS, la distancia recorrida por el flujo ("run out") es mucho menor que en la naturaleza, ya que la difusión del exceso de presión de poros es mucho más rápida en el modelo.

Si bien el escalamiento de la viscosidad es uno de los efectos de escala más problemáticos, aún es posible realizar realizar modelos a escala reducida, manteniendo la similitud dinámica entre el modelo y el prototipo, especialmente en lo que respecta a la relación entre la escala de los granos y la altura del flujo,  $H/d_p$  (Takahashi), así como los números adimensionales relevantes como lo son los números de Savage, Bagnold, Friccional, Reynolds y Froude (Iverson, 2010).

#### 4.2. Caracterización de los Finos: Arcilla y Limo

Como ya se habló en los capítulos anteriores la experimentación física de aluviones, la elección del componente fino del fluido intersticial es de suma importancia. Tradicionalmente, se utilizan arcillas y limos, cada uno con características específicas. La

diferencia principal entre ambos radica en la morfología de sus partículas y en sus propiedades fisicoquímicas, lo que se traduce en comportamientos reológicos diferenciados (Major & Pierson, 1992)

La arcilla es un material predominante en escenarios de movimientos de tierras y aluviones, no solo por su abundancia en la corteza terrestre, sino también debido a sus propiedades intrínsecas. Entre las arcillas, se destacan la bentonita y la caolita, entre otras. La bentonita se compone principalmente de minerales del grupo de la montmorillonita, que tienen una estructura en capas y una significativa capacidad de hinchamiento al contacto con agua. Esto le confiere al material una alta plasticidad y una reactividad que lo hace muy sensible a las condiciones de deformación y a la evolución temporal de las propiedades del fluido intersticial.

La caolita, en cambio, es un mineral de la familia de las caolinitas, caracterizado por su estructura cristalina estable y su baja capacidad de absorción de agua. La caolita presenta una menor plasticidad y un comportamiento más predecible ante esfuerzos, lo que se traduce en una respuesta reológica menos variable bajo condiciones dinámicas. Estas diferencias son cruciales al momento de definir el fluido intersticial en ensayos de laboratorio, ya que impactan directamente en la representación de fenómenos naturales en escalas experimentales.

El limo, que generalmente se refiere a partículas de tamaño intermedio entre la arcilla y la arena, también forma parte integral de la fase fina en la mayoría de los aluviones. Sin embargo, su comportamiento es menos complejo en términos reológicos en comparación con las arcillas (Parsons et al., 2001; Major & Pierson, 1992). No obstante, su contribución a la cohesión y a la viscosidad resulta importante para la integridad del flujo y para la formación de depósitos al final del recorrido.

Para ensayos donde se quiere obtener resultados reproducibles y aplicar condiciones iniciales constantes la elección de la caolita, entrega la mayor estabilidad reológica (Major & Pierson, 1992). La menor sensibilidad a la tasa de deformación permite enfocar el análisis en otros aspectos, como la segregación de partículas y la formación de estructuras deposicionales, sin que una variabilidad excesiva en la respuesta del fluido interfiera en la medición de parámetros críticos.

## **5. CASO DE ESTUDIO: QUEBRADA DE MACUL**

### **5.1. Antecedentes y Esfuerzos dominantes**

De acuerdo a lo reportado por Martínez (2009), Ayala (1996) y Naranjo y Varela (1996), el 3 de Mayo de 1993 ocurrieron los eventos de mayor importancia de remociones en masa en la zona del Sector Oriente de Santiago de Chile, debido al grado de desastre causado y por los volúmenes de material removido. El principal evento ocurrió en la Quebrada de Macul, movilizándolo un volumen estimado en 840.000 m<sup>3</sup>, a una concentración volumétrica del 38%,

el cual se manifestó en dos pulsos aluvionales. El primer pulso se estimó que alcanzó 1 m de altura a una velocidad de 15 km/hr, mientras que el segundo pulso alcanzo una altura de 3 m y una velocidad de 30 km/hr. Los parámetros recopilados del evento se muestran en la siguiente Tabla:

**Tabla 1.** Parámetros recopilados del evento

Parámetro	$\phi$	$U$ (m/s)	$H$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$\dot{\gamma} = U/H$ (1/s)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Evento 1993</b>	0,38	8,33	3	0,181	1,782	2,78	2650	1627

Debido a los pocos datos que se tienen del aluvión de la Quebrada de Macul se fue a terreno en enero del 2017 para obtener datos de la granulometría del lecho y riberas del cauce. En ella se observa la presencia de grandes clastos que han sido arrastrados por flujos detríticos ocurridos anteriormente cuyos diámetros máximos alcanzan magnitudes entre los 2,5 y 3,0 m. Debido a la temporalidad de los datos obtenidos y al lavado de material producido durante todos estos años el porcentaje de fino encontrado es menor al 1% lo que no constituye una concentración sustancial de finos, como para modificar la viscosidad ni reología del fluido intersticial. Según Iverson (1997), la viscosidad del fluido intersticial puede variar entre 1 y 100 veces la viscosidad del agua. Teniendo esta incertidumbre y considerando los parámetros físicos estimados en el aluvión de 1993 (Tabla 1), la Tabla 2 indica los valores que toman los números adimensionales de Bagnold, Savage, Altura relativa y Reynolds.

**Tabla 2.** Números adimensionales estimados para el segundo pulso del aluvión ocurrido en la Quebrada de Macul en Mayo de 1993.

	$B_a (\mu=1\text{cp})$	$B_a (\mu=100\text{cp})$	Sa	Re	$H/d_p$
$d_{50}$	535639	5517	0,05	24271845	16,55
$d_{90}$	51756940	533096	4,51	24271845	1,68

De la Tabla 2 se concluye que independiente de la viscosidad que pudo haber tenido el aluvión ocurrido el 1993, el flujo se encuentra en régimen inercial ya que  $Ba > 450$ . Por otro lado, y considerando el  $d_{50}$  como diámetro característico de los sedimentos, el número de Savage toma valores  $Sa < 0.1$ ; es decir, los esfuerzos friccionales entre las partículas predominan por sobre los esfuerzos inerciales producto de las colisiones entre las partículas.

Sin embargo, dada la concentración volumétrica de sedimentos del 38% en volumen estimada para dicho evento aluvional y la clasificación mecánica de Takahashi (2014), difícilmente el flujo podría haber estado dominado por la fricción entre las partículas. Teniendo en consideración los grandes clastos observados en la Quebrada de Macul, que han sido transportados por este tipo de flujos, es probable que la transferencia de momentum debido a las colisiones entre las partículas esté dominada por los sedimentos de mayor tamaño. Si este fuese el caso, el número de Savage toma el valor de  $Sa = 4,5$  manifestando así el predominio de las colisiones entre las partículas por sobre la fricción entre ellas. Manteniendo este supuesto, la Altura Relativa toma el valor de  $H/d_p = 1,7$ .

Finalmente, en base a la escasez de antecedentes históricos sobre flujos detríticos ocurridos en la Quebrada de Macul y considerando los supuestos realizados anteriormente, se determina que el flujo aluvional a reproducir en modelo físico a escala reducida debe estar en régimen inercial dominado por las colisiones entre las partículas por sobre los esfuerzos friccionales y viscosos. Es decir, se busca reproducir un flujo con  $Ba > 450$ ,  $Sa > 0,1$  y  $H/d_p < 10$ .

## 5.2. Elección de la Escala

Una vez encontrada la dinámica aluvional que se quiere reproducir en la experimentación física se debe escoger la metodología y tipo de instalación experimental más apropiada para el objetivo del estudio. En la actualidad existen modelos a gran escala y a escala de laboratorio que se utilizan para investigar los procesos de flujo de detritos. Dado que para el caso de estudio se quiere ensayar diferentes obras de control aluvional se centrará en la escala física del lugar debido a las limitaciones de dimensiones y tiempo.

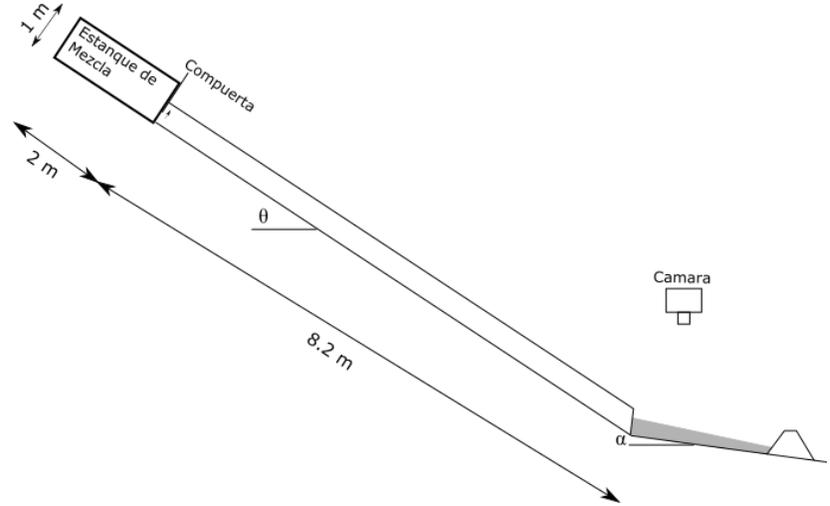
Las diferentes instalaciones experimentales abordan diversas áreas de investigación, como la formación de conos aluviales, la erosión y deposición de sedimentos, la interacción entre el flujo y las barreras, y la interacción en confluencias de ríos y quebradas, entre otros temas (Haas & Woerkom 2016, Haas et al 2018, Adams et al 2019, Roelofs & Colucci 2022, Lanzoni et al 2017 y Zheng et al 2021, entre otros).

En cuanto a la metodología utilizada para generar los flujos aluvionales en estas instalaciones, se destacan tres tipos principales: flujo impermanente, flujo permanente y flujo rotatorio. El flujo impermanente es ideal para estudiar flujos que ocurren durante el transporte de sedimentos (Iverson, 2015). Por otro lado, el flujo permanente es adecuado para investigar las propiedades reológicas de los flujos (Parsons et al 2001). Por último, el flujo rotatorio se utiliza para estudiar la segregación de sedimentos en el flujo (Leonardi et al 2015).

Dado el enfoque del caso estudio se ha decidido utilizar un canal con metodología impermanente para generar los flujos como el mostrado en la Figura 1. Esto permitirá simular las condiciones relevantes para el transporte de sedimentos, desarrollo del aluvion e interacción sedimentos estructura.



(a)



(b)

**Figura 1.-** Instalación experimental ubicada en el Instituto Nacional de Hidráulica, Chile. (a) Vista frontal instalación experimental. (b) Esquema instalación experimental.

Debido a que se requiere reproducir un flujo detrítico en régimen inercial, donde las colisiones entre partículas predominan sobre los esfuerzos viscosos y friccionales. Para lograr esto, se busca que los números adimensionales característicos del flujo, como el número de Bagnold ( $Ba$ ), el número de Savage ( $Sa$ ) y la relación  $H/d_p$ , cumplan con los criterios  $Ba > 450$ ,  $Sa > 0,1$  y  $H/d_p < 10$ .

Dado que en el modelo físico se utiliza como fluido intersticial una mezcla agua-arcilla. Diversos autores, Iverson (1985), Mayor (1992), Montserrat (2005), Iverson et al. 2010, Takahashi (2014), entre otros, indican que muchos flujos detríticos ocurridos en la naturaleza pueden modelarse como un fluido equivalente tipo Bingham, sobre todo para flujos con alto contenido de fino. La ley constitutiva de un fluido tipo Bingham es:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

cuya viscosidad aparente ( $\mu_a$ ) se define en analogía con los fluidos newtonianos como:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_y + \eta \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte total sobre un elemento de fluido,  $\tau_y$  el esfuerzo de fluencia, y  $\eta$  la viscosidad de Bingham. Para flujos detríticos, el esfuerzo de fluencia da cuenta de los esfuerzos friccionales entre las partículas. Las reologías del fluido intersticial tipo Bingham, se logra con la mezcla de agua y arcilla a concentraciones en peso  $C_p$  se obtienen mediante ensayos en reómetros.

En la Tabla 3 se muestra los valores del número de Bagnold para distintas escalas y concentraciones de arcilla. De los resultados se observa que, para mezclas agua-arcilla al 6%, el flujo se encuentra inerciales entre las escalas 1:40 a 1:80, para una mezcla 8% en peso, el flujo de detritos se encuentra en régimen inercial solo para las escalas 1:40 y 1:50. Para una concentración del 10%, el flujo se encuentra en régimen de transición para todas las escalas.

**Tabla 3.** Número de Bagnold para distintas escalas considerando fluidos tipo Bingham

Escala	$d_{90}$ (m)	Numero Bagnold			
		Prototipo	Cp 6%	Cp 8%	Cp 10%
Prototipo	1,782	533096	-	-	-
1:40	0,045	-	3726	817	304
1:50	0,036	-	2384	523	195
1:60	0,030	-	1656	363	135
1:70	0,025	-	1217	267	99
1:80	0,22	-	931	204	76

Debido a la incertidumbre en la elección de la viscosidad para la mezcla de fluido, se decide tener diferentes ensayos donde se varíe la viscosidad en los límites que permite tener un régimen inercial, además, el límite inferior de la viscosidad del fluido intersticial queda definido por dificultades de la metodología experimental, ya que el mecanismo de incorporación de la mezcla líquido-sólidos en el estanque de mezcla (ver Figura 1), debe quedar suspendidas todas las partículas (arenas y gravas) en el estanque para mantener la mezcla homogénea previo a la apertura de la compuerta.

Finalmente, y considerando todos los aspectos se escoge como la escala más adecuada para este caso de estudio es 1:50.

## 6. CONCLUSIONES

La experimentación física de flujos aluvionales constituye una herramienta fundamental para el diseño y validación de obras de mitigación, complementando las limitaciones inherentes a la observación directa en campo y a la modelación numérica. Este trabajo ha analizado sistemáticamente los desafíos metodológicos y las consideraciones técnicas para desarrollar modelos físicos que reproduzcan adecuadamente la dinámica de estos fenómenos complejos.

El principal desafío identificado radica en el escalamiento, donde resulta imposible mantener simultáneamente todas las similitudes dinámicas entre prototipo y modelo. El análisis dimensional revela que la correcta representación de los esfuerzos predominantes requiere priorizar ciertos parámetros adimensionales según el régimen de flujo a modelar. Para flujos pedregosos como el ocurrido en la Quebrada de Macul, es fundamental mantener valores de

$Ba > 450$ ,  $Sa > 0.1$  y  $H/dp < 10$ , garantizando así un régimen inercial dominado por colisiones entre partículas.

La caracterización reológica del fluido intersticial emerge como un factor crítico. La utilización de mezclas agua-arcilla con comportamiento tipo Bingham permite reproducir adecuadamente las propiedades viscosas del flujo, aunque con limitaciones para representar la evolución temporal de presiones de poro. La selección de la concentración óptima (entre 6% y 8% en peso para el caso estudiado) debe equilibrar la necesidad de mantener el régimen inercial con los requerimientos prácticos del experimento, como la suspensión homogénea de partículas.

El caso de estudio de la Quebrada de Macul demuestra la aplicabilidad de estos principios. Mediante un modelo a escala 1:50, se logró reproducir satisfactoriamente las características dinámicas del flujo aluvional de 1993, permitiendo evaluar la eficacia de diferentes configuraciones de obras de control. Los resultados confirman que, pese a las limitaciones de escalamiento, es posible obtener información valiosa sobre patrones de flujo, zonas de impacto y eficiencia de estructuras de control.

Se recomienda que futuras investigaciones integren de manera sinérgica modelos numéricos y experimentales, ampliando la infraestructura de ensayos a gran escala y perfeccionando las metodologías de escalamiento para una mejor representación de los procesos físicos. Este enfoque combinado contribuirá a mejorar el diseño, la validación y la implementación de estructuras de control frente a eventos aluvionales, ofreciendo soluciones más seguras y eficientes.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Convenio Específico entre el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) y el Programa de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, mediante el cual está realizando sus estudios de doctorado.

## REFERENCIAS

- Adams, K., Wasklewicz, T., De Haas, T., Lecce, S., & Gares, P. (2019). Reproducibility of debris-flow fan physical modeling experiments. *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*.
- Ayala, L. (1996). Hidráulica de los fenómenos de remoción en masa: corrientes de detritos y flujos de barro. Curso pre-XVII congreso latinoamericano de hidráulica, Guayaquil, Ecuador.
- Cui, P., Zeng, C., & Lei, Y. (2015). Experimental analysis on the impact force of viscous debris flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1644-1655.

- Haas, T. D., Kruijt, A., & Densmore, A. L. (2018). Effects of debris-flow magnitude–frequency distribution on avulsions and fan development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(13), 2779-2793.
- Haas, T. D., & Woerkom, T. V. (2016). Bed scour by debris flows: Experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(13), 1951-1966.
- Jing, L., Kwok, C. Y., Leung, Y. F., Zhang, Z., & Dai, L. (2018). Runout scaling and deposit morphology of rapid mudflows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(8), 2004-2023.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of geophysics*, 35(3), 245-296.
- Iverson, R. M., & Denlinger, R. P. (2001). Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B1), 537-552.
- Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., & Berti, M. (2010). The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F3).
- Iverson, R. M. & George, D. L. (2014). A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proc. r. soc. a*, 470(2170), 20130819.
- Iverson, R. M. (2015). Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. *Geomorphology*, 244, 9-20.
- Johnson, C. G., Kokelaar, B. P., Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., & Gray, J. M. N. T. (2012). Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1).
- Lanzoni, S., Gregoretti, C., & Stancanelli, L. M. (2017). Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(3), 592-614.
- Leonardi, A., Cabrera, M., Wittel, F. K., Kaitna, R., Mendoza, M., Wu, W., & Herrmann, H. J. (2015). Granular-front formation in free-surface flow of concentrated suspensions. *Physical Review E*, 92(5), 052204.
- Li, P., Wang, J., Hu, K., & Wang, F. (2020). Experimental study of debris-flow entrainment over stepped-gradient beds incorporating bed sediment porosity. *Engineering Geology*, 274, 105708.
- Luo, H. Y., Zhang, L. M., Zhang, L. L., He, J., & Yin, K. S. (2023). Vulnerability of buildings to landslides: The state of the art and future needs. *Earth-Science Reviews*, 238, 104329.
- Major, J. J., & Pierson, T. C. (1992). Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water resources research*, 28(3), 841-857.
- Montserrat, S. (2005). Estudio experimental de obras de protección contra aluviones. Tesis para optar al grado de Magister en ciencias de la ingeniería, Universidad de Chile.
- Martinez, B.D. (2009). Suceptibilidad de remoción en masa en la Quebrada de Macul, Región Metropolitana. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Naranjo, J.A. & Varela, J. (1996). Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47.

- Parsons, J. D., Whipple, K. X., & Simoni, A. (2001). Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. *The Journal of Geology*, 109(4), 427-447.
- Roelofs, L., Colucci, P., & de Haas, T. (2022). How debris-flow composition affects bed erosion quantity and mechanisms: An experimental assessment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(8), 2151-2169.
- Savage, S. B., & Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *Journal of fluid mechanics*, 199, 177-215.
- Takahashi, T. (2014). Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. CRC press.
- Zheng, H., Shi, Z., Hanley, K. J., Peng, M., Guan, S., Feng, S., & Chen, K. (2021). Deposition characteristics of debris flows in a lateral flume considering upstream entrainment. *Geomorphology*, 394, 107960.

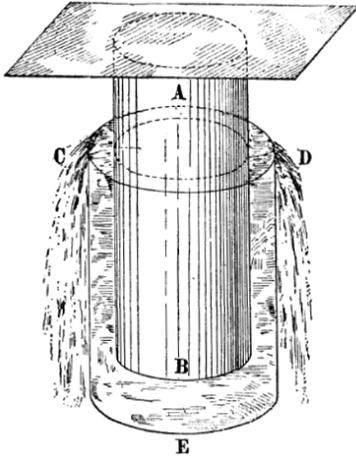
### **ACERCA DEL AUTOR**

**Jaime Cotroneo** obtuvo su título de Ingeniero Civil y el grado de Magíster en Recursos y Medio Ambiente Hídrico de la Universidad de Chile el 2014. Trabaja en el Instituto Nacional de Hidráulica del Ministerio de Obras Públicas, donde se desempeña como Jefe de la Unidad de Ingeniería y Desarrollo. Actualmente, aprovechando el convenio institucional entre el INH y el Programa de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidad de Chile desarrolla su tesis de doctorado en el área de los flujos detríticos.



## HIDRO-GRAFÍA

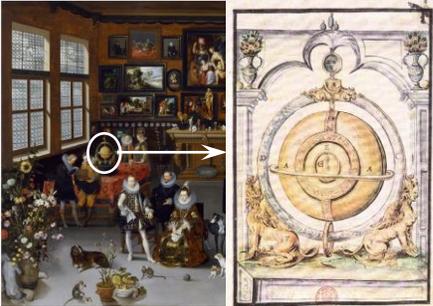
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS



La Hidro-Grafía de este número reproduce un dibujo realizado en una carta fechada en enero de 1613 que corresponde a:

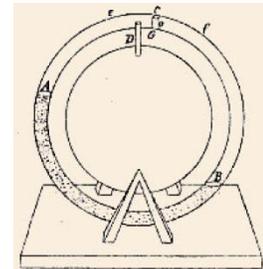
- La demostración experimental de  $Q = UA$  hecha por Benedetto Castelli: En un recipiente lleno de agua, un cilindro de área  $A$  desciende a una determinada velocidad  $U$  durante un tiempo  $T$  y se mide el volumen derramado  $V$ , demostrándose que  $Q = V/T = UA$ .
- Un esquema que sirve para demostrar que el principio de Arquímedes (el empuje sobre un cuerpo sumergido es igual al peso del volumen de líquido desplazado) no es siempre válido.
- Un sistema ideado por Galileo Galilei para determinar la inercia y la masa agregada de cuerpos parcialmente sumergidos.

## NÚMERO ANTERIOR



La respuesta correcta es la a) “Un reloj accionado por el movimiento oscilatorio del agua que se encuentra en el tubo exterior (DC)”, al menos en su descripción, porque no hay evidencia que realmente haya funcionado.

También descrito como una máquina de movimiento perpetuo, el “reloj” estaba construido de tal manera que el líquido contenido en el tubo oscilaba debido a las variaciones de presión atmosférica. Cómo se transmitía esta oscilación al movimiento de la manilla del reloj no es claro. Fue construido por el holandés Cornelis Drebbel (1572-1633) y existen varias representaciones del artilugio. En la imagen se ven dos de ellas, la pintura de Francken “Los Archiducos en el Gabinete de un Colector” (Museo Walters) y un dibujo por Hiesserle von Chodau que se encuentra en el Museo Nacional de la República Checa. Otras representaciones puede encontrarlas el lector en las pinturas “Alegoría de Vanidad” de Jan Bruegel y Rubens, “Interior del salón de la Archiduquesa Isabel de Austria” y “El gabinete de Corneille van der Geest durante la visita de los Archiducos”, ambas de Willem Van Haecht, en otra pintura de Hieronymus Francken II “El gabinete del colector”, etc. La imagen de la figura se encuentra en una carta de febrero de 1612 que Daniello Antonini le escribió a Galileo y en la que explica su funcionamiento: “lo cierto es que este movimiento se produce por la alteración del aire, causada por el calor y el frío”.





## **INVITACION A CONTRIBUIR CON ARTÍCULOS**

La Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica invita a contribuir con artículos para ser publicados en sus próximos números. Los artículos pueden ser en castellano o inglés.

Los artículos buscan difundir trabajos en el área de interés de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, especialmente aquellos relativos a la hidráulica, hidrología y mecánica de fluidos en general, así como otros aspectos relacionados con el agua, como su uso, gestión, recursos, tecnologías, historia, etc. Los artículos pueden ser de investigación teórica o aplicada, soluciones novedosas a problemas de ingeniería, difusión u otros temas de interés para la comunidad hidráulica nacional.

El formato de presentación de los trabajos puede solicitarse al Editor a la dirección electrónica [atamburr@uchile.cl](mailto:atamburr@uchile.cl)





