

Reconstrucción numérica del aluvión de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, 8 de octubre de 2026): recorrido, volumen e incertidumbre a partir de evidencia pública

Lester Wood*

Versión preliminar del 9 de octubre de 2026

Resumen

Sección en desarrollo: se completará al terminar la calibración (versión preliminar).

1. Introducción y planteamiento del problema

El jueves 8 de octubre de 2026, cerca de las 17:00 (UTC−3), un flujo de agua, barro y rocas descendió desde la quebrada que drena el sector precordillerano de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, Santiago) y recorrió calles residenciales por varios kilómetros: arrastró vehículos y un bus ([The Clinic, 2026](#)), inundó viviendas, una clínica y una universidad, dejó seis heridos y motivó la declaración de zona de catástrofe ([Interferencia, 2026](#)). Según la información periodística consultada, que recoge antecedentes del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), el evento ocurrió en una zona clasificada en febrero de 2026 como de alto peligro por flujos de detritos ([Chilevisión, 2026](#)). La cuenca había sido afectada por un incendio de unas 1000 ha entre diciembre de 2025 y enero de 2026 ([Municipalidad de Las Condes, 2026](#); [BioBioChile, 2026b](#)), y el evento siguió a la primera semana de octubre más lluviosa desde que hay registros continuos ([Wikipedia, 2026](#)).

Al día siguiente no existía una cartografía oficial del área afectada, ni aforos, ni marcas de nivel publicadas. La información disponible se reducía a notas de prensa, la lista de calles cerradas por el municipio, un perímetro de afectación y dos explicaciones del origen que no coinciden entre sí. Este trabajo aborda la reconstrucción del recorrido, el volumen y el caudal del aluvión mediante un modelo físico explícito y evidencia pública verificable. Asimismo, estima la profundidad, la velocidad y la presión del flujo en calles y edificios del área de estudio, considerando la incertidumbre de las estimaciones.

2. Marco teórico

Flujos de detritos y de barro. Un aluvión es una mezcla de agua y sedimento cuyo comportamiento depende de la concentración volumétrica total de sólidos $C_{v,tot}$. Con $C_{v,tot}$ entre 0,20 y 0,55 la mezcla presenta un esfuerzo de fluencia τ_y : se detiene cuando el esfuerzo motriz no lo supera. Su densidad es $\rho_m = \rho_w + C_{v,tot}(\rho_s - \rho_w)$, donde ρ_m , ρ_w y ρ_s son las densidades de la mezcla, el agua y los sólidos, respectivamente (kg m^{-3}); ρ_m se sitúa entre $1\,300\text{ kg m}^{-3}$ y $1\,900\text{ kg m}^{-3}$. En las relaciones reológicas interviene, en cambio, la concentración de la matriz fina $C_{v,f}$ (§4.3).

Aguas someras con reología. Cuando el espesor del flujo es pequeño frente a su extensión, las ecuaciones de Navier–Stokes integradas en la profundidad se reducen a las de Saint-Venant en dos dimensiones. La reología de la mezcla entra como una pendiente de fricción S_f , definida en la ecuación (3). El cierre cuadrático de O’Brien y Julien (1988) y O’Brien et al. (1993), usado por FLO-2D ([FLO-2D Software, Inc., 2021](#)), suma tres términos: fluencia, viscosidad y turbulencia más colisión de granos.

Representación urbana. En ciudad, el flujo se canaliza por las calles y lo desvían los edificios. Estos pueden representarse como bloques elevados, como huecos impermeables o mediante porosidad; la elección condiciona la capacidad predictiva ([Schubert y Sanders, 2012](#)).

*Estudio independiente. Contacto: lesterwood@gmail.com. Contenido bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

Volumen movilizable. El volumen de un flujo de detritos puede estimarse con un balance entre lluvia y escorrentía. En cuencas recién quemadas existen además modelos empíricos que lo relacionan con la intensidad de lluvia de 15 minutos, el área quemada y el relieve (Gartner et al., 2014). El caudal pico se relaciona empíricamente con el volumen (Mizuyama et al., 1992).

Calibración con observaciones cualitativas. Cuando solo se conoce la extensión del área afectada, distintas combinaciones de volumen, caudal y resistencia producen huellas parecidas, es decir, hay equifinalidad. El enfoque de estimación de incertidumbre mediante verosimilitud generalizada (GLUE, por sus siglas en inglés; Beven y Binley, 1992) propone aceptar todas las simulaciones de comportamiento aceptable y reportar la envolvente de sus predicciones en lugar de un único mejor ajuste.

3. Hipótesis y objetivos

Hipótesis de origen. Se contrastan tres hipótesis sobre la localización de los aportes del flujo a la zona urbana, formuladas a partir de fuentes de distinta confiabilidad:

- H1** El ducto que entuba la quebrada bajo la urbanización se obstruyó en el abanico, en las calles Mons. Álvaro del Portillo, Av. La Plaza y General Blanche, y todo el flujo escurrió en superficie desde ese punto (Chilevisión, 2026; Interferencia, 2026).
- H2** El canal colapsó o rebasó en la calle Francisco Bulnes Correa, donde el cauce entubado la cruza al inicio de la calle Quebrada Honda (Interferencia, 2026; BioBioChile, 2026b; Wikipedia, 2026).
- H3** El aporte se distribuyó en varios puntos donde los cauces de la precordillera llegan a la urbanización: el cauce principal (H1), un cauce sur que cruza el campus de la Universidad de los Andes (S1) y quebradas menores que terminan en la Av. La Plaza Sur (S2). El hidrograma se reparte en proporción al área de cada cuenca.

Hipótesis de proceso (HP). Un modelo bidimensional de aguas someras con reología de mezcla homogénea, alimentado con un volumen compatible con la lluvia observada, reproduce la extensión informada: las calles con presencia de barro y el alcance hasta la Av. Padre Hurtado.

Objetivo general. Estimar el recorrido del aluvión y los indicadores hidrodinámicos en calles y edificios, y caracterizar su incertidumbre a partir del conjunto de simulaciones aceptables.

Objetivos específicos.

1. Construir un terreno urbano con edificios y calles a partir de datos abiertos.
2. Implementar y verificar la reología de la mezcla en un modelo bidimensional de código abierto.
3. Acotar el volumen de mezcla de forma independiente, con lluvia y modelos empíricos.
4. Calibrar el caudal, el volumen y la reología mediante la evidencia pública y comparar la compatibilidad de las hipótesis H1, H2 y H3 con las observaciones.
5. Cuantificar la incertidumbre y publicar los resultados de forma reproducible.

Correspondencia entre hipótesis, objetivos, métodos y resultados. El cuadro 1 vincula cada hipótesis y cada objetivo con el procedimiento que lo aborda y con el resultado que se informará.

4. Metodología

4.1. Evidencia y registro probatorio

Toda consulta a fuentes externas se archivó en un registro probatorio: fecha y hora UTC, origen, dato extraído, captura de la página y huella SHA-256. Así queda constancia de qué información existía al momento de modelar y permite contrastar después la predicción con observaciones posteriores. Las observaciones se clasificaron según su naturaleza física, como se recomendó en la revisión técnica (véase la declaración final sobre el uso de herramientas de IA):

Cuadro 1: Correspondencia entre hipótesis, objetivos, métodos y resultados previstos.

Hipótesis u objetivo	Método correspondiente	Resultado previsto
H1, H2 y H3, evaluadas por separado	Fuentes de entrada y criterios de calibración (§4.3, §4.6)	Simulaciones aceptadas y métricas por hipótesis (§5.4)
HP	Modelo y criterios de reproducción de la extensión (§4.3, §4.6)	Compatibilidad con las observaciones (§5.4)
Objetivo específico 1	Construcción del terreno urbano (§4.2)	Caracterización del dominio, edificios y calles (§5.1)
Objetivo específico 2	Implementación y verificación (§4.3, §4.4)	Resultados de parada, reinicio, convergencia y balance (§5.2)
Objetivo específico 3	Estimación independiente del volumen (§4.5)	Distribuciones de volumen (§5.3)
Objetivo específico 4	Calibración inversa (§4.6)	Parámetros aceptables y comparación H1–H3 (§5.4)
Objetivo específico 5	Síntesis de incertidumbre y publicación (§4.7)	Mapas, resúmenes del conjunto y materiales reproducibles (§5.5)
Objetivo general	Extracción de indicadores por calle y edificio (§4.7)	Recorrido e indicadores con incertidumbre explícita (§5.5)

- **Presencia confirmada:** calles por donde la prensa informa que «bajó» el flujo: Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda (La Tercera, 2026); además Av. La Plaza, donde hay registros de arrastre de vehículos.
- **Cierres municipales:** Mons. Álvaro del Portillo y Av. San Carlos de Apoquindo (El Dínamo, 2026). Pueden obedecer a prevención o limpieza.
- **Perímetro operativo municipal:** El Alba por el norte, La Plaza por el oriente, Quebrada Honda por el sur y Padre Hurtado por el poniente (La Tercera, 2026). Puede incluir zonas secas.
- **Alcance:** hasta el sector del Pueblito Los Dominicos y la Av. Padre Hurtado (La Tercera, 2026).
- **Sitios con presencia confirmada por varias fuentes:** la urgencia de la Clínica UC Christus San Carlos de Apoquindo, con cerca de 1 m de barro (Cadena 3, 2026); la Clínica Universidad de los Andes, en sus accesos y exterior según la propia clínica (Radio La Señal, 2026); la sede Duoc UC (BioBioChile, 2026a); y el campus de la Universidad de los Andes, cuya comunidad quedó retenida (Cooperativa, 2026). El Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (Senapred) incluye la Av. La Plaza Sur entre las zonas afectadas (El Dínamo, 2026).
- **Evidencia de baja confiabilidad, usada solo para formular hipótesis:** una imagen difundida en redes sociales que marca varios focos de alimentación del flujo, coherentes con los cauces cartografiados.

La lluvia proviene de la estación automática 330019 (Eulogio Sánchez, Tobalaba) de la Dirección Meteorológica de Chile (2026): 34,8 mm el 8 de octubre, 13,8 mm entre las 15:00 y las 21:00 hora local, y 49,2 mm entre el 6 y el 7 de octubre. La prensa informa entre 16 y 20 mm en alrededor de una hora.

4.2. Terreno, edificios y calles

El terreno sin edificios ni vegetación, es decir, el modelo digital del terreno (DTM), es FABDEM V1-2 (Hawker et al., 2022; Neal y Hawker, 2023), con resolución de 1 segundo de arco (unos 30 m), remuestreado de forma bilineal a una retícula regular de 4 m en el sistema UTM, huso 19 sur (datum WGS 84). El remuestreo aumenta la densidad de puntos, pero no mejora la resolución efectiva del modelo de elevación. Esta limitación debe considerarse al interpretar los resultados. Se incorporaron 1 107 plantas de edificios de OpenStreetMap (OSM; Colaboradores de OpenStreetMap, 2026) como bloques elevados. La altura de cada bloque es la media de DSM – DTM, donde el modelo digital de superficie (DSM) es Copernicus GLO-30 (European Space Agency, s. f.) y el DTM es FABDEM, cuando la planta mide al menos 900 m² y la diferencia supera 2,5 m. Si no se cumple, la altura es el número de pisos de OSM multiplicado por 3 m; sin ese dato, se asumen 6 m. Para cada bloque se reportan la media y el percentil 95 de DSM – DTM. Se excluyeron cuatro polígonos de OSM etiquetados como edificio que corresponden a recintos (complejos deportivos y un centro comercial con DSM – DTM medio inferior a 4 m), porque como bloques sólidos habrían desviado artificialmente el flujo. Las calles se rebajaron 0,15 m, la altura del cordón, con un ancho según su categoría.

4.3. Modelo de propagación

Se usa ANUGA, versión 4.0.1 (Roberts et al., 2026): volúmenes finitos sobre una malla triangular no estructurada, con el esquema DE1 (Runge–Kutta de segundo orden). Para una mezcla homogénea de densidad constante, ANUGA resuelve la evolución del caudal unitario $\mathbf{q} = h\mathbf{u}$ mediante las ecuaciones de conservación de la masa (1) y de la cantidad de movimiento (2):

$$\partial_t h + \nabla \cdot \mathbf{q} = S_h, \quad (1)$$

$$\partial_t \mathbf{q} + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \mathbf{I} \right) = -g h \nabla z - \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho_m} + S_h \mathbf{u}_{\text{in}}, \quad (2)$$

donde h es el espesor del flujo (m); $\mathbf{u}$, la velocidad media en profundidad (m s^{-1}); $\mathbf{q} = h\mathbf{u}$, el caudal por unidad de ancho ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); z , la elevación del lecho (m); g , la aceleración de gravedad (m s^{-2}); S_h , la tasa de aporte de espesor (m s^{-1}); $\mathbf{u}_{\text{in}}$, la velocidad del aporte (m s^{-1}); $\boldsymbol{\tau}_b$, el esfuerzo de corte basal (Pa); ρ_m , la densidad de la mezcla (kg m^{-3}); y $\mathbf{I}$, el tensor identidad. Al dividir por ρ_m , constante, no aparece ningún factor de densidad en la presión ni en la gravedad. La resistencia basal es $\boldsymbol{\tau}_b/\rho_m = g h S_f \mathbf{u}/U$, con $U = |\mathbf{u}|$ y la pendiente de fricción S_f dada por

$$S_f = \frac{\tau_y}{\rho_m g h} + \frac{K \eta U}{8 \rho_m g h^2} + \frac{n_{\text{td}}^2 U^2}{h^{4/3}}, \quad (3)$$

donde τ_y es el esfuerzo de fluencia (Pa); η , la viscosidad dinámica de la mezcla (Pa s); K , el parámetro adimensional de resistencia laminar; y n_{td} , el coeficiente de Manning equivalente para la turbulencia y la dispersión ($\text{s m}^{-1/3}$). El esfuerzo de fluencia y la viscosidad se obtienen de las relaciones reológicas

$$\tau_y = 0,1 \alpha_2 e^{\beta_2 C_{v,f}}, \quad \eta = 0,1 \alpha_1 e^{\beta_1 C_{v,f}}, \quad (4)$$

donde $C_{v,f}$ es la concentración volumétrica de la matriz fina; la densidad ρ_m usa, en cambio, la concentración total $C_{v,\text{tot}}$ (§2). En las simulaciones del barrido se adopta $C_{v,\text{tot}} = C_{v,f}$. Los coeficientes $(\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2)$ provienen de la tabla 13 de FLO-2D Software, Inc. (2021), donde α_1 se expresa en poises y α_2 en dyn cm^{-2} ; β_1 y β_2 son adimensionales. El factor 0,1 de (4) convierte ambas magnitudes al SI, de modo que τ_y resulta en Pa y η en Pa s. La muestra Glenwood 2 aparece con tres variantes en distintas versiones de la documentación y se trató como sensibilidad. K y n_{td} cambian según la superficie: en calles pavimentadas $K = 100$ y $n_{\text{td}} = 0,025$; en el resto, $K = 400$ y $n_{\text{td}} = 0,050$.

La resistencia (3) se aplica como paso fraccionado y se resuelve de forma implícita en cada celda. Con $a = \tau_y/(\rho_m h)$, $b = K\eta/(8\rho_m h^2)$, $c = g n_{\text{td}}^2/h^{4/3}$ y $r = (U^* - \Delta t a)_+$, se obtiene

$$U^{n+1} = \frac{2r}{1 + b\Delta t + \sqrt{(1 + b\Delta t)^2 + 4c\Delta t r}}, \quad (5)$$

donde el asterisco indica el estado anterior al paso de resistencia; el superíndice $n+1$, el estado posterior a ese paso; Δt es el paso temporal y $(x)_+ = \max(x, 0)$. La solución (5) cumple $0 \leq U^{n+1} \leq U^*$, conserva la dirección, disipa energía y no modifica h . Si $|\mathbf{q}^*| \leq \Delta t \tau_y/\rho_m$, la celda se detiene y puede reactivarse en pasos posteriores. La fricción de Manning propia de ANUGA se anula para no duplicar la resistencia.

La mezcla entra mediante un hidrograma triangular de caudal pico Q_p , volumen de mezcla V_m y tiempo al pico de 600 s, con base $T_B = 2V_m/Q_p$. Cada fuente agrega en un círculo de 14 m de radio el incremento de espesor Δh correspondiente al volumen aportado por el hidrograma durante el paso, junto con su momento: $h^+ = h^- + \Delta h$ y $\mathbf{q}^+ = \mathbf{q}^- + \Delta h \mathbf{u}_{\text{in}}$, donde los superíndices $-$ y $+$ indican los estados anterior y posterior al aporte, y $\mathbf{u}_{\text{in}}$ se orienta según el eje del cauce. Cuando $Q = 0$ no hay forzamiento. En H3, cada fuente recibe la fracción del hidrograma correspondiente al área de su cuenca. La malla tiene unos $4,3 \times 10^5$ triángulos: 40 m^2 en el corredor entre los cauces y Padre Hurtado (lado equivalente de unos 10 m) y 600 m^2 fuera de él. La aceleración de gravedad es $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ en todo el modelo. Las simulaciones duran $T_B + 1\,200$ s y en cada una se registra el balance de volumen.

4.4. Verificación numérica

Parada. Sobre un plano de pendiente $S_0 = 0,05$, con $\tau_y = 100$ Pa y $\rho_m = 1\,700 \text{ kg m}^{-3}$, la teoría de un fluido de Bingham integrado en la profundidad predice un espesor de reposo $h_c = \tau_y/(\rho_m g S_0) = 0,1199$ m. Se libera un bloque de mezcla y se compara el espesor simulado del depósito con el espesor teórico de reposo; se verifica además que el momento se anule.

Reinicio. A partir del depósito detenido se agrega mezcla aguas arriba y se verifica que el depósito se reactive, vuelva a detenerse y conserve el volumen.

Convergencia temporal. El ensayo de parada se repite con números de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) de 1; 0,5; 0,25; 0,1 y 0,05 con el esquema DE1, y con el esquema DE0 como comparación; se compara el alcance final del frente y se estima el orden de convergencia respecto del límite extrapolado.

Balance de volumen. En cada simulación se compara el volumen acumulado aportado por el hidrograma con el volumen presente en la malla.

Los resultados de estas pruebas se presentan en §5.2.

4.5. Volumen previo independiente

Las cuencas se delimitaron con direcciones de flujo calculadas por el método de ocho direcciones (D8) sobre FABDEM reproyectado al sistema UTM, huso 19 sur (datum WGS 84), con celdas de 30 m. Una delimitación preliminar en coordenadas geográficas subestimaba el área. La salida de cada cuenca es la celda de máxima acumulación a menos de 120 m del punto donde el cauce cartografiado entra a la urbanización. Resultan H1 con 8,04 km² y un relieve de 1 376 m, S1 con 1,90 km² y S2 con 0,17 km²: en total, 10,1 km² aportantes.

Se usaron dos estimaciones independientes, que no se combinan en una sola distribución:

- **Balance lluvia–escorrentía con agua y sólidos diferenciados:** $V_w = f_w PAC$ y $V_m = V_w / (1 - C_{v,tot})$, donde V_w es el volumen de agua incorporado al pulso; P , la precipitación acumulada; A , el área de la cuenca; C , el coeficiente de escorrentía; f_w , la fracción de escorrentía incorporada al pulso; y V_m , el volumen de mezcla. Los rangos son: precipitación del pulso del evento P entre 12 mm y 35 mm, $C \in [0,3; 0,8]$, $f_w \in [0,5; 1]$ y $C_{v,tot} \in [0,30; 0,50]$.
- **Modelo empírico para cuencas quemadas** (Gartner et al., 2014), aplicado por subcuenca e incluyendo su error residual $\varepsilon \sim N(0; 1,04^2)$. Ese modelo predice el volumen de depósito V_{dep} , que se convierte a volumen de mezcla con $V_m = (1 - \phi)V_{dep}/C_{v,tot}$, donde ϕ es la porosidad del depósito. Su aplicabilidad fuera del sur de California es una hipótesis.

Las distribuciones se resumen mediante la mediana y los percentiles 5 y 95, y el caudal pico correspondiente se estima con la relación de Mizuyama et al. (1992). La calibración recorre volúmenes de 80 000 m³ a 300 000 m³. Los resultados se presentan en §5.3.

4.6. Calibración inversa e incertidumbre

La calibración sigue el enfoque de simulaciones de comportamiento aceptable (Beven y Binley, 1992). Los criterios se fijaron antes de examinar los resultados:

1. fracción R de puntos sobre calles con presencia confirmada en que $h_{max} > h^*$, con $R \geq 0,6$;
2. fracción R_{sit} de los cuatro sitios con presencia confirmada que el flujo alcanza dentro de 40 m, con $R_{sit} \geq 3/4$;
3. llegada a menos de 200 m del cruce de General Blanche con Padre Hurtado;
4. fracción F_{per} del área afectada que cae dentro del perímetro municipal ampliado en 100 m, con $F_{per} \geq 0,5$.

El umbral es $h^* = 5$ cm, con sensibilidad para 2 cm y 10 cm. Cada simulación aceptable recibe un peso informal $L = R R_{sit} F_{per}$. Las calles cerradas por el municipio se usan solo como contexto, porque un cierre puede ser preventivo. El índice de Jaccard respecto del perímetro se informa como dato descriptivo, ya que el perímetro es operativo y no una huella cartografiada.

El barrido recorre las hipótesis H1, H2 y H3; volúmenes de mezcla de 80 000 m³, 150 000 m³ y 300 000 m³; caudales pico de 100 m³ s⁻¹ y 250 m³ s⁻¹; y tres muestras reológicas (Glenwood 1, Glenwood 2b y Aspen 2). El cribado usa CFL 1; las simulaciones aceptables se repetirán con CFL 0,25 y malla fina para acotar el error numérico del alcance.

4.7. Síntesis del conjunto e indicadores por calle y edificio

La síntesis del conjunto especificará los estadísticos utilizados, el tratamiento de los pesos y el procedimiento de extracción de indicadores por calle y edificio. Estos procedimientos deben quedar definidos antes de presentar sus resultados.

Pendiente: estadísticos de la síntesis del conjunto, tratamiento de los pesos L y procedimiento de extracción de la profundidad, la velocidad y la presión por calle y edificio.

5. Resultados

Sección en desarrollo: se completará al terminar la calibración (versión preliminar). Las subsecciones siguen la correspondencia del cuadro 1.

5.1. Terreno urbano

Pendiente: caracterización del dominio, los edificios y las calles.

5.2. Verificación numérica

Parada. El depósito simulado tiene un espesor medio de 0,120 m y momento nulo, frente al espesor teórico de reposo $h_c = 0,1199$ m (§4.4).

Reinicio. Al agregar mezcla aguas arriba, el depósito se reactiva, avanza 70 m y vuelve a detenerse, conservando el volumen.

Convergencia temporal. El alcance del frente disminuye al reducir el número de Courant: 455, 387, 352, 331 y 324 m para CFL de 1; 0,5; 0,25; 0,1 y 0,05 (figura 1a). La convergencia es aproximadamente de primer orden, consistente con un paso fraccionado de primer orden. Con CFL 1, el alcance tiene un error de +44 % respecto del límite extrapolado; por ello, las simulaciones finales se repetirán con un CFL bajo. El esquema DE0 no responde al CFL y deja depósitos más delgados que la teoría, por lo que se descartó.

Balance de volumen. En todas las simulaciones del barrido, el volumen en la malla coincide con el volumen aportado (diferencia menor a 0,01 %; figura 1b).

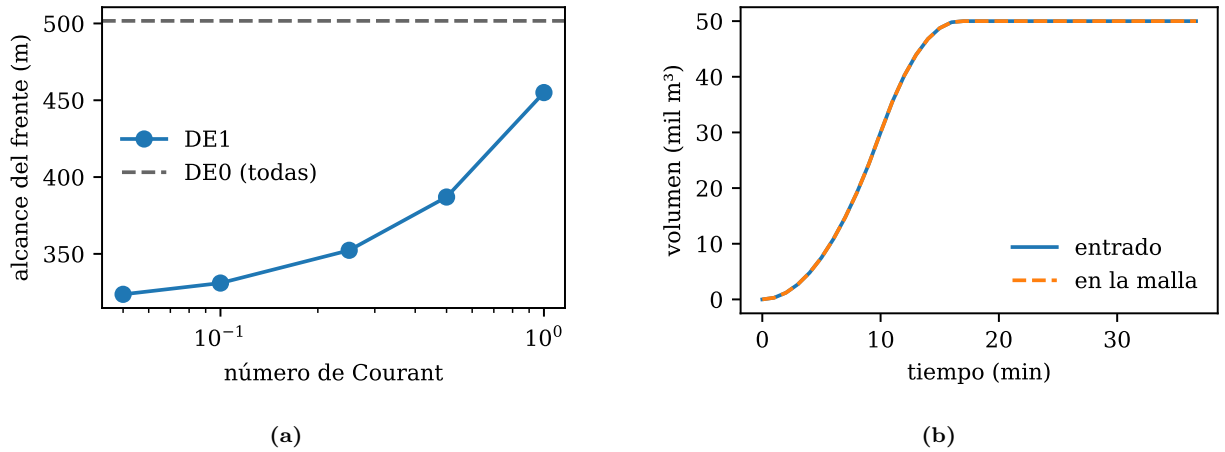


Figura 1: Verificación numérica. (a) Alcance final del frente en función del número de Courant para los esquemas DE1 y DE0 de ANUGA, en el ensayo de parada sobre plano inclinado descrito en §4.4; la línea discontinua indica el alcance obtenido con DE0, común a todos los números de Courant ensayados. (b) Evolución del volumen acumulado aportado y del volumen presente en la malla para la simulación de referencia (*pendiente: identificador y parámetros de la simulación*).

5.3. Estimación independiente del volumen

Con el balance lluvia–escorrentía, la mediana del volumen de mezcla es de 151 000 m³, con percentiles 5 y 95 de 67 000 m³ y 310 000 m³. Con el modelo empírico para cuencas quemadas (Gartner et al., 2014), la mediana es de 374 000 m³, con percentiles 5 y 95 de 61 000 m³ y $2,3 \times 10^6$ m³. Para 151 000 m³, la relación de Mizuyama et al. (1992) da $Q_p \approx 230$ m³ s⁻¹. Estas distribuciones resultan de supuestos documentados; no son mediciones.

5.4. Calibración y compatibilidad de las hipótesis

Pendiente: simulaciones aceptadas y métricas por hipótesis (H1, H2 y H3, por separado); parámetros aceptables y comparación H1–H3; compatibilidad de la hipótesis de proceso (HP) con las observaciones.

5.5. Recorrido e indicadores por calle y edificio

Pendiente: mapas y resúmenes del conjunto de simulaciones aceptables; recorrido e indicadores por calle y edificio con su incertidumbre; materiales reproducibles.

6. Discusión

Sección en desarrollo: se completará al terminar la calibración (versión preliminar).

7. Conclusiones

Sección en desarrollo: se completará al terminar la calibración (versión preliminar).

Disponibilidad de datos y código

Los programas (`prep.py`, `sim.py`, `calibrar.py`, `verif_parada.py`, `cuenca.py`, `volumen_previo.py`), el registro probatorio de consultas con sus huellas SHA-256 y los resultados están disponibles en <https://aluvion.hirely.cl/datos.html>. Los informes de las revisiones técnicas se publican íntegros en el mismo sitio.

Declaración de uso de herramientas de IA

Se emplearon herramientas de inteligencia artificial como apoyo a la revisión técnica y editorial. Se completaron dos rondas de revisión de la física y la matemática (A1 y A2) y una ronda de revisión de formato (F1), realizadas con el modelo de lenguaje gpt-6-astra (Codex). Los informes disponibles y las modificaciones realizadas se documentan junto al manuscrito. La responsabilidad del contenido corresponde al autor.

Referencias

- K. Beven y A. Binley. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3):279–298, 1992. doi: 10.1002/hyp.3360060305.
- BioBioChile. Videos evidencian daños en sede Duoc UC y U. Los Andes por fuerte aluvión en San Carlos de Apoquindo. BioBioChile, 2026a. URL <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2026/10/08/videos-evidencian-danos-en-sede-duoc-uc-por-fuerte-aluvion-en-san-carlos-de-apoquindo.shtml>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- BioBioChile. El posible origen del brutal aluvión que golpeó Las Condes: apuntan a incendio que debilitó quebrada. BioBioChile, 2026b. URL <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2026/10/08/apuntan-a-incendio-que-debilito-quebrada-como-el-posible-origen-d-el-devastador-aluvion-en-las-condes.shtml>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- Cadena 3. La clínica San Carlos de Apoquindo, colapsada con un metro de barro en el sector de urgencias. Cadena 3, 2026. URL https://www.cadena3.com/noticia/informados-al-regreso/la-clinica-san-carlos-de-apoquindo-colapsada-con-un-metro-de-barro-en-el-sector-de-urgencias_601888. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- Chilevisión. Aluvión en Las Condes: Sernageomin advirtió de los puntos críticos en febrero de este año. Chilevisión Noticias, 2026. URL <https://www.chilevision.cl/noticias/nacional/aluvion-en-las-condes-sernageomin-advirtio-de-los-puntos-criticos-en-febrero-de-este-ano/>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- Colaboradores de OpenStreetMap. Extracto de OpenStreetMap para Chile (`chile-latest.osm.pbf`). Distribuido por Geofabrik, 2026. URL <https://download.geofabrik.de/south-america/chile-latest.osm.pbf>. Archivo fechado el 2 de mayo de 2026; huella SHA-256 7bfd720d...12f3db. Datos bajo licencia ODbL.

- Cooperativa. Comunidad de U. Los Andes se mantendrá en el campus: «No sabemos hasta qué hora». Cooperativa.cl, 2026. URL <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/desastres-naturales/inundaciones/comunidad-de-u-los-andes-se-mantendra-en-el-campus-no-sabemos-hasta/2026-10-08/202449.html>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- Dirección Meteorológica de Chile. Servicios Climáticos: estación meteorológica automática 330019, Eulogio Sánchez (Tobalaba), 2026. Datos del 6 al 9 de octubre de 2026, consultados el 9 de octubre de 2026 a las 09:22 hora local; copia archivada en el registro probatorio (dmc_tobalaba_330019_20261008.html).
- El Dínamo. Qué calles están bloqueadas y por cuáles se puede transitar tras el aluvión en Las Condes. El Dínamo, 2026. URL <https://www.eldinamo.cl/pais/2026/10/09/que-calles-estan-bloqueadas-y-por-cuales-se-puede-transitar-tras-el-aluvion-en-las-condes>. Publicado el 9 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- European Space Agency. Copernicus DEM GLO-30: modelo digital de superficie global de 1 segundo de arco. Copia pública en Amazon Web Services ([copernicus-dem-30m](https://copernicus-dem-30m.s3.amazonaws.com/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM.tif)), s. f. URL https://copernicus-dem-30m.s3.amazonaws.com/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM/Copernicus_DSM_COG_10_S34_00_W071_00_DEM.tif. Tesela S34 W071, descargada el 9 de octubre de 2026.
- FLO-2D Software, Inc. *FLO-2D Pro Reference Manual*. FLO-2D Software, Inc., 2021. URL https://documentation.flo-2d.com/Build21/flo-2d_pro/FLO-2D%20Pro%20Reference%20Manual%202021/index.html.
- J. E. Gartner, S. H. Cannon y P. M. Santi. Empirical models for predicting volumes of sediment deposited by debris flows and sediment-laden floods in the transverse ranges of southern California. *Engineering Geology*, 176:45–56, 2014. doi: 10.1016/j.enggeo.2014.04.008.
- L. Hawker, P. Uhe, L. Paulo, J. Sosa, J. Savage, C. Sampson y J. Neal. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2):024016, 2022. doi: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
- Interferencia. Aluvión en Las Condes: advertencias de Sernageomin, obras pendientes y una alerta que no pidió evacuar. Interferencia, 2026. URL <https://interferencia.cl/articulos/aluvion-en-las-condes-advertencias-de-sernageomin-obras-pendientes-y-una-alerta-que-no>. Publicado el 9 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- La Tercera. Desde San Carlos de Apoquindo hasta Pueblito Los Dominicos: informan zona más afectada por aluvión en Las Condes. La Tercera, 2026. URL <https://www.latercera.com/nacional/noticia/desde-san-carlos-de-apoquindo-hasta-pueblito-los-dominicos-informan-zona-mas-afectada-por-a-luvion-en-las-condes/>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- T. Mizuyama, S. Kobashi y G. Ou. Prediction of debris flow peak discharge. En *Proceedings of the International Symposium Interpraevent*, vol. 4, pp. 99–108, Bern, Switzerland, 1992. URL <https://www.interpraevent.at/en/proceeding/schutz-des-lebensraumes-vor-hochwasser-mu-ren-und-lawinen-1992>.
- Municipalidad de Las Condes. Incendio en San Carlos de Apoquindo ya está controlado. Sitio web de la Municipalidad de Las Condes, 2026. URL <https://www.lascondes.cl/incendio-en-san-carlos-de-a-poquindo-ya-esta-controlado/>. Publicado el 2 de enero de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- J. Neal y L. Hawker. FABDEM V1-2. Conjunto de datos, University of Bristol, 2023. doi: 10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn.
- J. S. O'Brien y P. Y. Julien. Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8):877–887, 1988. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877).
- J. S. O'Brien, P. Y. Julien y W. T. Fullerton. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(2):244–261, 1993. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244).
- Radio La Señal. Clínica UAndes: «Toda la afectación fue en el exterior, no hubo inundaciones dentro». Radio La Señal, 2026. URL <https://radiolasenal.cl/clinica-uandes-toda-la-afectacion-fue-en-el-exterior-no-hubo-inundaciones-dentro/>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.
- S. Roberts, O. Nielsen, D. Gray, J. Sexton y G. Davies. ANUGA: a hydrodynamic modelling package. Versión 4.0.1, paquete de Python publicado en PyPI el 17 de septiembre de 2026, 2026. URL <https://pypi.org/project/anuga/4.0.1/>. Código fuente en https://github.com/anuga-community/anuga_core.

J. E. Schubert y B. F. Sanders. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41:49–64, 2012. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.02.012.

The Clinic. Aluvión afecta a Las Condes en medio de intenso sistema frontal: fuerte corriente arrastró autos por San Carlos de Apoquindo. The Clinic, 2026. URL <https://www.theclinic.cl/2026/10/08/aluvion-afecta-a-las-condes-en-medio-de-intenso-sistema-frontal/>. Publicado el 8 de octubre de 2026; consultado el 9 de octubre de 2026.

Wikipedia. Aluvión de Las Condes de 2026. Wikipedia, la enciclopedia libre, 2026. URL https://es.wikipedia.org/wiki/Aluvi%C3%B3n_de_Las_Condes_de_2026. Versión consultada el 9 de octubre de 2026.