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 11 de octubre de 2026

Resumen

El 8 de octubre de 2026, un flujo de barro descendió desde la quebrada de San Carlos de Apoquindo (Las Condes, Santiago) sobre una ladera quemada nueve meses antes. Se reconstruyó con un modelo bidimensional de aguas someras con reología de barro, sobre un relieve de 30 m remuestreado a una grilla de 4 m con 42.018 edificios, usando solo datos públicos y un registro probatorio de cada fuente consultada. Tras unos 144 mm acumulados y con la isoterma de 0 °C informada por sobre la cumbre de la cuenca (10,1 km^2), una estimación independiente que adopta la saturación del suelo informada sitúa el volumen de mezcla en unos 295 000 m^3, el mismo orden que exige el alcance simulado. La hipótesis más compatible con lo observado —cauce principal, brazos sur y lluvia sobre la ladera— reproduce los corredores de Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda que delimitan la zona afectada oficial, el alcance hasta Padre Hurtado y cerca de 1 m de barro en la Clínica UC Christus, con un índice exploratorio de compatibilidad de 72/100, que compara hipótesis y no mide precisión predictiva. Una prueba con observaciones reservadas, definida antes de mirar resultados, resultó desfavorable: la hipótesis alcanza 19 de 49 equipamientos afectados oficiales (39 %, frente al 70 % fijado), porque el modelo deja sin barro partes de la zona oficial. En ensayos posteriores, que son de ajuste, permitir que el barro entre a las casas y distinguir el agua turbia del campus y de La Plaza Sur del barro de la rama principal eleva el índice verificado con paso fino a 76–82/100; con la lluvia medida, la hipótesis integrada obtiene 79/100. En escenarios hipotéticos, la inundación de Quebrada Honda se reproduce si el colector de Francisco Bulnes Correa no absorbe el flujo calculado en su embocadura, de unos 65 m^3/s; bajo esos supuestos, una capacidad de 30 m^3/s resulta insuficiente. Estos valores no describen la obra real. El barro simulado se extiende más allá de la zona oficial, para lo que se consideran como posibles explicaciones la retención en las casas y la carga gruesa, y la entrada al Aula Magna de la Universidad de los Andes no se reproduce. Los resultados son preliminares.

Declaración de alcance. Estudio técnico independiente, sin carácter oficial, basado exclusivamente en información pública. Se distinguen tres tipos de resultados: *observados* (lo informado por autoridades, prensa y cartografía oficial), *calculados* (salidas del modelo bajo supuestos explícitos, como volúmenes y caudales) y *escenarios hipotéticos* (variantes ensayadas, como capacidades del colector). Ningún valor calculado o hipotético es una medición ni una conclusión oficial; todos requieren validación científica independiente. El estudio no evalúa obras reales cuya capacidad y estado no son públicos, ni atribuye responsabilidades.

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, 2026a). La cuenca había sido afectada por un incendio de unas 1 000 ha entre diciembre de 2025 y enero de 2026 (BioBioChile, 2026a; Municipalidad de Las Condes, 2026), y el evento siguió a un comienzo de octubre excepcionalmente lluvioso: más de 90 mm en Quinta Normal en lo que iba del mes, cerca del máximo histórico de octubre de 1930 (Rondanelli y cols., 2026).

*Estudio independiente. Contenido bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0. Condiciones de uso: https://aluvion.hirely.cl/terminos.html.

Al día siguiente, entre las fuentes públicas consultadas no se había localizado 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 $C_{v,\mathrm{tot}}$. Con $C_{v,\mathrm{tot}}$ 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 $\rho_m = \rho_w + C_{v,\mathrm{tot}}(\rho_s - \rho_w)$, donde ρ_m, ρ_w y ρ_s son las densidades de la mezcla, el agua y los sólidos, respectivamente ($\mathrm{kg\,m^{-3}}$); ρ_m se sitúa entre $1\,300\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ y $1\,900\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$. En las relaciones reológicas interviene, en cambio, la concentración de la matriz fina $C_{v,\mathrm{f}}$ (sección 4.3).

Rangos de concentración y densidad en la literatura. Las crecidas con barro y los flujos hiperconcentrados tienen entre un 20 y un 45 % de sedimento en volumen, con promedios de 20 a 35 % y picos cercanos al 45 % en los flujos de barro (FLO-2D Software, Inc., 2021; O'Brien y Julien, 1988); su densidad queda entre unos 1.330 y $1\,740\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$. Sobre un 50 % en volumen se habla de flujo de detritos (Costa, 1984; Zanuttigh y Lamberti, 2007), con concentraciones de sólidos de 50 a 80 % y densidades de 1.400 a $2\,400\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ medidas en canales experimentales y en muestras naturales (Iverson, 1997); en oleadas densas observadas en terreno se han estimado unos $2\,000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ (Zanuttigh y Lamberti, 2007). La tabla 1 sitúa en ese marco los barros ensayados en este estudio.

Cuadro 1: Concentración volumétrica de sedimento (C_v) y densidad de la mezcla según la literatura, y barros ensayados en este estudio. Las densidades de los barros ensayados se calculan con $\rho_s = 2\,650\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$; τ_y y η son la fluencia y la viscosidad de la matriz fina según O'Brien y Julien (1988).

Tipo de flujo o barro	C_v	ρ_m ($\mathrm{kg\,m^{-3}}$)
Crecida con barro y flujo hiperconcentrado (FLO-2D Software, Inc., 2021; O'Brien y Julien, 1988)	0,20–0,45	1.330–1.740
Flujo de barro, valores típicos (FLO-2D Software, Inc., 2021)	0,20–0,35 (picos de 0,45)	1.330–1.740
Umbral de flujo de detritos (Costa, 1984; Zanuttigh y Lamberti, 2007)	$\geq 0{,}50$	≥ 1.825
Flujo de detritos (Iverson, 1997)	0,50–0,80	1.400–2.400
Este estudio: Glenwood 2b ($\tau_y = 6{,}6\,\mathrm{Pa}$, $\eta = 0{,}77\,\mathrm{Pa\,s}$)	0,40	1.660
Este estudio: Glenwood 2b con $C_v = 0{,}43$ ($\tau_y \approx 11\,\mathrm{Pa}$)	0,43	1.710
Este estudio: Glenwood 1 ($\tau_y = 29\,\mathrm{Pa}$, $\eta = 8{,}8\,\mathrm{Pa\,s}$)	0,45	1.742

Elección del barro y su motivo. Tres evidencias orientan la elección. Sernageomin clasificó el evento como una crecida repentina que arrastró gran cantidad de sedimento (BioBioChile, 2026a); las imágenes del día muestran una matriz fina con piedras, troncos y vehículos arrastrados, y no frentes de bloques; y el alcance observado, hasta la Av. Padre Hurtado, exige un barro capaz de recorrer varios kilómetros por calles de baja pendiente. Esto sitúa el evento entre el extremo alto de los flujos de barro y el umbral de los flujos de detritos. El barro de referencia (Glenwood 2b, $C_v = 0{,}40$) está en ese rango; uno más espeso (Glenwood 1, $C_v = 0{,}45$) se detiene antes de Padre Hurtado, y el de referencia se extiende más allá de la zona afectada oficial. Como la fluencia crece exponencialmente con la concentración (O'Brien y Julien, 1988), un cambio pequeño —de 0,40 a 0,43— casi duplica τ_y; por eso se ensaya ese valor intermedio, que además representa la resistencia adicional de la carga gruesa (piedras, troncos y escombros) que la reología de la matriz fina no incluye.

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, Julien, y Fullerton (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).

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, Cannon, y Santi, 2014). El caudal pico se relaciona empíricamente con el volumen (Mizuyama, Kobashi, y Ou, 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 Se ensaya la hipótesis de que 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, 2026a; Interferencia, 2026).

H2 Se ensaya la hipótesis de colapso o desborde del canal en la calle Francisco Bulnes Correa, donde el cauce entubado la cruza al inicio de la calle Quebrada Honda (BioBioChile, 2026a; Interferencia, 2026).

H3 Se supone un aporte distribuido 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.

Durante el estudio se agregaron, como hipótesis *exploratorias* formuladas después de examinar los primeros resultados, H4 (salida combinada en el abanico y en la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa, más los aportes del sur) y H5 (H4 más escurrimiento directo de lluvia sobre la ladera oriente de La Plaza Sur). También se ensayaron dos representaciones del terreno (el cauce del parque lineal tallado y un terreno fotogramétrico de mayor resolución) y distintas capacidades del colector. Se informan separadas de las hipótesis iniciales.

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 2 vincula cada hipótesis y cada objetivo con el procedimiento que lo aborda y con el resultado que se informará.

Cuadro 2: 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 (secciones 4.3 y 4.6)	Simulaciones aceptadas y métricas por hipótesis (sección 6.10)
HP	Modelo y criterios de reproducción de la extensión (secciones 4.3 y 4.6)	Compatibilidad con las observaciones (sección 6.10)
Objetivo específico 1	Construcción del terreno urbano (sección 4.2)	Caracterización del dominio, edificios y calles (sección 6.7)
Objetivo específico 2	Implementación y verificación (secciones 4.3 y 4.4)	Resultados de parada, reinicio, convergencia y balance (sección 6.8)
Objetivo específico 3	Estimación independiente del volumen (sección 4.5)	Distribuciones de volumen (sección 6.9)
Objetivo específico 4	Calibración inversa (sección 4.6)	Parámetros aceptables y comparación H1–H3 (sección 6.10)
Objetivo específico 5	Síntesis de incertidumbre y publicación (sección 4.7)	Mapas, resúmenes del conjunto y materiales reproducibles (sección 6.12)
Objetivo general	Extracción de indicadores por calle y edificio (sección 4.7)	Recorrido e indicadores con incertidumbre explícita (sección 6.12)

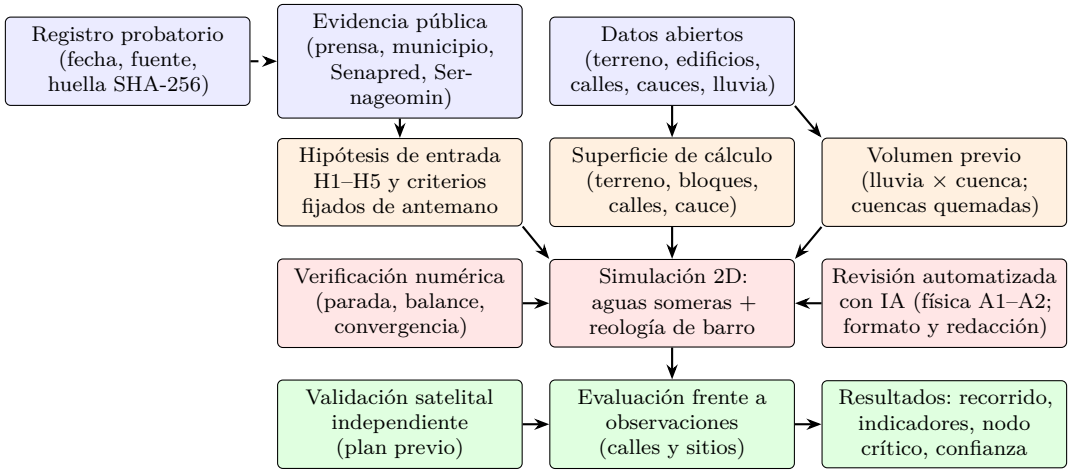

Figura 1: Flujo de trabajo del estudio. Azul: insumos; naranjo: preparación; rojo: cálculo y control; verde: evaluación y resultados. La validación satelital se definió antes de examinar las imágenes y no se usa para calibrar.

Cuadro 3: Datos de entrada de la primera generación; la versión vigente añade las huellas de edificios de Overture Maps, la red hidrográfica oficial (Geoportal de Chile), el análisis del CR2, Open-Meteo, Sentinel-2 y la zona afectada oficial de IDE Chile.

Dato	Fuente	Resolución	Uso
Terreno desnudo	FABDEM V1-2 (Neal y Hawker, 2023)	1 segundo de arco (≈30 m), remuestreado a 4 m	Cotas del suelo y cuencas
Superficie	Copernicus GLO-30 (European Space Agency, s. f.)	30 m	Altura de edificios grandes
Terreno alternativo	Fotogrametría SPOT 2014 (Hussain, 2021)	0,07 puntos/m^2 (≈8–10 m)	Prueba de sensibilidad
Edificios, calles, cauces	OpenStreetMap (Colaboradores de OpenStreetMap, 2026)	vectorial	1.103 bloques, calles, trazado del cauce
Lluvia	DMC, estación 330019 (Dirección Meteorológica de Chile, 2026)	horaria y sinóptica	Volumen previo
Observaciones	Prensa, municipio, Senapred, Sernageomin	puntual	Evaluación (no entra al modelo)

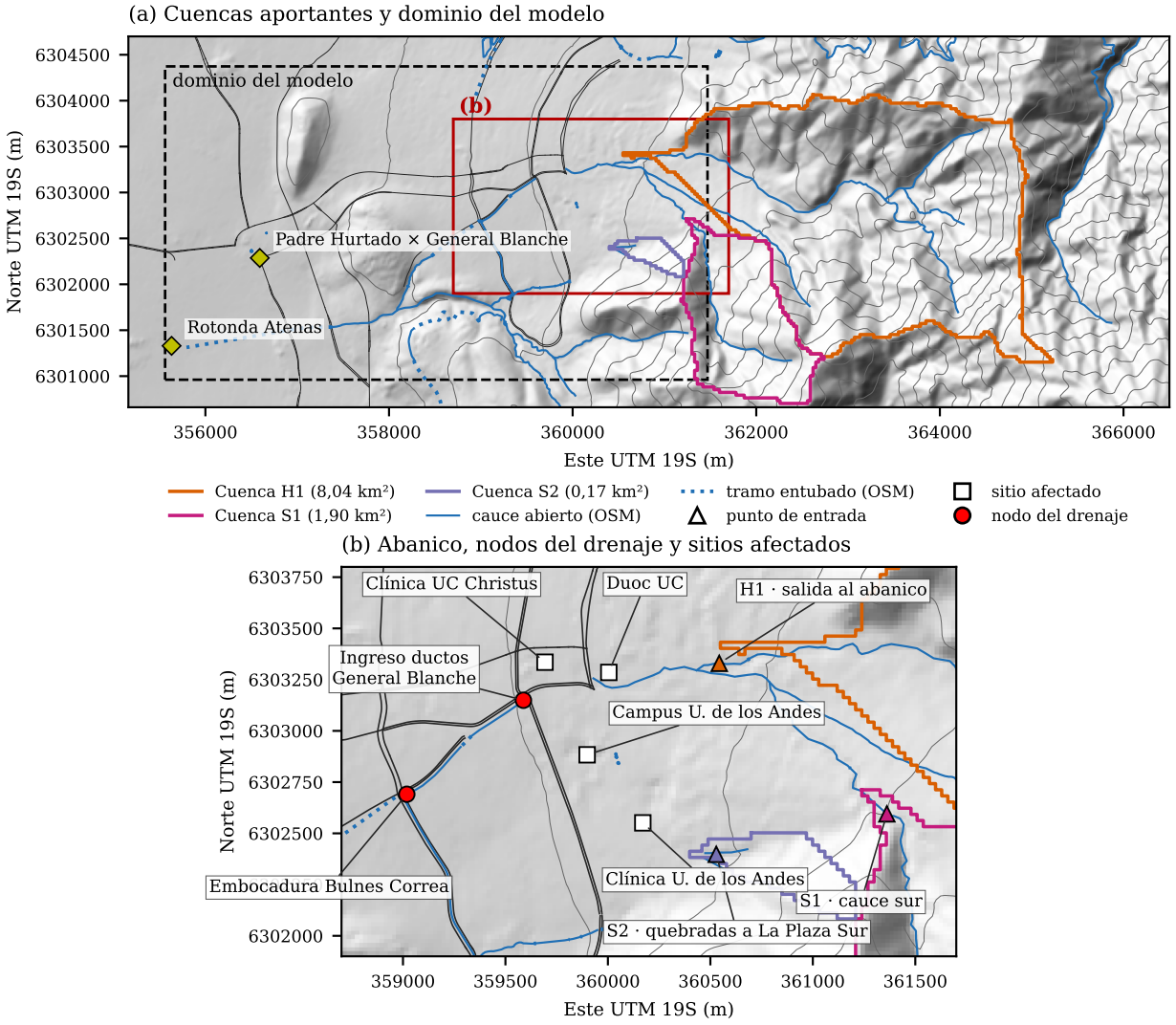

Figura 2: Área de estudio. (a) Cuencas aportantes delimitadas sobre el terreno (H1: cauce principal; S1: cauce sur; S2: quebradas menores hacia La Plaza Sur), cauces abiertos y tramos entubados según OpenStreetMap, dominio del modelo y puntos de referencia aguas abajo. (b) Acercamiento al abanico: puntos de entrada del flujo, nodos del drenaje (ingreso a los ductos de General Blanche y embocadura de Bulnes Correa) y sitios con afectación confirmada. Coordenadas UTM huso 19 sur, WGS 84.

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):

- **Presencia confirmada:** calles por donde la prensa informa que «bajó» el flujo: Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda (La Tercera, 2026b); 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, 2026b). Puede incluir zonas secas.
- **Alcance:** hasta el sector del Pueblito Los Dominicos y la Av. Padre Hurtado (La Tercera, 2026b).
- **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, 2026b); y el campus de la Universidad de los Andes, cuya comunidad quedó retenida (Cooperativa, 2026a). 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.

Antecedentes hidrometeorológicos conocidos después del cribado. La alcaldesa informó 144 mm acumulados en la zona, 20 mm de ellos el día del evento, con suelo saturado (Interferencia, 2026). El análisis del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (Rondanelli y cols., 2026) registra en la estación Río Molina 42,8 mm el 8 de octubre, 31,6 mm entre las 15:00 y las 19:00 y un máximo de 10,9 mm en 30 minutos, con la isoterma de 0 °C cerca de 2 800 m según el observatorio de Cerro Tres Puntas; el mismo análisis delimita la cuenca entre 929 y 2 355 m (unos 10,6 km^2) y estima la severidad del incendio con el índice normalizado de área quemada diferencial (dNBR) de Sentinel-2. El pronóstico histórico horario de Open-Meteo (Zippenfenig, 2023) sitúa la isoterma entre 2.700 y 2 770 m entre las 14:00 y las 17:00 del 8 de octubre, y acumula unos 150 mm sobre la cuenca entre el 2 y el 8 de octubre. Las imágenes Sentinel-2 (Drusch y cols., 2012) del 21 de septiembre no muestran nieve en la cuenca (índice normalizado de nieve menor a 0,4 en toda la parte despejada; las zonas blancas eran nubes delgadas), y las del 9 de octubre muestran 0,09 km^2 de nieve nueva, toda sobre 2 000 m. La alta cordillera sí tenía un manto abundante: Valle Nevado informó cerca de 1,2 m de nieve nueva el 6 y el 7 de octubre (Emol, 2026), por sobre los 3 000 m.

Contraste con el análisis del CR2. La tabla 4 compara los datos de cuenca y de forzamiento de este estudio con los del análisis del CR2 (Rondanelli y cols., 2026), publicado después de formular las hipótesis.

Balances posteriores. Senapred actualizó su balance a 56 viviendas destruidas, 40 con daño mayor, 1.960 con daño menor, 384 personas damnificadas y más de 1.200 rescatadas (La Tercera, 2026d).

4.2. Terreno, edificios y calles

Esta sección describe el terreno de la primera generación (1.103 edificios); la versión con la ciudad completa (42.018 huellas de Overture Maps, cauces tallados según la red hidrográfica oficial y unos 852.000 triángulos) se describe en la sección 6.1. El terreno sin edificios ni vegetación, es decir, el modelo digital del terreno (DTM), es FABDEM V1-2 (Hawker y cols., 2022; Neal y Hawker, 2023), con resolución de 1

Cuadro 4: Comparación con el análisis del CR2. La diferencia de área y de cota mínima se debe al punto de cierre: el CR2 cierra la cuenca más abajo, en el parque lineal; este estudio, donde cada cauce entra a la urbanización.

Variable	CR2	Este estudio
Cota máxima de la cuenca	2 355 m	2 355 m (FABDEM y Copernicus GLO-30)
Cota mínima	929 m	973 a 1 081 m (salidas H1, S1, S2)
Área	10,6 km^2	10,1 km^2
Isoterma de 0 °C	∼ 2 800 m (Cerro Tres Puntas)	2.700–2 770 m a las 14–17 h (Open-Meteo)
Lluvia del 8 de octubre	42,8 mm en Río Molina	mismo dato
Incendio	dNBR de Sentinel-2 (28-dic-2025 y 6-feb-2026)	no usado en el cálculo (línea de profundización)

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 m^2 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, Nielsen, Gray, Sexton, y Davies, 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):

$$\partial_t h + \nabla \cdot \mathbf{q} = S_h, \tag{1}$$

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

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 ($m^2\,s^{-1}$); 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 $\boldsymbol{\tau}_b/\rho_m = ghS_f\,\mathbf{u}/U$, con $U = |\mathbf{u}|$ y la pendiente de fricción S_f dada por

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

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 ($s\,m^{-1/3}$). El esfuerzo de fluencia y la viscosidad se obtienen de las relaciones reológicas

$$\tau_y = 0{,}1\,\alpha_2 e^{\beta_2 C_{v,\text{f}}}, \qquad \eta = 0{,}1\,\alpha_1 e^{\beta_1 C_{v,\text{f}}}, \tag{4}$$

donde $C_{v,\text{f}}$ es la concentración volumétrica de la matriz fina; la densidad ρ_m usa, en cambio, la concentración total $C_{v,\text{tot}}$ (sección 2). En las simulaciones del barrido se adopta $C_{v,\text{tot}} = C_{v,\text{f}}$. 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 $a = \tau_y/(\rho_m h)$, $b = K\eta/(8\rho_m h^2)$, $c = g n_{\mathrm{td}}^2/h^{4/3}$ y $r = (U^* - \Delta t\, a)_+$, se obtiene

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

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 $0 \le U^{n+1} \le U^*$, conserva la dirección, disipa energía y no modifica h. Si $|\mathbf{q}^*| \le \Delta t\, \tau_y/\rho_m$, 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 $\mathbf{q}^+ = \mathbf{q}^- + \Delta h\, \mathbf{u}_{\mathrm{in}}$, donde los superíndices $-$ y $+$ indican los estados anterior y posterior al aporte, y $\mathbf{u}_{\mathrm{in}}$ 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: $40\,\mathrm{m}^2$ en el corredor entre los cauces y Padre Hurtado (lado equivalente de unos 10 m) y $600\,\mathrm{m}^2$ fuera de él. La aceleración de gravedad es $g = 9{,}8\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ en todo el modelo. Las simulaciones duran $T_B + 1\,200$ s y en cada una se registra el balance de volumen.

Cuadro 5: Parámetros físicos y numéricos aplicados en las simulaciones. Los coeficientes reológicos son los de la tabla de muestras de OBrien y Julien recopilada en el manual de FLO-2D (FLO-2D Software, Inc., 2021); $\tau_y = 0{,}1\,\alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ en Pa y $\eta = 0{,}1\,\alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ en Pa s.

Muestra	α_1	β_1	α_2	β_2	τ_y (Pa) / η (Pa s) con C_v =		
					0,35	0,40	0,45
Glenwood 1	0,0028	23,00	0,0345	20,10	3,9 / 0,89	10,7 / 2,80	29,2 / 8,85
Glenwood 2a	0,0648	6,20	0,0765	16,90	2,8 / 0,06	6,6 / 0,08	15,4 / 0,11
Glenwood 2b	0,6480	6,20	0,0765	16,90	2,8 / 0,57	6,6 / 0,77	15,4 / 1,06
Glenwood 2c	0,6480	8,20	0,0765	16,90	2,8 / 1,14	6,6 / 1,72	15,4 / 2,59
Aspen 1	0,0360	22,10	0,1810	25,70	145,9 / 8,23	527,5 / 24,86	1906,8 / 75,05
Aspen 2	0,0538	14,50	2,7200	10,40	10,4 / 0,86	17,4 / 1,78	29,3 / 3,67
Mezcla y constantes							
Densidad del agua ρ_w / de los sólidos ρ_s							1 000 kg/m^3 / 2 650 kg/m^3
Densidad de la mezcla $\rho_m = \rho_w + C_v(\rho_s - \rho_w)$, C_v = 0,35/0,40/0,45							1578 / 1660 / 1742 kg/m^3
Gravedad g							9,8 m/s^2
Resistencia laminar K (calles / resto)							100 / 400
Manning turbulento-dispersivo n_{td} (calles / resto)							0,025 / 0,050 s m$^{-1/3}$
Entrada, malla y cálculo							
Volumen de mezcla V / caudal pico Q_p / tiempo al pico t_p							80–300 mil m^3 / 100–250 m^3/s / 600 s
Velocidad de entrada / radio de cada fuente							2 m/s / 14 m
Área máxima de triángulo (corredor / resto); triángulos, primera generación							40 / 600 m^2; ≈430 000
Grilla del terreno; rebaje de calles; altura supuesta de edificios							4 m; 0,15 m; 6 m
Número de Courant (cribado / lluvia / final)							1 / 0,5 / ≤0,25
Umbral de mojado para la evaluación h^*							5 cm (sensibilidad 2 y 10 cm)

4.4. Verificación numérica

Parada. Sobre un plano de pendiente $S_0 = 0{,}05$, con $\tau_y = 100\,\mathrm{Pa}$ y $\rho_m = 1\,700\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$, la teoría de un fluido de Bingham integrado en la profundidad predice un espesor de reposo $h_c = \tau_y/(\rho_m g S_0) = 0{,}1199\,\mathrm{m}$. 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.

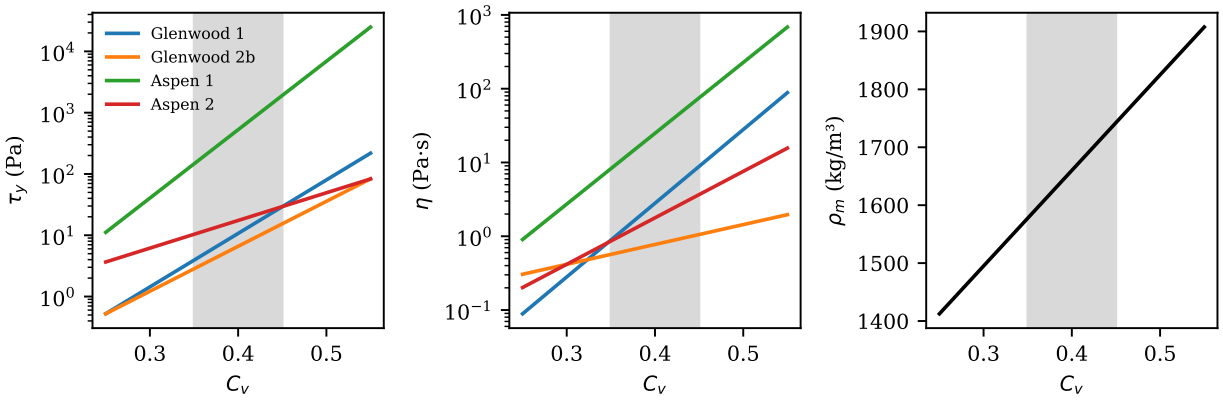

Figura 3: Propiedades de la mezcla según la concentración volumétrica de sólidos C_v para las muestras ensayadas: esfuerzo de fluencia τ_y, viscosidad η y densidad ρ_m. La franja gris indica el rango usado (0,35–0,45).

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 sección 6.8.

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 km^2 y un relieve de 1 376 m, S1 con 1,90 km^2 y S2 con 0,17 km^2: en total, 10,1 km^2 aportantes.

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

- **Balance lluvia–escorrentía con agua y sólidos diferenciados:** $V_w = f_w P A C$ y $V_m = V_w/(1 - C_{v,\mathrm{tot}})$, 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 $C_{v,\mathrm{tot}} \in [0{,}30; 0{,}50]$.
- **Modelo empírico para cuencas quemadas** (Gartner y cols., 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 $V_m = (1 - \phi) V_{\mathrm{dep}}/C_{v,\mathrm{tot}}$, 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 y cols. (1992). La calibración recorre volúmenes de 80 000 m^3 a 300 000 m^3. Los resultados se presentan en sección 6.9.

Escenario de suelo saturado. Con la información hidrometeorológica conocida después del cribado (sección 4.1) se agregó una tercera estimación, tampoco combinada con las anteriores: la relación entre la isoterma informada y la cota máxima de la cuenca (2 355 m, igual a la que informa el CR2; una versión previa del texto indicó por error 2 775 m, cifra que no se usó en ningún cálculo: la delimitación D8 y la hipsometría siempre se basaron en la cota real) sustenta el supuesto de precipitación líquida sobre toda el área aportante, y la saturación del suelo informada por la autoridad se adopta como supuesto del escenario de cálculo. Se usan $P \in [20; 40]$ mm, $C \in [0{,}6; 0{,}9]$ y $f_w \in [0{,}6; 1]$. El aporte por fusión de nieve se acota por arriba con 50 mm de equivalente en agua sobre los 0,31 km^2 de la cuenca situados sobre 2 000 m.

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 $R \geq 0{,}6$;

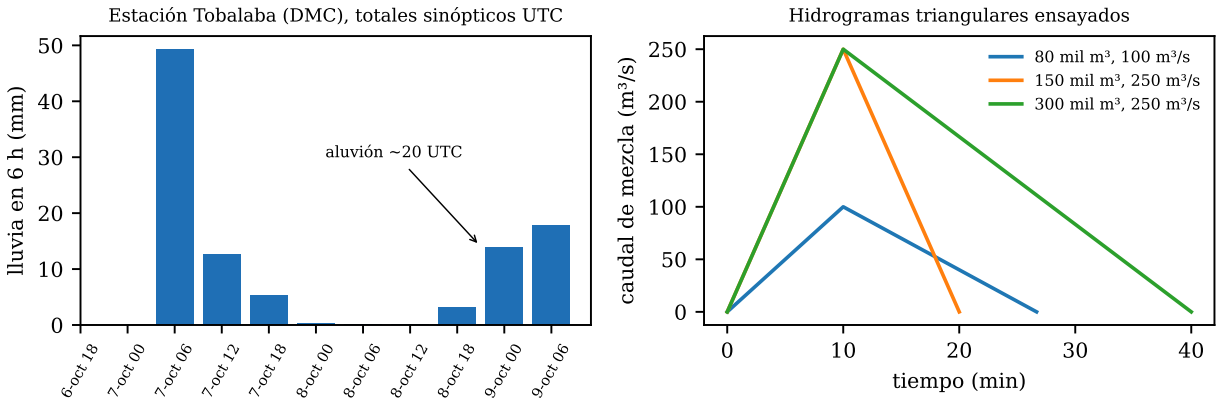

Figura 4: Forzamiento. Izquierda: lluvia acumulada cada 6 horas en la estación Tobalaba de la Dirección Meteorológica de Chile entre el 6 y el 9 de octubre de 2026 (horas UTC; el aluvión ocurrió hacia las 20 UTC del 8 de octubre). Derecha: hidrogramas triangulares de mezcla ensayados.

2. fracción R_{sit} de los cuatro sitios con presencia confirmada que el flujo alcanza dentro de 40 m, con $R_{\text{sit}} \geq 3/4$;
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 $F_{\text{per}} \geq 0{,}5$. Desde el 11 de octubre, cuando se publicó la zona afectada oficial (Ministerio de Bienes Nacionales y IDE Chile, 2026), F_{per} se calcula con ese polígono y solo sobre el barro simulado en zona urbana (a menos de 40 m de un edificio), para no contar los cerros mojados por la lluvia.

El umbral es $h^* = 5$ cm, con sensibilidad para 2 cm y 10 cm. Cada simulación aceptable recibe un peso informal $L = R\,R_{\text{sit}}\,F_{\text{per}}$. 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 m^3, 150 000 m^3 y 300 000 m^3; caudales pico de 100 m^3 s^{-1} y 250 m^3 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

Tres niveles de evaluación. Se distinguen: (i) los *criterios de aceptación originales*, fijados antes de simular con un umbral para cada uno (sección 4.6); con el terreno anterior ninguna simulación los cumplía todos, y con la ciudad completa la mejor cumple tres de cuatro (falla el de perímetro); (ii) el *índice exploratorio de compatibilidad*, definido después, que resume los mismos cuatro criterios en una escala continua para comparar hipótesis; y (iii) la *validación independiente*, aún pendiente, que exige datos no usados para formular las hipótesis, como imágenes satelitales posteriores al evento, levantamientos oficiales de depósitos o marcas de nivel.

Índice exploratorio de compatibilidad. Para comparar hipótesis se resume cada simulación en un *índice exploratorio de compatibilidad* (IEC) con lo observado, en una escala de 0 a 100: el promedio de cuatro componentes, cada uno entre 0 y 1, derivados de los criterios originales fijados antes de simular (sección 4.6); el índice se definió después y la referencia de perímetro se actualizó con el polígono oficial. Son la fracción de puntos de las calles con barro observado que el modelo moja (R); la fracción de los cuatro recintos con afectación confirmada alcanzados (R_{sit}); el alcance, igual a 1 si el barro llega a menos de 200 m de Padre Hurtado y decreciente en forma lineal hasta 0 a 1 200 m; y F_{per}. El IEC no es una probabilidad ni una medida de precisión predictiva: resume qué tan bien una simulación reproduce un conjunto de observaciones cualitativas, y diferencias de dos o tres puntos no deben interpretarse como evidencia concluyente de superioridad entre hipótesis. Las profundidades, velocidades y presiones por calle y edificio se extraen como el máximo en un radio de 40 m de cada punto de interés.

5. Datos de entrada y funcionamiento del modelo: guía para aplicarlo a otras cuencas

Esta sección describe el método en términos generales, sin referencia a productos ni programas concretos, para que pueda aplicarse a otras cuencas con los datos que cada caso tenga disponibles. Se indica qué representa cada dato, la calidad mínima recomendable, cómo entra en el cálculo y cómo afecta al resultado cuando es incierto.

Cómo funciona el modelo

El modelo resuelve, en cada instante y en cada celda de una malla que cubre la ciudad, cuánto barro hay (espesor) y hacia dónde y a qué velocidad se mueve. Lo hace con tres principios:

1. **Conservación de la masa:** el barro que entra a una celda y no sale se acumula como espesor. No se crea ni se pierde barro; el balance se verifica en cada simulación.
2. **Conservación del momento:** el barro acelera pendiente abajo por la gravedad, según la inclinación de la superficie libre y no solo la del suelo, y lo frenan la resistencia del propio material y el roce con la superficie. Por eso puede subir sobre una solera si llega con velocidad, rodear un edificio o embalsarse detrás de un obstáculo.
3. **Comportamiento del material:** a diferencia del agua, una mezcla densa de agua y sedimento tiene un *umbral de fluencia*: si el empuje de la gravedad sobre una capa no lo supera, la capa se detiene. Por eso el barro deja depósitos de cierto espesor en lugar de escurrir hasta la cota más baja. Sobre ese umbral, la mezcla se comporta como un fluido muy viscoso y turbulento.

La simulación avanza en pasos de tiempo cortos, de fracciones de segundo, limitados por la velocidad del flujo y el tamaño de las celdas. En cada paso se calculan primero el transporte y la gravedad, y después el frenado del material, que puede detener una celda o reactivarla si llega más barro desde aguas arriba. Durante la simulación se registran, para cada celda, el espesor máximo, la velocidad máxima, el empuje dinámico sobre obstáculos y el instante de llegada del frente.

Datos de entrada

Dato	Qué representa y cómo se usa	Calidad recomendable	Efecto si es incierto
Relieve del terreno desnudo	Cotas del suelo sin edificios ni árboles; define pendientes y hacia dónde escurre el flujo.	Preferentemente 1 m a 5 m de resolución; 30 m solo reproduce la dirección general.	Es el dato más influyente: un cauce o una calle que el relieve no resuelve cambia el recorrido.
Huellas y alturas de edificios	Obstáculos que el flujo rodea; se elevan sobre el terreno.	Huellas completas; altura por levantamiento o número de pisos.	Desvía el flujo localmente; poca influencia en el recorrido general si las huellas representan adecuadamente la geometría de los edificios.
Calles y soleras	Corredores preferentes; se rebajan unos centímetros respecto de las veredas.	Eje y ancho de cada calle; cota de solera si existe.	Determina qué calles actúan como canales.
Cauces abiertos y tramos entubados	Dónde la quebrada va por superficie y dónde bajo tierra; los puntos de transición son candidatos a desborde.	Trazado, sección y capacidad de cada tramo.	Si falta un cauce abierto, el modelo lo sustituye por la pendiente general; si falta un ducto, no se puede evaluar su desborde.
Cuenca aportante	Área y relieve que drenan a cada punto de entrada a la ciudad; se obtienen del relieve.	Relieve de la cuenca alta; 30 m suele bastar.	Escala el volumen esperado en proporción al área.
Lluvia	Cantidad e intensidad del episodio y de los días previos (humedad del suelo).	Estación cercana con registro horario o subhorario; ojalá en la cuenca alta.	Con la cuenca, acota el volumen; la intensidad de corta duración controla el caudal pico.
Estado de la cuenca	Superficie quemada, cobertura vegetal, suelo.	Cartografía de severidad del incendio.	Aumenta la escorrentía y la carga de sedimento.
Volumen e hidrograma	Cuánta mezcla entra, con qué caudal máximo y en cuánto tiempo.	Estimados a partir de lluvia y cuenca, de relaciones empíricas o de depósitos medidos tras el evento.	Controla el alcance y las profundidades; se acota mediante calibración.
Propiedades del material	Densidad, umbral de fluencia y viscosidad de la mezcla, según la concentración de sólidos.	Ensayos de muestras del depósito; si no los hay, rangos de la literatura.	Controla cuándo y dónde se detiene el flujo.
Observaciones del evento	Calles y edificios afectados, alcance, profundidades, horas.	Puntos georreferenciados con fuente y hora; marcas de nivel.	No alimentan el modelo: permiten descartar hipótesis y calibrar.

Procedimiento para otra cuenca

1. **Delimitar el área urbana expuesta** y los puntos donde los cauces entran a la ciudad o cambian de abiertos a entubados. Esos puntos son las entradas posibles del flujo.
2. **Construir la superficie de cálculo:** relieve desnudo, edificios elevados, calles rebajadas y, si es posible, cauces abiertos con su sección real.
3. **Estimar un rango de volumen** con al menos dos vías independientes (lluvia por cuenca por coeficiente de escorrentía, y relaciones empíricas para cuencas similares), sin combinarlas en una sola cifra.
4. **Formular hipótesis de entrada** (por qué puntos sale el flujo a la superficie y en qué proporción) y fijar *antes* de simular los criterios con que se juzgará cada una frente a las observaciones.
5. **Simular cada combinación** de hipótesis, volumen, caudal y material; verificar en cada simulación el balance de masa y la estabilidad numérica.
6. **Comparar con las observaciones**, conservar las combinaciones compatibles y reportar el conjunto como un rango de escenarios y no como una única respuesta.
7. **Repetir las simulaciones compatibles con mayor resolución temporal y espacial**, para estimar el error numérico de alcances y tiempos.

Qué mejora más el resultado

En este caso de estudio, el orden de influencia de las incertidumbres fue: el relieve (resolución y representación de cauces y calles), las propiedades del material, el volumen y la forma del hidrograma, y las alturas de los edificios. Un levantamiento de alta resolución del sector urbano y del cauce, y muestras del depósito, son las dos mejoras de mayor rendimiento. Para fines preventivos, sin un evento que calibrar, el método se aplica igual, pero con escenarios de volumen y material elegidos según la cuenca y reportando las envolventes de afectación en lugar de un recorrido único.

6. Resultados

Resultados preliminares (11 de octubre de 2026). Las secciones 6.1 a 6.6 usan el terreno con la ciudad completa; la sección 6.10 conserva el cribado inicial con el terreno anterior, como referencia del proceso.

6.1. Simulaciones con la ciudad completa

La versión del terreno utilizada para los resultados urbanos incorpora las 42.018 huellas de edificios de Overture Maps sobre FABDEM a 4 m, amplía el dominio hasta Paul Harris, el Hospital Dipreca y la rotonda Atenas, y talla tres cauces que el modelo de elevación de 30 m no resuelve: el parque lineal hasta la embocadura de Francisco Bulnes Correa, Quebrada Honda aguas abajo de la embocadura según la red hidrográfica oficial y el brazo sur hasta la parte alta de la Av. Monseñor Álvaro del Portillo. La malla tiene unos 852.000 triángulos. La tabla 6 resume las simulaciones; el anexo A contiene el catálogo completo y una ficha con lámina por simulación clave.

Cuadro 6: Simulaciones con la ciudad completa (42.018 edificios). Calles: fracción de puntos de las calles con barro observado que el modelo moja ($h > 5$ cm); Sitios: fracción de los cuatro recintos con afectación confirmada alcanzados; dPH: distancia mínima del barro al cruce de General Blanche con Padre Hurtado; Perím.: fracción del barro simulado en zona urbana que cae dentro de la zona afectada oficial (IDE Chile); QH: fracción de Quebrada Honda con barro; UCC: espesor máximo junto a la Clínica UC Christus (se informó cerca de 1 m); IEC: índice exploratorio de compatibilidad, promedio de los cuatro criterios (calles, sitios, alcance y perímetro) en escala de 0 a 100; no es precisión predictiva. Barro: G2b, Glenwood 2b ($C_v = 0{,}40$); G1, Glenwood 1 ($C_v = 0{,}45$); A2, Aspen 2.

Corrida	Escenario	V (mil m^3)	Barro	Calles	Sitios	dPH (m)	Perím.	QH	UCC (m)	IEC
z02	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h, paso 4× más fino	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,13	72
v02	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h en ladera	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,13	72
v19	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h + brazo sur oficial hasta Álvaro del Portillo (terreno v6)	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,11	71
v14	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h + quebrada Álvaro del Portillo	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,15	71
v01	cauce principal	300	G2b	0,77	0,50	96	0,46	0,68	1,16	68
z01	cauce principal; control numérico (paso 4× más fino)	300	G2b	0,77	0,50	96	0,46	0,68	1,16	68
v15	cauce principal; Quebrada Honda tallada aguas abajo (terreno v5)	300	G2b	0,77	0,50	96	0,45	0,68	1,18	68
v03	cauce principal; colector 30 m^3/s	300	G2b	0,77	0,50	96	0,50	0,64	1,16	69
v17	cauce principal; colector 30 m^3/s, captura 25 m, Quebrada Honda tallada	300	G2b	0,76	0,50	96	0,50	0,62	1,18	69
v05	cauce principal; colector 100 m^3/s	300	G2b	0,74	0,50	96	0,53	0,44	1,16	69
v10	cauce principal; colector 100 m^3/s, captura 25 m	300	G2b	0,69	0,50	96	0,52	0,00	1,16	68
v18	cauce principal; colector 100 m^3/s, captura 25 m, Quebrada Honda tallada	300	G2b	0,69	0,50	96	0,52	0,00	1,18	68
v07	cauce principal	150	G2b	0,72	0,50	348	0,62	0,68	1,09	67
v08	cauce principal	300	G1	0,74	0,50	396	0,63	0,69	1,16	67
v09	cauce principal	300	A2	0,77	0,50	151	0,52	0,68	1,14	70
v21	cauce + brazos sur; brazo sur oficial (terreno v6), sin lluvia	300	G2b	0,77	0,50	131	0,45	0,68	1,11	68

Cuatro resultados destacan:

1. **La ciudad encauza el barro.** Con todos los edificios, el espesor calculado en el entorno de la Clínica UC Christus sube de 0,3 a 1,1 m–1,2 m, del orden del metro que la fuente consultada informó en su urgencia (un máximo próximo al recinto no representa necesariamente su interior), y junto a Duoc UC llega a 1,9 m. El barro corre más profundo por las calles y cubre menos superficie: unas 54 ha dentro de la zona oficial, frente a 93 ha con el terreno anterior.

2. **Volumen.** Con 150 000 m^3 el frente se detiene a 348 m de Padre Hurtado; con 300 000 m^3 llega a menos de 100 m. Ese volumen coincide con la estimación independiente con suelo saturado (sección 6.9).

3. **Hipótesis seleccionada.** El cauce principal más los brazos sur y la lluvia de 35 mm/h sobre la ladera (z02, v02) obtiene un IEC de 72/100 (calles 0,77; recintos 0,75; alcance 1,00; zona oficial 0,34): reproduce presencia de flujo en el 77 % de los puntos de control de las calles consideradas, tres de los cuatro recintos —incluida la Clínica Universidad de los Andes, con 0,14 m— y el alcance, pero solo un tercio de su barro urbano cae dentro de la zona oficial. Sin la lluvia en la ladera (v21) se pierde la Clínica Universidad de los Andes y el IEC baja a 68/100.

4. **Robustez.** z02 repite v02 con un paso de tiempo cuatro veces menor y da los mismos indicadores; z01 hace lo mismo con el cauce principal solo. El barro muy fluido (Aspen 2) obtiene 70/100; el espeso (Glenwood 1) se detiene a 396 m de Padre Hurtado. El IEC de v20 con paso de tiempo normal (78/100) depende de 10 cm en un solo punto del campus y no se repite con paso fino (v19), por lo que no se considera.

6.2. Capacidad del colector de Francisco Bulnes Correa: escenarios hipotéticos

Esta sección es un análisis de escenarios hipotéticos. La capacidad, la sección y el estado reales del colector no son públicos; los valores siguientes no evalúan la obra ni constituyen una conclusión oficial, y requieren validación con información de diseño e inspección. *Resultado calculado:* con la ciudad completa y la hipótesis de volumen adoptada, el caudal de mezcla que llega a la embocadura alcanza unos 65 m^3/s, cuatro veces más que con el terreno anterior. *Escenarios hipotéticos:* Si el colector capta toda la sección del cauce (radio de captura de 25 a 40 m), uno de 100 o 200 m^3/s retira unos 93 000 m^3 con un pico de 62 a 66 m^3/s y Quebrada Honda queda seca (v10, v11, v18). Uno de 30 m^3/s se satura, retira 67 600 m^3 y Quebrada Honda se moja en el 62 % de sus puntos (v17). En estos escenarios, la capacidad que habría evitado el desborde queda entre 30 y unos 65 m^3/s; ese intervalo depende del volumen, del hidrograma y de la reología supuestos. *Por qué cambió respecto de la primera generación.* Con 1.103 edificios el barro se repartía en superficie y a la embocadura llegaban 12 800 m^3 con un pico de 16,5 m^3/s, que un colector de 30 m^3/s habría absorbido. Con las 42.018 huellas, las calles concentran el flujo, aumentan la velocidad y entregan a la embocadura unos 93 000 m^3 con un pico cercano a 65 m^3/s. Ambos resultados son calculados y dependen de la representación urbana; la versión con la ciudad completa es la vigente. Un radio de captura de 12 m dejaba pasar el flujo por el costado del sumidero y producía un 44 % de Quebrada Honda con barro aun con 100 m^3/s; era un artefacto de representación, corregido al captar toda la sección. La cartografía hidrográfica oficial representa la continuidad del cauce desde la embocadura por Quebrada Honda hacia el Hospital Dipreca; en las simulaciones, el flujo que no ingresa al colector continúa por ese trazado.

6.3. Contraste con la zona afectada oficial

El visor de emergencia del Ministerio de Bienes Nacionales, desarrollado por IDE Chile, publica la zona afectada (288,5 ha), 2.266 predios y 368 tramos de calles afectadas (Ministerio de Bienes Nacionales y IDE Chile, 2026). La zona es la franja entre dos corredores: Camino El Alba y General Blanche por el norte, y Quebrada Honda por el sur, con una prolongación por El Alba al poniente de Padre Hurtado (figura 5). El barro simulado corre por esos dos bordes, pero deja seco el interior de la franja y se extiende fuera de ella en tres sectores: los cerros y quebradas mojados por la lluvia en la ladera, la trama al poniente de Padre Hurtado (8 a 20 ha) y Quebrada Honda aguas abajo hacia Dipreca (14 a 26 ha), con espesores de 0,3 a 0,4 m. Como los predios publicados son el universo del perímetro y no predios con barro verificado (el 91 % está dentro de la zona), la fracción de predios tocados por el barro simulado (717 de 2.266, 32 % en z02) sirve para comparar simulaciones, no como tasa de acierto. Con este polígono, el criterio de perímetro baja y el IEC de la mejor hipótesis pasa de 74/100 (perímetro de prensa) a 72/100.

6.4. Ronda del 11 de octubre y prueba con observaciones reservadas

Ensayos sobre la extensión y el doble conteo. Cada ensayo cambió un factor de la hipótesis principal:

- **Barro algo más concentrado** (v25, $C_v = 0{,}43$): no reduce el barro fuera de la zona oficial (fracción dentro de la zona: 0,346, frente a 0,344 en z02).
- **Mayor rugosidad fuera de las calles** (v27; $K = 800$ y $n = 0{,}08$): es el único que la reduce algo (0,388).
- **Lluvia aplicada solo fuera de las cuencas aportantes** (v28): elimina el doble conteo sin cambiar los indicadores. La afectación junto a la Clínica U. de los Andes se mantiene (0,15 m).
- **Reología por zona** (v29; $C_v = 0{,}27$ en el faldeo): no cambia los componentes del índice.

En los cuatro, el componente «sitios» llega a 1,00 solo porque el punto de control del campus supera 5 cm con el paso de tiempo normal (0,06–0,15 m); con paso fino, ese punto queda en 0,01 m (v19, z02). Según una regla registrada antes de elegir el candidato (protocolo de validación, enmienda 1), ese componente se calcula sin el punto del campus. Así, los índices de 78–79 quedan en 72–73. Todas las configuraciones empatan dentro de tres puntos, y se selecciona z02, verificada con paso fino.

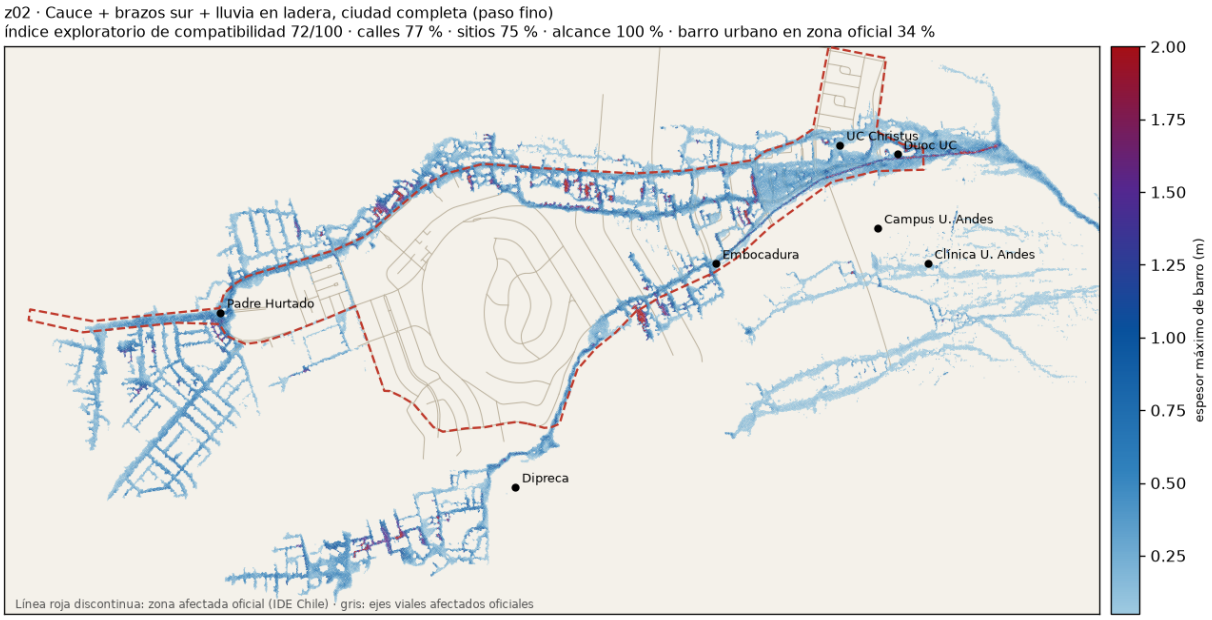

Figura 5: Simulación z02 (cauce principal, brazos sur y lluvia en la ladera, paso de tiempo fino) sobre la zona afectada oficial de IDE Chile (línea roja discontinua) y los ejes viales afectados (gris). Colores: espesor máximo simulado.

Microsimulaciones del campus. Se ensayaron desbordes de 20 y 40 m^3/s en la parte alta de Álvaro del Portillo, con barros de C_v 0,25 a 0,40 y triángulos de 8 m^2 (m20, mk20, ml20, ml40). En todos, el flujo baja por la avenida y sale del dominio sin alcanzar la Biblioteca. El punto de desborde queda fuera de la cuenca local de la Biblioteca, a unos 220 m de su límite, de modo que con este relieve ese flujo drena hacia otro lado. Siguen abiertas dos explicaciones: la escorrentía generada dentro de esa cuenca local (en curso) y un camino de entrada que el terreno de 30 m no resuelve. Con los datos disponibles no se pueden distinguir.

Prueba con observaciones reservadas. El procedimiento fue:

- **Reserva y métrica previas.** Antes de cruzarla con el modelo, se reservaron los 49 equipamientos afectados de la capa oficial que no coinciden con recintos de ajuste. Se fijó la métrica: fracción de puntos con barro simulado de más de 5 cm a 15 m o menos. El criterio favorable era al menos 0,70 y superar a las referencias v01 (solo cauce principal) y e03 (solo desborde en la embocadura).
- **Ejecución única.** La prueba se ejecutó una sola vez sobre el candidato congelado.
- **Resultados.** z02 alcanza 19 de 49 puntos (0,39), v01 los mismos 19 y e03 ninguno.

El resultado es desfavorable. Se informa sin modificar el modelo. En un diagnóstico posterior, que no cambia el veredicto:

- la distancia mediana a la celda con barro más cercana es de 32 m;
- 16 puntos quedan a más de 100 m;
- z02 moja cerca del 20 % del área de la zona oficial y el 32 % de sus predios afectados.

Es decir, además de extenderse fuera de la zona oficial, la reconstrucción deja sin barro partes importantes de ella. Parte de los puntos no alcanzados son instalaciones de servicio cuya afectación pudo tener otras causas. La prueba es solo parcialmente independiente, porque los puntos están en la zona usada por el índice.

6.5. Ensayos posteriores a la prueba reservada

Los ensayos de esta sección terminaron después de congelar el candidato y ejecutar la prueba reservada (sección 6.4). Sus resultados son de ajuste y no modifican el veredicto de esa prueba. Cualquier nueva selección requerirá observaciones reservadas nuevas.

Casas porosas. En v26 los edificios de la zona oficial dejan entrar el barro y lo retienen: piso a la cota del terreno más 0,3 m, con alta resistencia. Con eso:

- el barro urbano dentro de la zona oficial sube de 0,34 a 0,54;
- el modelo moja el 36 % del área oficial (20 % en z02) y el 40 % de sus predios afectados;
- se cumplen los cuatro criterios originales.

La repetición con paso fino (z26) confirma un IEC de 76/100, y con la mitad de la resistencia (v30) el resultado casi no cambia. El costo es que, al retener barro en los lotes, el espesor junto a la urgencia de la Clínica UC Christus baja a 0,30 m, frente a cerca de 1 m informado.

Faldeo más líquido. Con la reología por zona ($C_v = 0{,}27$ en el faldeo), el punto de control del campus se moja también con paso fino (0,09 m en z29), a diferencia de z02 (0,01 m). El IEC verificado es 78/100.

Cuadratura de la concentración. Se usaron cinco nodos de Gauss para $C_v = 0{,}20 + 0{,}30X$, $X \sim \text{Beta}(3, 2)$, sobre la configuración sin doble conteo. Los valores, condicionados a esa distribución de creencia y sin ser probabilidades de inundación, son:

- área esperada con más de 5 cm: 169 ha (144,5 ha mojadas en todos los nodos y 192,3 ha en alguno);
- espesor máximo esperado promediado: 0,38 m, con una desviación entre nodos de 0,027 m;
- IEC entre 71 y 73 en todo el rango.

La concentración mueve sobre todo los bordes de la extensión, no los espesores.

Campus y Av. La Plaza Sur. El autor aportó cinco tipos de información:

- un video publicado por Meganoticias a las 18:16 del 8 de octubre (Meganoticias, 2026), con agua turbia que baja del bosque y llena un patio hundido junto a un edificio del campus (unos 15–35 cm según las bancas);
- la ubicación de ese patio y del claro por donde entra el agua;
- imágenes de Street View que muestran La Plaza Sur con dos calzadas a distinto nivel (~1,5 m);
- 81 puntos con cota de Google Earth (diferencia con el modelo: $+1{,}1 \pm 1{,}8$ m);
- los trazados de un camino de tierra recto que baja del cerro a La Plaza Sur y de una entrada secundaria a un estacionamiento.

Con microsimulaciones (triángulos de 8 m^2, lluvia de 35 mm/h durante una hora y agua turbia, $C_v = 0{,}10$) se obtuvo lo siguiente:

- el desborde de Álvaro del Portillo no llega al patio con ningún fluido: el punto de desborde queda fuera de su cuenca local;
- la lluvia local sobre el terreno sin modificar deja 0,15 m en el patio. Un lomo de 0,3 m del relieve, menor que su precisión vertical, desvía el agua del claro a otro punto bajo;
- al tallar el paso del claro al patio, el patio llega a 0,17–0,30 m, dentro del rango del video;
- al tallar la calzada baja de La Plaza Sur, la avenida tiene más de 5 cm en el 81–87 % de sus puntos, frente al 12–20 % sin tallar. Es compatible con que Senapred la nombrara entre las calles más afectadas;
- el camino del cerro agrega agua donde llega a la avenida.

La hipótesis resultante es que el agua del campus fue escorrentía turbia de la ladera y del cerro: caminos de tierra, un *bike park* con pistas desnudas y la superficie quemada. La avenida la encauzó hacia el norte y entró a la universidad por el claro. Es un proceso distinto del barro espeso de la rama principal. Los tallados son representaciones gruesas basadas en observaciones aportadas, no mediciones.

Hipótesis integrada. v32 reúne lo anterior a escala de ciudad:

- casas porosas;
- faldeo con $C_v = 0{,}10$ y resto con $C_v = 0{,}40$;
- camino, La Plaza Sur y entradas a la universidad tallados;
- lluvia de 35 mm/h sobre todo el faldeo, fuera de las cuencas aportantes.

Resultados de v32:

- IEC bruto de 82/100: calles 0,77; sitios 1,00; alcance 1,00; zona oficial 0,51. Cumple los cuatro criterios originales;
- el punto del campus llega a 0,61 m;
- La Plaza Sur tiene más de 5 cm en el 46 % de sus puntos;
- el agua llega por el claro al patio (0,07 m) y al estacionamiento (0,05 m). Es menos que en las microsimulaciones, porque la lluvia de la ciudad excluye las cuencas aportantes, que incluyen parte del cerro.

La repetición con paso fino (z32) mantiene el IEC en 82/100 y el campus en 0,61 m: el resultado queda verificado. Está condicionado, además, a una lluvia de 35 mm/h durante una hora, que supera la intensidad medida (máximo de ~22 mm/h en 30 minutos en Río Molina).

Sensibilidad a la lluvia. La lluvia de 35 mm/h durante una hora supera la medida: el CR2 registró en Río Molina unos 32 mm entre las 15 y las 19 h, con un máximo de 10,9 mm en 30 minutos. Con la lluvia medida (v33: 8 mm/h durante 4 h):

- el IEC de la hipótesis integrada baja a 79/100 y la zona oficial a 0,41: la lluvia larga moja más superficie fina fuera de ella;
- el campus sigue mojado (0,48 m);
- en La Plaza Sur y el patio la señal se debilita, aunque la malla de ciudad la subestima.

A escala de detalle, con 15, 25 y 35 mm/h, el mecanismo La Plaza Sur → claro → patio aparece en los tres casos: el patio queda en 0,12–0,17 m y La Plaza Sur se moja en el 41–87 %. No depende de excluir las cuencas aportantes ni del aporte de las quebradas cortas del sur. Por eso los resultados de ajuste se informan como rango según la lluvia: IEC de 79 a 82.

Un primer intento (v31), que inyectaba el cauce principal aguas arriba de una franja densa de árboles señalada por el autor, se descartó: el punto de inyección no estaba en el fondo de la quebrada y el flujo se escapó hacia el norte.

6.6. Campus de la Universidad de los Andes

El vicerrector de la universidad ubicó el desborde en la quebrada del costado norte del campus, que colinda con General Blanche, por donde bajó la masa de barro (Cooperativa, 2026b), y Carabineros ubicó la zona cero en Álvaro del Portillo con Av. La Plaza (La Tercera, 2026c); un video difundido en redes muestra barro en el Aula Magna (Quinta Conectado, 2026). Con el brazo sur por el cauce oficial (v19), el barro llega a la parte alta de Álvaro del Portillo (0,49 m donde termina el cauce y 0,13 m en la avenida) y baja por ella hacia La Plaza y General Blanche, en concordancia con ambos relatos. No cruza, en cambio, el bosque que separa la avenida de la biblioteca, aunque el terreno desciende de 936,5 a 927,4 m hacia una depresión junto al edificio. Se ensayan tres mecanismos, sin modificar las simulaciones principales: (i) *aporte de quebradas secundarias*: la biblioteca tiene una cuenca local propia de 11,3 ha, ajena a las cuencas aportantes, de la que solo el 57 % recibe lluvia en las simulaciones principales; (ii) *escorrentía más líquida en el faldeo*: las imágenes del campus no muestran piedras ni escombros urbanos, lo que sugiere un flujo más diluido que en la rama principal; y (iii) *redistribución local* por taludes, senderos y accesos. Para ello se usan microsimulaciones locales de unos 800 × 720 m con triángulos de 8 m^2, con desbordes de 10 a 40 m^3/s en la parte alta de Álvaro del Portillo, barros de C_v 0,25, 0,30 y 0,40, y lluvia sobre toda la cuenca local; y una simulación de la ciudad completa (v29) con reología por zona: $C_v = 0{,}27$ en el faldeo y $C_v = 0{,}43$ en el resto, más la lluvia aplicada solo fuera de las cuencas aportantes. La reología por zona es un paso intermedio: asigna un barro distinto según la ubicación, pero no representa la evolución de la concentración durante el recorrido.

6.7. Terreno anterior

El dominio cubre 5,9 km por 3,4 km con una grilla de 4 m. Contiene 1.103 edificios representados como bloques, con altura media de 6,2 m y máxima de 39 m: 82 alturas obtenidas de la diferencia entre superficie y terreno, 26 de los pisos registrados y 995 supuestas en 6 m. Se excluyeron cuatro polígonos que corresponden a recintos (complejos deportivos y un centro comercial) y no a volúmenes construidos. En el terreno base, el cauce abierto del parque lineal entre el abanico y Francisco Bulnes Correa queda prácticamente plano (relieve transversal de ±0,5 m). En el terreno fotogramétrico del año 2014 (Hussain, 2021), con resolución efectiva de 8 a 10 m, el cauce aparece como una depresión de 1 a 4,5 m respecto de sus márgenes. Ese terreno presenta un desfase vertical de 26,7 m (diferencia entre referencias elipsoidal y geoidal) y depresiones espurias, que se corrigieron antes de usarlo.

6.8. Verificación numérica

Equilibrio del depósito. Al detenerse sobre un plano de pendiente 0,05, el depósito satisface el criterio de fluencia: el residuo local $r = \rho_m g h|\nabla(z+h)|/\tau_y$ tiene mediana y percentil 95 iguales a 1,00, sin celdas con $r > 1{,}05$. El espesor teórico de reposo es $h_c = 0{,}1200$ m con $g = 9{,}8\,\mathrm{m\,s^{-2}}$.

Reinicio. Al agregar mezcla aguas arriba, el frente avanza 26 m más que en el control sin aporte. El control, sin embargo, también avanza 19 m en 900 s, y la deriva del frente detenido es de 6,7 m en los últimos 300 s. Ese deslizamiento residual proviene del paso fraccionado y disminuye al reducir el paso de tiempo.

Convergencia. Con CFL 0,25, el alcance converge al refinar la malla: 354 m, 345,7 m y 341,2 m para celdas de 4, 2 y 1 m, con un valor extrapolado de unos 337 m. Con celdas de 2 m, el alcance disminuye al reducir el número de Courant: 431 m, 374 m, 346 m y 328 m para CFL 1; 0,5; 0,25 y 0,1. Es una convergencia de primer orden, con un sesgo de +30 % para CFL 1.

Convergencia en el dominio urbano. En el terreno con las 42.018 huellas de edificios, la simulación de 300 000 m³ por el cauce principal se repitió con CFL 0,25. Respecto de CFL 1, la diferencia de espesor máximo tiene mediana de 2 mm y percentil 95 de 9 mm; el 99 % de las celdas coincide en mojado o seco; la llegada del frente difiere en menos de 20 s, y la distancia mínima a Padre Hurtado es la misma (96 m). En la ciudad, el frente se detiene por la geometría de calles y edificios y no por el deslizamiento residual del ensayo en plano, la comparación temporal urbana realizada no muestra un sesgo de esa magnitud en los indicadores examinados.

Doble conteo de la lluvia en la ladera. La lluvia sobre la ladera se aplica en un polígono de 1,048 km² y aporta 36 680 m³ además de los hidrogramas. El 74 % de ese polígono está fuera de las cuencas aportantes, cuya escorrentía ya entra por los hidrogramas; el 26 % restante se superpone con parte de S1 (0,096 km²) y con toda S2 (0,172 km²), lo que cuenta dos veces unos 9 400 m³, el 2,8 % del volumen total, concentrados en el entorno de la Clínica Universidad de los Andes. La simulación v28 repite la hipótesis principal aplicando la lluvia solo fuera de las cuencas (27 290 m³) para cuantificar su efecto.

Balance de volumen. En todas las simulaciones del dominio urbano, el volumen en la malla coincide con el aportado, menos el retirado por el colector y el que sale por los bordes, con un residuo menor a 0,01 %. Una versión anterior del borde de salida generaba masa espuria al llegar el frente al límite sur, con un aumento de hasta un 20 %; esas simulaciones se descartaron y se repitieron con un borde de solo salida.

6.9. Estimación independiente del volumen

La cuenca aportante tiene 10,1 km²: el cauce principal (8,04 km², relieve de 1 376 m), el cauce sur (1,90 km²) y las quebradas menores (0,17 km²). 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 para cuencas quemadas (Gartner y cols., 2014), la mediana es de 374 000 m³, con percentiles de 61 000 m³ y $2{,}3 \times 10^6$ m³. Con 151 000 m³, la relación de Mizuyama y cols. (1992) da $Q_p \approx 230\,\mathrm{m^3/s}$.

Con el escenario de suelo saturado, la mediana sube a 295 000 m³, con percentiles 5 y 95 de 181 000 m³ y 468 000 m³. La fusión de nieve aporta como máximo unos 15 000 m³, menos del 5 %: no había manto previo en la cuenca y el 90 % de su superficie está bajo 1 800 m. Lo determinante de la isoterma alta fue el área que recibió lluvia: si la cota de nieve se toma unos 300 m bajo la isoterma, una isoterma de 2 000 m habría dejado 8,2 km² bajo lluvia (81 %), una de 1 800 m, 6,0 km² (59 %), y una de 1 500 m, 1,7 km² (16 %); con la

isoterma del 8 de octubre llovió sobre los 10,1 km^2. Con la misma lluvia, una tormenta de isoterma típica habría generado entre un 20 y un 40 % menos de agua en el pulso.

6.10. Cribado inicial con el terreno anterior

Cuadro 7: Primera generación (9 de octubre de 2026), con el terreno anterior de 1.103 edificios: fracción de puntos de control con espesor máximo simulado mayor a 5 cm, por calle, y espesor máximo en un radio de 40 m de cada sitio. Todas las simulaciones usan Glenwood 2b, $C_v = 0{,}40$ y $Q_p = 250\,\mathrm{m^3/s}$, salvo d03 ($Q_p = 100\,\mathrm{m^3/s}$). LP: La Plaza (Portillo–El Alba); GB: General Blanche (San Carlos de Apoquindo–Las Condesas); CEA: Camino El Alba; QH: Quebrada Honda; LPS: La Plaza Sur; UCC: Clínica UC Christus; CUA: Clínica Universidad de los Andes; dPH: distancia mínima del barro al cruce de General Blanche con Padre Hurtado.

Hipótesis	V (mil m^3)	LP	GB	CEA	QH	LPS	UCC (m)	CUA (m)	Duoc (m)	dPH (m)
H3	80	0,87	0,86	0,61	0,00	0,00	0,22	0,00	0,42	1160
H1	150	0,91	0,92	0,85	0,00	0,00	0,42	0,00	0,55	366
H3	150	0,88	0,92	0,78	0,00	0,00	0,39	0,00	0,53	516
H3	300	0,91	0,93	0,96	0,00	0,00	0,42	0,00	0,54	4
H2	150	0,00	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	856
H4, $f_{\mathrm{sup}} = 0{,}5$	150	0,88	0,88	0,57	0,66	0,00	0,26	0,00	0,46	1007
H4, $f_{\mathrm{sup}} = 0{,}9$	150	0,88	0,91	0,68	0,54	0,00	0,35	0,00	0,52	816
H5 (H4 + lluvia de 20 mm/h)	150	0,88	0,88	0,57	0,66	0,00	0,26	0,06	0,46	1005
H1, cauce tallado, sin colector	150	0,89	0,94	0,87	0,55	0,00	0,31	0,00	1,63	338
ídem, colector 10 m^3/s	150	0,89	0,94	0,87	0,43	0,00	0,31	0,00	1,63	338
ídem, colector 30 m^3/s	150	0,89	0,94	0,87	0,01	0,00	0,31	0,00	1,63	338

La tabla 7 resume las simulaciones de cribado. Se observan cuatro regularidades:

1. **Corredores del abanico.** La Plaza, Mons. Álvaro del Portillo, Av. San Carlos de Apoquindo, el tramo alto de General Blanche y Camino El Alba superan el umbral en el 85 a 100 % de sus puntos en todas las hipótesis con salida en el abanico, para volúmenes entre 80 000 y 300 000 m^3. Duoc UC y la Clínica UC Christus quedan alcanzados en todas ellas, con espesores de 0,4 a 1,6 m y de 0,2 a 0,4 m, respectivamente.

2. **Quebrada Honda.** Esta calle solo supera el umbral cuando el flujo sale a la superficie en la embocadura del colector de Francisco Bulnes Correa. Eso ocurre si se impone una fuente allí (H2, H4) o si el terreno representa el cauce abierto que conduce el flujo hasta la embocadura y el colector no lo absorbe. Basta con que salga allí el 8 % del volumen.

3. **Capacidad del colector (terreno anterior; superado).** Con el cauce representado y solo 1.103 edificios, a la embocadura llegan 12 800 m^3, con un caudal máximo de 16,5 m^3/s; en ese escenario, un colector de 30 o 100 m^3/s los absorbe y Quebrada Honda queda seca (1 %). Con la ciudad completa esta conclusión cambia: el caudal calculado sube a unos 65 m^3/s y 30 m^3/s no bastan (sección 6.2). Con 10 m^3/s, desbordan unos 2 600 m^3 y Quebrada Honda se moja en el 43 % de sus puntos (figura 6).

4. **Sector sur.** Ninguna simulación moja la Av. La Plaza Sur ni el campus de la Universidad de los Andes. Solo la lluvia sobre la ladera oriente (H5) alcanza la Clínica Universidad de los Andes, con 6 cm en su entorno, lo que coincide con la declaración de la clínica de que la afectación fue exterior.

Con el terreno anterior, ninguna simulación cumple los cuatro criterios de aceptación fijados de antemano (sección 4.6). El criterio de sitios falla en todas, porque no se alcanza el campus, y el de alcance falla en todas las de 150 000 m^3.

6.11. Contraste con información posterior a las hipótesis

Después de formular las hipótesis se conocieron tres fuentes que permiten un contraste parcial, aunque no independiente de la prensa:

- **Explicación preliminar oficial** (Rojas Pérez, 2026): el Delegado Presidencial informó que el material taponó el ingreso a dos ductos paralelos en General Blanche y que colapsó la cámara de decantación de Bulnes Correa; Carabineros informó el desborde del canal en esa calle. Es la combinación que el modelo requiere para mojar a la vez el abanico y Quebrada Honda.

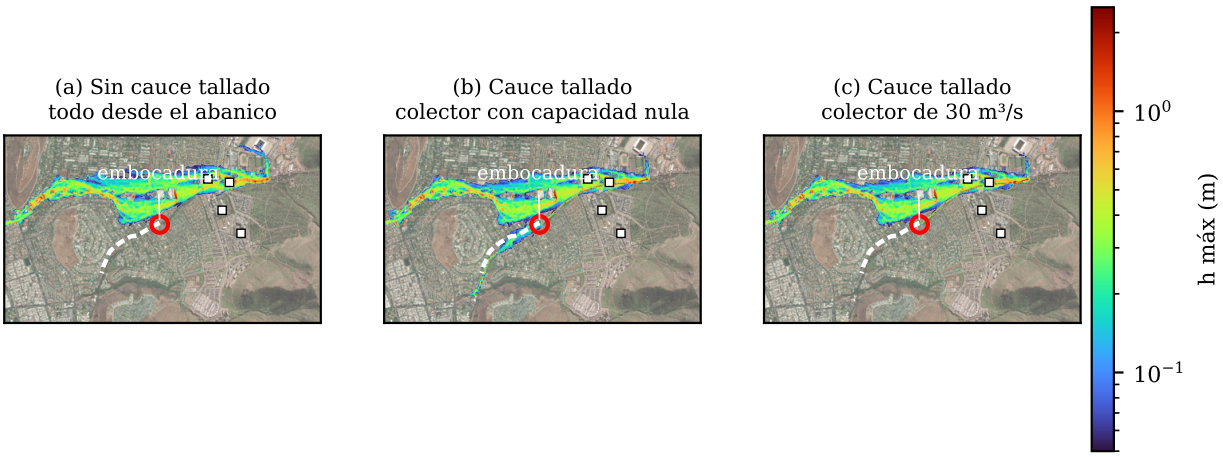

Figura 6: Primera generación (terreno anterior, 1.103 edificios; superada por la sección 6.2). Espesor máximo simulado con 150 000 m^3 saliendo en el abanico. (a) Terreno base: el flujo no alcanza Quebrada Honda (línea blanca discontinua). (b) Cauce del parque lineal tallado y colector con capacidad nula: el flujo que llega por el cauce a la embocadura (círculo rojo) desborda hacia Quebrada Honda. (c) Mismo terreno con un colector de 30 m^3/s: el colector absorbe lo que llega y Quebrada Honda queda seca. Los cuadrados indican los sitios afectados.

- **Reporte técnico de Sernageomin sobre el aluvión del 31 de enero de 2026** (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2026): describe un corredor único desde el Parque San Carlos de Apoquindo, por el sector de la Universidad de los Andes, hasta Quebrada Honda con Francisco Bulnes Correa, con continuación hacia la quebrada Apoquindo, el Hospital Dipreca y Paul Harris. El canal paralelo a Quebrada Honda aparece colmatado de barro tras ese evento. Coincide con el recorrido del cauce que el modelo necesita representar. El dominio ampliado de la versión vigente ya incluye la continuación hacia Dipreca y Paul Harris.
- **Mapa de prensa** (Chilevisión, 2026b): traza como vías del aluvión los ejes de Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda hasta Padre Hurtado. Sobre esas líneas completas, la mejor simulación moja el 92 % de Camino El Alba, el 40 % de General Blanche y el 27 % de Quebrada Honda. El tramo bajo de General Blanche, entre Las Condesas y Padre Hurtado, no se reproduce: el flujo simulado prefiere Camino El Alba en ese tramo.

Entre el 9 y el 10 de octubre se conocieron más datos, que se contrastaron sin modificar las simulaciones:

- **Lugares con ingreso de barro o agua.** Senapred incluye la Av. La Plaza Sur entre las tres calles más afectadas; el campus de la Universidad de los Andes tuvo barro y personas retenidas, y la Clínica Universidad de los Andes, un ingreso menor de agua (Cooperativa, 2026b; Interferencia, 2026). En el terreno con edificios, la simulación por el cauce principal no moja ninguno de esos tres puntos. La que agrega los brazos sur y lluvia sobre la ladera da 0,14 m junto a la Clínica Universidad de los Andes y moja parte de La Plaza Sur, pero deja el campus con 1 cm. Ambas reproducen la Clínica UC Christus (1,13 a 1,16 m, frente a cerca de 1 m informado) y la sede Duoc UC (1,9 m).
- **Evento del 31 de enero.** Con 75 mm en 1 h 20 min, una intensidad mucho mayor que la del 8 de octubre, afectó 8 ha, cerca de 4 km de calles y 11 viviendas (T13, 2026), y el colector de Bulnes Correa «funcionó muy bien» según la alcaldesa (La Tercera, 2026a). Que un evento más intenso fuera mucho menor indica que en octubre pesaron la saturación antecedente y el material disponible más que la intensidad pico, en línea con el escenario de suelo saturado.
- **Superficie afectada.** Las 253 ha informadas (Chicureo Hoy, 2026) coinciden con el área del perímetro municipal publicado por la prensa (253,0 ha). Es un perímetro de seguridad y no un mapa del barro: dentro de él el barro simulado ocupa cerca de 40 ha, porque se concentra en las calles. No se usa para discriminar hipótesis.
- **Hospital de la FACh.** Se informó agua en su servicio de urgencias. Ninguna simulación llega a ese punto, unos 1,3 km al norte del recorrido; es compatible con drenaje urbano por la lluvia del día y no se usa.

6.12. Indicadores en sitios críticos

Primera generación (terreno anterior, simulación e04; no comparable directamente con las simulaciones con la ciudad completa). En la simulación con el cauce tallado y el colector con capacidad nula supuesta, los máximos en un radio de 40 m son los siguientes:

- Duoc UC: 1,6 m de espesor, 6,3 m/s y 33 kPa de presión dinámica; el frente llega al minuto 4.
- Cruce de General Blanche con San Carlos de Apoquindo: 1,4 m, 6,7 m/s y 37 kPa, al minuto 7.
- Clínica UC Christus: 0,3 m y 1,6 m/s, al minuto 9.
- Embocadura de Bulnes Correa: 1,6 m y 3,9 m/s, al minuto 13.

Los minutos se cuentan desde el inicio del pulso. Con ese escenario, 170 edificios quedan con barro sobre 5 cm junto a su fachada, 46 sobre 0,5 m y 11 sobre 1 m; 8 reciben una presión dinámica mayor a 10 kPa. Estos valores tienen el sesgo de cribado ya señalado y no se han contrastado con mediciones.

7. Discusión

Qué reproduce el modelo. Con la ciudad completa, el modelo reproduce los dos corredores que delimitan la zona afectada oficial —Camino El Alba y General Blanche por el norte, Quebrada Honda por el sur—, el alcance hasta la Av. Padre Hurtado, cerca de un metro de barro en la urgencia de la Clínica UC Christus y la afectación de Duoc UC y de la Clínica Universidad de los Andes. El volumen que exige ese alcance, unos 300 000 m^3, coincide con el que se obtiene de forma independiente a partir de la lluvia sobre una cuenca con el suelo saturado y lloviendo en toda su superficie. La concordancia entre estimaciones obtenidas mediante procedimientos distintos aporta coherencia al orden de magnitud, bajo sus respectivos supuestos; no constituye validación independiente.

Lluvia antecedente, isoterma y volumen. El 31 de enero cayeron 75 mm en 80 minutos y el evento fue mucho menor que el de octubre, que tuvo menos intensidad pero ocurrió tras unos 144 mm acumulados y con la isoterma de 0 °C por sobre la cumbre de la cuenca. La comparación entre ambos eventos es compatible con una influencia de la saturación antecedente y del área que recibió lluvia; por sí sola no establece su contribución relativa frente a la intensidad. Bajo los supuestos del cálculo, el límite superior del aporte por deshielo es menor al 5 %: no se detectó nieve en la parte despejada de la cuenca en la imagen Sentinel-2 del 21 de septiembre.

El papel del drenaje (escenarios hipotéticos). En los escenarios ensayados, la afectación de Quebrada Honda se reproduce cuando parte del flujo calculado no ingresa al colector de Francisco Bulnes Correa. Con la ciudad completa, el caudal calculado en la embocadura llega a unos 65 m^3/s; bajo los supuestos ensayados, una capacidad hipotética de 30 m^3/s resulta insuficiente y el análisis sitúa cerca de 65 m^3/s la capacidad que evitaría el desborde con captura completa. Estos valores no describen la obra real. La cartografía hidrográfica oficial representa la continuidad del cauce por Quebrada Honda aguas abajo de la embocadura; en las simulaciones, el flujo que no ingresa al colector continúa por ese trazado. El análisis delimita capacidades hipotéticas bajo los supuestos del modelo; no determina la capacidad ni el estado de la obra real, no identifica un mecanismo de falla y no permite atribuir responsabilidades.

Posibles explicaciones de la extensión simulada fuera del perímetro oficial. Solo un tercio del barro urbano simulado cae dentro de la zona oficial, que es un perímetro de gestión y no una huella verificada del barro. Se consideran como posibles explicaciones las siguientes, cuya contribución permanece por establecer:

1. **Edificios impermeables.** En el modelo cada edificio es un bloque macizo; en la realidad el barro entró a las casas por puertas, rejas y muros caídos, y quedó almacenado en primeros pisos y subterráneos. Esa retención no está representada, lo que podría intensificar el encauzamiento por las calles. La representación por porosidad, habitual en inundación urbana (Schubert y Sanders, 2012), es la alternativa (simulación v26).
2. **Carga gruesa.** Las imágenes muestran piedras, troncos y vehículos arrastrados. La reología de la matriz fina no incluye esa resistencia adicional; un barro algo más concentrado ($C_v = 0{,}43$, entre el que se extiende y el que se queda corto) la representa de forma simple (v25).
3. **Vegetación y jardines.** FABDEM elimina árboles y la rugosidad fuera de las calles es moderada (v27 la aumenta).

A esto se suma una limitación de la métrica: el modelo no distingue el agua de la lluvia del barro del aluvión, de modo que la escorrentía de la lluvia en otros barrios cuenta como barro fuera de la zona oficial y penaliza a las hipótesis con lluvia en la ladera.

Sensibilidad al terreno. La representación explícita de los cauces menores sigue siendo lo que más cambia el recorrido: el cauce del parque lineal decide si Quebrada Honda se moja, el trazado del brazo sur decide si el barro llega a la parte alta de Álvaro del Portillo y la forma de representar la embocadura cambió en un 44 % la cobertura de Quebrada Honda. Con un terreno de 30 m, esos corredores deben tallarse a partir de la cartografía; la red hidrográfica oficial a escala 1:25.000 resultó más fiable que OpenStreetMap para el brazo sur.

Campus y Aula Magna. El modelo produce un desborde en el costado norte del campus y su descenso hacia General Blanche, compatible con lo informado por la universidad y Carabineros, pero no reproduce la entrada del barro a la biblioteca. Se ensayan tres explicaciones posibles: la escorrentía de la cuenca local de la biblioteca (11,3 ha), que en las simulaciones principales solo recibe lluvia en parte; un fluido más líquido en el faldeo; y la redistribución local por taludes, senderos y accesos que la resolución del terreno podría no representar. Los resultados disponibles no permiten identificar una explicación única.

Prueba con observaciones reservadas. La única prueba con observaciones reservadas, definida antes de cruzarlas con el modelo, fue desfavorable: la hipótesis seleccionada alcanza el 39 % de los equipamientos afectados reservados, frente al 70 % fijado, y no supera a la hipótesis de solo el cauce principal (sección 6.4). El índice exploratorio de 72/100 mide compatibilidad con observaciones usadas para formular las hipótesis; esta prueba muestra que esa compatibilidad no se traslada a la distribución espacial fina de la afectación oficial. El modelo también deja sin barro partes importantes de la zona oficial, no solo la excede. Esto puede deberse a la resolución del terreno, a la representación de los edificios, al volumen o su reparto en el tiempo, a aportes locales no modelados, o a que la afectación oficial incluye causas distintas del espesor de barro. Ninguna de estas causas se ha evaluado todavía.

Lo que mejoró después de la prueba. Dos cambios de representación explican la mayor parte de la mejora posterior a la prueba reservada. Primero, dejar que el barro entre a los lotes redistribuye la mezcla dentro de la zona oficial. Segundo, distinguir el agua turbia del campus y de La Plaza Sur del barro espeso de la rama principal, y representar los caminos y las calzadas encajonadas que la conducen. Ambos tienen sustento observacional (videos, Street View, Google Earth). Aun así, se eligieron conociendo los resultados, de modo que el aumento del IEC (de 72 a 76–82 verificado con paso fino) mide un mejor ajuste y no una validación. El costo en la Clínica UC Christus muestra que la retención en los lotes, representada así, sobrestima la pérdida de espesor en la calle.

Validez. Las observaciones disponibles son cualitativas: calles y recintos informados por la prensa y las autoridades, y un perímetro oficial que delimita la zona de gestión y no el área con barro verificado. No hay aforos ni marcas de nivel publicadas. El índice exploratorio de compatibilidad resume cuatro criterios fijados antes de simular y sirve para comparar hipótesis entre sí; no es una medida de precisión predictiva, y diferencias de dos o tres puntos no deben interpretarse como evidencia concluyente de superioridad entre hipótesis.

Grado de confianza por resultado. En lugar de reducir los resultados a un único indicador, la tabla 8 asigna a cada uno una valoración cualitativa y provisional de confianza.

8. Líneas de profundización

Se identifican siete líneas que no modifican los resultados presentados, pero que podrían cambiarlos y quedan propuestas:

1. **Severidad del incendio y velocidad de concentración.** El incendio se menciona como precondición, pero no entra al cálculo: la lluvia sobre la ladera es uniforme y el hidrograma de cada cauce sube al pico en un tiempo supuesto (10 min). Un suelo quemado e hidrofóbico infiltra menos, pierde rugosidad vegetal y concentra el agua más rápido, de forma desigual según la severidad. El índice dNBR de Sentinel-2 entre el 28 de diciembre de 2025 y el 6 de febrero de 2026, el mismo que usa el CR2, permitiría distribuir la escorrentía por severidad, acotar el coeficiente de escorrentía y la fracción quemada de severidad

Cuadro 8: Valoración cualitativa y provisional de la confianza en cada resultado, condicionada por los supuestos y la evidencia disponible.

Resultado	Grado de confianza
Corredores generales del barro	Relativamente alta: compatibles con múltiples escenarios y con la zona afectada oficial
Necesidad de representar cauces y transiciones hacia colectores	Hallazgo sólido de sensibilidad del modelo
Orden de magnitud del volumen movilizado	Estimación condicionada, con rango amplio (181.000 a 468 000 m^3)
Capacidad necesaria del colector real	No determinada; solo capacidades ensayadas en escenarios hipotéticos
Profundidad exacta frente a edificios	Exploratoria, dependiente del terreno y de los parámetros
Velocidades, presiones y tiempos de llegada	Indicadores preliminares, sin validación instrumental

moderada a alta del modelo de Gartner y cols. (2014), y estimar el tiempo de concentración de cada subcuenca.

2. **Relieve de mayor resolución en el campus.** La resolución del terreno es una posible limitación para representar la entrada del barro al Aula Magna de la Universidad de los Andes (taludes, senderos y accesos a subterráneos); un levantamiento LiDAR o fotogramétrico local permitiría probar esa explicación frente a las otras en estudio.

3. **Separar el agua de lluvia del barro.** Un trazador pasivo que marque el fluido de los hidrogramas permitiría evaluar el perímetro solo con el barro del aluvión, sin contar la escorrentía urbana de la lluvia.

4. **Edificios porosos y carga gruesa.** La retención del barro en viviendas y la resistencia de piedras, troncos y vehículos se ensayan de forma simplificada (simulaciones v25 a v27); su calibración requiere información de daños por vivienda.

5. **Validación independiente.** Imágenes satelitales posteriores al evento, levantamientos oficiales de depósitos o marcas de nivel permitirían una validación que hoy no es posible con observaciones cualitativas.

6. **Concentración como variable aleatoria.** La concentración de sedimento puede tratarse como incierta, por ejemplo $C_v = 0{,}20 + 0{,}30X$ con $X \sim \text{Beta}(3, 2)$ (moda 0,40 y media 0,38), y propagarse por el modelo con cuadratura de Gauss en 5 a 7 valores para estimar valores esperados y varianzas de profundidad, velocidad y presión, de forma análoga a la propagación de la velocidad del viento en el análisis de estructuras. Se anticipan tres precauciones: la distribución, construida a partir de rangos de la literatura y de la evidencia del evento, es una distribución de creencia y no la distribución estadística real del sedimento, por lo que sus resultados quedan condicionados a ella y conviene contrastarla con alternativas (uniforme, Beta(2,2)); la cuadratura estima bien los momentos, pero no las probabilidades de inundación ni los percentiles extremos, porque el mojado y secado introducen discontinuidades, que se pueden tratar interpolando entre simulaciones la concentración umbral a la que cada celda supera un espesor dado o con más simulaciones (muestreo por hipercubo latino); y variar la concentración entre simulaciones representa la incertidumbre de un parámetro, que es un nivel de modelación distinto de la evolución física de la concentración durante el recorrido.

7. **Evolución de la concentración.** La erosión, el depósito y la incorporación de escombros cambian la concentración a lo largo del recorrido. Un sedigrama de entrada (frente más concentrado y cola más diluida) y un trazador de concentración transportado con el flujo permitirían que la fluencia y la viscosidad varíen con ella. Se distingue así el depósito final de la extensión máxima del flujo, que hoy es la única que se informa.

9. Conclusiones

1. Un modelo bidimensional de aguas someras con reología de barro, construido solo con datos públicos y con la ciudad completa representada, reproduce la estructura principal del aluvión del 8 de octubre de 2026: los corredores de Camino El Alba, General Blanche y Quebrada Honda que delimitan la zona afectada oficial, el alcance hasta Padre Hurtado, cerca de 1 m de barro en la Clínica UC Christus y la afectación de Duoc UC y de la Clínica Universidad de los Andes.

2. La hipótesis seleccionada combina el cauce principal, los brazos sur y la lluvia sobre la ladera quemada: obtiene un índice exploratorio de compatibilidad de 72/100 con lo observado (calles 0,77; recintos 0,75; alcance 1,00; zona oficial 0,34), medido contra la zona afectada oficial; sus indicadores se mantienen en la comparación temporal realizada. El índice compara hipótesis; no es precisión predictiva ni validación. En los escenarios ensayados, unos 300 000 m^3 de mezcla permiten reproducir el criterio de alcance, en un orden de magnitud coherente con una estimación por lluvia que adopta la saturación del suelo informada.

3. En los escenarios hipotéticos ensayados, la inundación de Quebrada Honda se reproduce cuando el colector de Francisco Bulnes Correa no absorbe el flujo calculado en su embocadura, de unos 65 m^3/s con la ciudad completa. Bajo esos supuestos, una capacidad de 30 m^3/s resulta insuficiente y una cercana a 65 m^3/s evitaría el desborde. Estos valores no describen la obra real, cuya capacidad y estado no son públicos, y requieren validación con información de diseño e inspección.

4. Una prueba con observaciones reservadas, definida antes de mirar resultados y ejecutada una sola vez, resultó desfavorable: la hipótesis seleccionada alcanza 19 de 49 equipamientos afectados oficiales (39 %), por debajo del 70 % fijado. La reconstrucción reproduce los corredores principales, pero no la distribución espacial de la afectación oficial.

5. Después de la prueba reservada, representar las casas como porosas y el faldeo como agua turbia mejora el IEC verificado a 76–78. La hipótesis integrada (v32) cumple los cuatro criterios originales con un IEC de 82 verificado con paso fino bajo una lluvia supuesta de 35 mm/h, y de 79 con la lluvia medida. Son resultados de ajuste.

6. En el campus de la Universidad de los Andes, la evidencia es compatible con escorrentía turbia de la ladera y del cerro, encauzada por La Plaza Sur y que entra por un claro a un patio hundido, y no con el desborde de Álvaro del Portillo.

7. El principal desajuste es que el barro simulado se extiende más allá de la zona oficial, al poniente de Padre Hurtado y hacia Dipreca. Se consideran como posibles explicaciones la representación de los edificios como bloques impermeables, la resistencia de la carga gruesa y la vegetación; su contribución permanece por establecer y se ensaya con casas porosas, un barro algo más concentrado y más rugosidad.

8. Se reproduce un desborde en el costado norte del campus de la Universidad de los Andes, pero no la entrada del barro al Aula Magna; entre las explicaciones en estudio están la cuenca local de la biblioteca, un fluido más líquido en el faldeo y la resolución del terreno. Los resultados son preliminares hasta completar las simulaciones en curso y la validación satelital.

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

Control de versiones

- **9 de octubre de 2026 (primera generación):** terreno anterior con 1.103 edificios; cribado de las hipótesis H1 a H4, cauce del parque lineal tallado y primeros ensayos del colector (corridas d, e, f, g, k y s). Sus conclusiones sobre el colector quedaron superadas por la versión con la ciudad completa.
- **10 de octubre:** ciudad completa con 42.018 edificios y dominio ampliado (v01 a v09, z01); volumen con suelo saturado, isoterma y Sentinel-2; contraste con la prensa.
- **10 y 11 de octubre:** colector con captura de toda la sección (v10, v11, v17, v18), Quebrada Honda y brazo sur según la red hidrográfica oficial (v14 a v21), control de paso fino de la hipótesis principal (z02).

- **11 de octubre, mañana:** zona afectada oficial de IDE Chile como referencia, índice exploratorio de compatibilidad, cota máxima de la cuenca corregida en el texto (2 355 m), citas al análisis original del CR2, separación entre resultados observados, calculados e hipotéticos, y anexo de fichas.
- **11 de octubre, tarde:** ensayos v25 a v29, microsimulaciones del campus, enmienda 1 del protocolo (regla de desempate) y prueba con observaciones reservadas (desfavorable).
- **12 de octubre, madrugada (esta versión):** ensayos posteriores a la prueba: casas porosas (v26, v30, z26), faldeo más líquido verificado (z29), cuadratura de la concentración (q1–q5), microsimulaciones del campus y de La Plaza Sur con observaciones aportadas por el autor (mw10, mwq20, mrt10, mrp10, mrc10, mrd10) e hipótesis integrada (v32, verificada con paso fino en z32; v31 descartada), sensibilidad a la lluvia (v33 con la lluvia medida; microsimulaciones de 15 y 25 mm/h; mrdn, mrds2).

La fecha de término de cada simulación figura en la tabla 9.

Versiones congeladas, registro de experimentos y observaciones reservadas

- **Versiones congeladas.** Cada versión publicada del paper y del subestudio se conserva tal como se publicó, con su huella SHA-256 y una etiqueta en el control de versiones (https://aluvion.hirely.cl/paper/versiones/). El enlace principal apunta a la última versión, sin borrar las anteriores. Los terrenos no se modifican después de usarse: cada variante tiene un archivo propio.
- **Registro de experimentos.** El registro incluye todas las corridas, también las detenidas, canceladas, fallidas y descartadas, con sus parámetros, terreno, versión del código y motivo. Entre las descartadas: el borde transmisivo que creaba masa, el terreno fotogramétrico con depresiones espurias, v20 por un artefacto de umbral, el radio de captura de 12 m y v22–v24. Al 11 de octubre por la tarde son 71 entradas: 48 completadas (42 simulaciones evaluadas con el IEC y 6 microsimulaciones del campus), 5 detenidas, 3 canceladas, 1 fallida, 5 grupos descartados y 9 en curso.
- **Separación de observaciones.** Hay tres grupos:
  - *de ajuste*: calles, recintos, alcance y perímetro (prensa y zona oficial), espesor en la Clínica UC Christus y relatos del campus. Se usaron para formular y seleccionar hipótesis, por lo que el IEC mide compatibilidad, no validación;
  - *de contraste descriptivo*: predios y ejes viales afectados de IDE Chile, y balances de viviendas. Ya se consultaron, pero no entraron en el índice ni en la selección;
  - *reservadas*: los 49 equipamientos afectados de IDE Chile que no coinciden con recintos de ajuste, las imágenes Sentinel-1 posteriores al evento y futuras marcas de nivel o espesores oficiales.
- **Prueba prerregistrada.** La métrica de la prueba con el equipamiento se fijó antes de cruzarlo con el modelo: sensibilidad con $h > 5$ cm a 15 m o menos, y criterio favorable con al menos 0,70 y superior a dos referencias (v01 y e03). El candidato se elige solo con las observaciones de ajuste y se congela antes de la prueba, que se ejecuta una vez y se informa sea cual sea su resultado. La prueba es solo parcialmente independiente, porque los puntos están dentro de la zona oficial usada en el índice, y no reemplaza la validación científica independiente.

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

Beven, K., y Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, *6*(3), 279–298. https://doi.org/10.1002/hyp.3360060305

BioBioChile. (2026a, 8 de octubre). El posible origen del brutal aluvión que golpeó Las Condes: apuntan a incendio que debilitó quebrada. *BioBioChile*. https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-metropolitana/2026/10/08/apuntan-a-incendio-que-debilito-quebrada-como-el-posible-origen-del-devastador-aluvion-en-las-condes.shtml

BioBioChile. (2026b, 8 de octubre). Videos evidencian daños en sede Duoc UC y U. Los Andes por fuerte aluvión en San Carlos de Apoquindo. *BioBioChile*. 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

Cadena 3. (2026, 8 de octubre). La clínica San Carlos de Apoquindo, colapsada con un metro de barro en el sector de urgencias. *Cadena 3*. 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

Chicureo Hoy. (2026, 9 de octubre). Las condes: refuerzan trabajos de limpieza mientras daños preliminares superan los US$ 170 millones. *Chicureo Hoy*. https://www.chicureohoy.cl/actualidad/las-condes-refuerzan-trabajos-de-limpieza-mientras-danos-preliminares-superan-los-us-170-millones/

Chilevisión. (2026a, 8 de octubre). Aluvión en Las Condes: Sernageomin advirtió de los puntos críticos en febrero de este año. *Chilevisión Noticias*. https://www.chilevision.cl/noticias/nacional/aluvion-en-las-condes-sernageomin-advirtio-de-los-puntos-criticos-en-febrero-de-este-ano/

Chilevisión. (2026b). *Perímetro del aluvión: los puntos que afectó en Las Condes.* Mapa interactivo. https://www.chilevision.cl/noticias/nacional/perimetro-aluvion-puntos-afecto-las-condes/

Colaboradores de OpenStreetMap. (2026). *Extracto de OpenStreetMap para Chile (`chile-latest.osm.pbf`).* Distribuido por Geofabrik. 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. (2026a, 8 de octubre). Comunidad de U. Los Andes se mantendrá en el campus: «No sabemos hasta qué hora». *Cooperativa.cl*. 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

Cooperativa. (2026b, 8 de octubre). Comunidad de U. Los Andes se mantendrá en el campus: «No sabemos hasta qué hora». *Cooperativa.cl*. 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 (Declaraciones del vicerrector de Comunicaciones)

Costa, J. E. (1984). Physical geomorphology of debris flows. En J. E. Costa y P. J. Fleisher (Eds.), *Developments and applications of geomorphology* (pp. 268–317). Berlín: Springer.

Dirección Meteorológica de Chile. (2026). *Servicios Climáticos: estación meteorológica automática 330019, Eulogio Sánchez (Tobalaba).* (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`))

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., … Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, *120*, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

El Dínamo. (2026, 9 de octubre). Qué calles están bloqueadas y por cuáles se puede transitar tras el aluvión en Las Condes. *El Dínamo*. https://www.eldinamo.cl/pais/2026/10/09/que-calles-estan-bloqueadas-y-por-cuales-se-puede-transitar-tras-el-aluvion-en-las-condes

Emol. (2026, 8 de octubre). «Inédito»: Se extiende la temporada de esquí y Valle Nevado operará hasta noviembre por primera vez en su historia. *Emol*. https://www.emol.com/noticias/Economia/2026/10/08/1213613/centros-de-esqui-extienden-temporada.html

European Space Agency. (s. f.). *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 (Tesela S34 W071, descargada el 9 de octubre de 2026)

FLO-2D Software, Inc. (2021). FLO-2D pro reference manual [Manual de software informático]. https://documentation.flo-2d.com/Build21/flo-2d_pro/FLO-2D%20Pro%20Reference%20Manual%202021/index.html

Gartner, J. E., Cannon, S. H., y Santi, P. M. (2014). 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. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.04.008

Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., y Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, *17*(2), 024016. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f

Hussain, E. (2021). *Survey over Santiago, Chile from 2014 SPOT imagery.* Distribuido por OpenTopography. https://portal.opentopography.org/dataspace/dataset?opentopoID=OTDS.022021.32719.2 (CC BY 4.0)

Interferencia. (2026, 9 de octubre). Aluvión en Las Condes: advertencias de Sernageomin, obras pendientes y una alerta que no pidió evacuar. *Interferencia*. https://interferencia.cl/articulos/aluvion-en-las-condes-advertencias-de-sernageomin-obras-pendientes-y-una-alerta-que-no

Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, *35*(3), 245–296. https://doi.org/10.1029/97RG00426

La Tercera. (2026a, 1 de febrero). 11 viviendas anegadas en Las Condes tras temporal en la RM, mientras siguen labores de despeje en casas y quebradas. *La Tercera*. https://www.latercera.com/nacional/noticia/once-viviendas-anegadas-en-las-condes-tras-temporal-en-la-rm-mientras-continuan-labores-de-despeje-en-casas-y-quebradas/

La Tercera. (2026b, 8 de octubre). Desde San Carlos de Apoquindo hasta Pueblito Los Dominicos: informan zona más afectada por aluvión en Las Condes. *La Tercera*. https://www.latercera.com/nacional/noticia/desde-san-carlos-de-apoquindo-hasta-pueblito-los-dominicos-informan-zona-mas-afectada-por-aluvion-en-las-condes/

La Tercera. (2026c, octubre). La «zona cero» del aluvión en Las Condes que inundó clínicas, casas y arrastró autos. *La Tercera*. https://www.latercera.com/nacional/noticia/la-zona-cero-del-aluvion-en-las-condes-que-inundo-clinicas-y-arrastro-autos/

La Tercera. (2026d, octubre). Senapred reporta 384 damnificados y más de 1.200 rescatados tras aluvión en Las Condes. *La Tercera*. https://www.latercera.com/nacional/noticia/senapred-reporta-384-damnificados-y-mas-de-1200-rescatados-tras-aluvion-en-las-condes/

Meganoticias. (2026, 8 de octubre). *Universidad de Los Andes inundada por aluvión.* Video en YouTube (Shorts). https://www.youtube.com/shorts/TwMt1TVHjOc (Publicado a las 18:16 (hora de Chile))

Ministerio de Bienes Nacionales, y IDE Chile. (2026). *Visor de emergencia: aluvión de Las Condes, octubre de 2026.* Tablero y capas en ArcGIS Online. https://www.bienesnacionales.cl/visor-emergencia-las-condes-aluvion/ (Capas consultadas el 11 de octubre de 2026)

Mizuyama, T., Kobashi, S., y Ou, G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. En *Proceedings of the international symposium interpraevent* (Vol. 4, pp. 99–108). Bern, Switzerland. https://www.interpraevent.at/en/proceeding/schutz-des-lebensraumes-vor-hochwasser-mu-ren-und-lawinen-1992

Municipalidad de Las Condes. (2026, 2 de enero). Incendio en San Carlos de Apoquindo ya está controlado. *Sitio web de la Municipalidad de Las Condes*. https://www.lascondes.cl/incendio-en-san-carlos-de-apoquindo-ya-esta-controlado/

Neal, J., y Hawker, L. (2023). *FABDEM V1-2.* Conjunto de datos, University of Bristol. https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn

O'Brien, J. S., y Julien, P. Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, *114*(8), 877–887. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877)

O'Brien, J. S., Julien, P. Y., y Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, *119*(2), 244–261. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244)

Quinta Conectado. (2026). *Aluvión ingresó hasta el aula Magna de la Universidad de Los Andes, #LasCondes.* Video en Facebook. https://www.facebook.com/watch/?v=2615817252269905

Radio La Señal. (2026, 8 de octubre). Clínica UAndes: «Toda la afectación fue en el exterior, no hubo inundaciones dentro». *Radio La Señal*. https://radiolasenal.cl/clinica-uandes-toda-la-afectacion-fue-en-el-exterior-no-hubo-inundaciones-dentro/

Roberts, S., Nielsen, O., Gray, D., Sexton, J., y Davies, G. (2026). *ANUGA: a hydrodynamic modelling package.* Versión 4.0.1, paquete de Python publicado en PyPI el 17 de septiembre de 2026. https://pypi.org/project/anuga/4.0.1/ (Código fuente en https://github.com/anuga-community/anuga_core)

Rojas Pérez, M. (2026). *El barro que arrasó San Carlos de Apoquindo bajó por una ladera quemada y encontró los colectores cerrados.* El Desconcierto. https://eldesconcierto.cl/medio-ambiente/el-barro-que-arraso-san-carlos-apoquindo-una-ladera-quemada-y-encontro-los-colectores-cerrados-n5462994 (9 de octubre de 2026)

Rondanelli, R., Garreaud, R., Azócar, G., Bozkurt, D., Galleguillos, M., y Miranda, A. (2026, 10 de octubre). *Análisis CR2 del aluvión de San Carlos de Apoquindo.* Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), difundido por la Universidad de Chile. https://uchile.cl/noticias/245741/analisis-cr2-del-aluvion-de-san-carlos-de-apoquindo-

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

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2026). *Reporte técnico de remoción en masa Metropolitana 02/2026: flujo de detritos en las quebradas La Honda, Grande, Los Almendros y Apoquindo, comuna*

de Las Condes (Inf. Téc.). SERNAGEOMIN. https://services1.arcgis.com/OyjvVdFTl5hfSdX3/arcgis/rest/services/minutasATG_Flash/FeatureServer/0/232/attachments/349 (Evento del 31 de enero de 2026; elaborado el 11 de febrero de 2026)

T13. (2026, 10 de octubre). Las contradicciones tras el aluvión en Las Condes: ¿estaban instaladas las mallas de contención o no? *T13*. https://www.t13.cl/noticia/nacional/las-contradicciones-tras-aluvion-las-condes-estaban-instaladas-las-mallas-conte-10-10-2026

The Clinic. (2026, 8 de octubre). Aluvión afecta a Las Condes en medio de intenso sistema frontal: fuerte corriente arrastró autos por San Carlos de Apoquindo. *The Clinic*. https://www.theclinic.cl/2026/10/08/aluvion-afecta-a-las-condes-en-medio-de-intenso-sistema-frontal/

Zanuttigh, B., y Lamberti, A. (2007). Instability and surge development in debris flows. *Reviews of Geophysics*, *45*(3), RG3006. https://doi.org/10.1029/2005RG000175

Zippenfenig, P. (2023). *Open-meteo.com weather API.* Zenodo. (Datos de pronóstico histórico y reanálisis ERA5 consultados el 10 de octubre de 2026) https://doi.org/10.5281/zenodo.7970649

A. Anexo: catálogo y fichas de las simulaciones

La tabla 9 lista todas las simulaciones evaluadas. A continuación, cada simulación clave tiene una ficha con su lámina: el barro simulado (espesor máximo) sobre la zona afectada oficial de IDE Chile y los ejes viales afectados, qué prueba, qué muestra, dónde falla y qué hipótesis levanta. Los ensayos v25 a v29 y las microsimulaciones del campus se resumen en la sección
refsec:res-ronda; v22 a v24 se detuvieron antes de terminar (registro de experimentos).

Cuadro 9: Catálogo de todas las simulaciones evaluadas, ordenadas por índice exploratorio de compatibilidad (IEC). Columnas como en la tabla 6; las corridas con paso normal cuyo componente «sitios» depende del punto de control del campus no se usan para seleccionar con su IEC bruto: sin ese punto obtienen 71–76, salvo verificación con paso fino (z26: 76; z29: 78) (enmienda 1 del protocolo); v31 se descartó (inyección del cauce principal fuera del fondo de la quebrada); las corridas posteriores a la prueba reservada son de ajuste; Fecha: día y mes en que terminó la simulación (2026). Terreno: ciudad (42.018 edificios), anterior (1.103 edificios), ant.+cauce (anterior con el cauce del parque lineal tallado) o SPOT 2014.

Terr.	Fecha	Corrida	Escenario	V (mil m^3)	Barro	Calles	Sitios	dPH (m)	Perím.	QH	UCC (m)	IEC
ciudad	11-10	v26	cauce + brazos sur; casas porosas en la zona oficial + lluvia neta	300	G2b	0,77	1,00	1	0,54	0,56	0,30	83
ciudad	12-10	v30	cauce + brazos sur; casas porosas, Kp 1000 y n 0,1 (sensibilidad de v26)	300	G2b	0,76	1,00	1	0,53	0,54	0,31	82
ciudad	12-10	v32	cauce + brazos sur; hipótesis integrada: casas porosas, faldeo agua turbia, camino, La Plaza Sur y entradas a la universidad	300	G2b	0,77	1,00	1	0,51	0,56	0,30	82
ciudad	12-10	z32	cauce + brazos sur; hipótesis integrada, paso fino	300	G2b	0,77	1,00	5	0,51	0,56	0,30	82
ciudad	11-10	v27	cauce + brazos sur; más rugosidad en jardines y árboles + lluvia	300	G2b	0,78	1,00	8	0,39	0,68	1,13	79
ciudad	12-10	v33	cauce + brazos sur; hipótesis integrada con lluvia medida: 8 mm/h durante 4 h	300	G2b	0,76	1,00	1	0,41	0,56	0,30	79
ciudad	11-10	v20	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h + brazo sur oficial (terreno v6), paso normal	300	G2b	0,77	1,00	15	0,33	0,68	1,12	78
ciudad	11-10	v25	cauce + brazos sur; barro algo más denso (Cv 0,43) + lluvia	300	G2b	0,77	1,00	15	0,35	0,68	1,11	78
ciudad	11-10	v29	cauce + brazos sur; faldeo líquido (Cv 0,27) + rama principal Cv 0,43 + lluvia neta	300	G2b	0,77	1,00	15	0,35	0,68	1,11	78
ciudad	11-10	v28	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h solo fuera de las cuencas aportantes (sin doble conteo)	300	G2b	0,77	1,00	15	0,34	0,68	1,13	78
ciudad	11-10	q3	cauce + brazos sur; cuadratura de Cv: nodo Cv 0,365	300	G2b	0,77	1,00	15	0,34	0,68	1,13	78
ciudad	11-10	q4	cauce + brazos sur; cuadratura de Cv: nodo Cv 0,429	300	G2b	0,77	1,00	15	0,36	0,68	1,12	78
ciudad	12-10	z29	cauce + brazos sur; faldeo Cv 0,27, paso fino	300	G2b	0,77	1,00	15	0,35	0,68	1,11	78
ciudad	12-10	v31	cauce + brazos sur; hipótesis integrada: casas porosas, camino, La Plaza Sur, entradas a la universidad, árboles, H1 aguas arriba, faldeo Cv 0,10	300	G2b	0,72	1,00	191	0,40	0,51	0,19	78
ciudad	11-10	q2	cauce + brazos sur; cuadratura de Cv: nodo Cv 0,297	300	G2b	0,77	1,00	15	0,32	0,68	1,14	77
ciudad	11-10	q1	cauce + brazos sur; cuadratura de Cv: nodo Cv 0,239	300	G2b	0,76	1,00	15	0,32	0,68	1,14	77
ciudad	12-10	z26	cauce + brazos sur; casas porosas, paso fino	300	G2b	0,76	0,75	5	0,54	0,56	0,30	76
ciudad	11-10	q5	cauce + brazos sur; cuadratura de Cv: nodo Cv 0,478	300	G2b	0,78	0,75	34	0,38	0,68	1,11	73
ciudad	10-10	v02	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h en ladera	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,13	72

Terr.	Fecha	Corrida	Escenario	V (mil m^3)	Barro	Calles	Sitios	dPH (m)	Perím.	QH	UCC (m)	IEC
ciudad	10-10	z02	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h, paso 4× más fino	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,13	72
anterior	09-10	f03	abanico + embocadura + brazos sur; lluvia 35 mm/h en ladera	150	G2b	0,73	0,75	225	0,39	0,66	0,26	71
ciudad	10-10	v14	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h + quebrada Álvaro del Portillo	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,15	71
ciudad	11-10	v19	cauce + brazos sur; lluvia 35 mm/h + brazo sur oficial hasta Álvaro del Portillo (terreno v6)	300	G2b	0,77	0,75	15	0,34	0,68	1,11	71
ciudad	10-10	v09	cauce principal	300	A2	0,77	0,50	151	0,52	0,68	1,14	70
ciudad	10-10	v03	cauce principal; colector 30 m^3/s	300	G2b	0,77	0,50	96	0,50	0,64	1,16	69
ciudad	10-10	v05	cauce principal; colector 100 m^3/s	300	G2b	0,74	0,50	96	0,53	0,44	1,16	69
ciudad	10-10	v06	cauce principal; colector 60 m^3/s	300	G2b	0,74	0,50	96	0,53	0,44	1,16	69
ciudad	10-10	v17	cauce principal; colector 30 m^3/s, captura 25 m, Quebrada Honda tallada	300	G2b	0,76	0,50	96	0,50	0,62	1,18	69
ant.+cauce	09-10	f01	cauce principal	150	G2b	0,71	0,50	338	0,63	0,55	0,31	68
ant.+cauce	09-10	e04	cauce principal	300	G2b	0,75	0,50	2	0,46	0,56	0,32	68
ciudad	10-10	v01	cauce principal	300	G2b	0,77	0,50	96	0,46	0,68	1,16	68
ciudad	10-10	z01	cauce principal; control numérico (paso 4× más fino)	300	G2b	0,77	0,50	96	0,46	0,68	1,16	68
ciudad	10-10	v10	cauce principal; colector 100 m^3/s, captura 25 m	300	G2b	0,69	0,50	96	0,52	0,00	1,16	68
ciudad	10-10	v11	cauce principal; colector 200 m^3/s, captura 40 m	300	G2b	0,69	0,50	96	0,52	0,00	1,16	68
ciudad	10-10	v15	cauce principal; Quebrada Honda tallada aguas abajo (terreno v5)	300	G2b	0,77	0,50	96	0,45	0,68	1,18	68
ciudad	10-10	v18	cauce principal; colector 100 m^3/s, captura 25 m, Quebrada Honda tallada	300	G2b	0,69	0,50	96	0,52	0,00	1,18	68
ciudad	11-10	v21	cauce + brazos sur; brazo sur oficial (terreno v6), sin lluvia	300	G2b	0,77	0,50	131	0,45	0,68	1,11	68
ant.+cauce	09-10	k03	cauce principal; colector 10 m^3/s	150	G2b	0,70	0,50	338	0,64	0,43	0,31	67
ciudad	10-10	v07	cauce principal	150	G2b	0,72	0,50	348	0,62	0,68	1,09	67
ciudad	10-10	v08	cauce principal	300	G1	0,74	0,50	396	0,63	0,69	1,16	67
ant.+cauce	09-10	k01	cauce principal; colector 30 m^3/s	150	G2b	0,65	0,50	338	0,63	0,01	0,31	66
ant.+cauce	09-10	k02	cauce principal; colector 100 m^3/s	150	G2b	0,65	0,50	338	0,63	0,01	0,31	66
anterior	09-10	d02	cauce + brazos sur	300	G2b	0,68	0,50	4	0,41	0,00	0,42	65
anterior	09-10	d04	cauce principal	150	G2b	0,63	0,50	366	0,55	0,00	0,42	63
anterior	09-10	d01	cauce + brazos sur	150	G2b	0,60	0,50	516	0,55	0,00	0,39	58
anterior	09-10	g01	cauce + brazos sur	150	G2b	0,58	0,50	592	0,51	0,00	0,38	55
anterior	09-10	g03	abanico + embocadura + brazos sur	150	G2b	0,60	0,50	816	0,53	0,54	0,35	50
anterior	09-10	f02	abanico + embocadura + brazos sur; lluvia 20 mm/h en ladera	150	G2b	0,56	0,75	1005	0,46	0,66	0,26	49
anterior	09-10	g02	abanico + embocadura + brazos sur	150	G2b	0,61	0,50	947	0,51	0,57	0,33	47
anterior	09-10	e06	cauce principal	150	G1	0,47	0,50	1686	0,80	0,45	0,59	44
anterior	09-10	d03	cauce + brazos sur; caudal pico 100 m^3/s	80	G2b	0,50	0,50	1160	0,68	0,00	0,22	43
anterior	09-10	e01	abanico + embocadura + brazos sur	150	G2b	0,56	0,50	1007	0,46	0,66	0,26	43
anterior	09-10	e02	abanico + embocadura + brazos sur	150	G2b	0,52	0,50	982	0,43	0,67	0,23	42
SPOT 2014	09-10	s01	cauce principal	150	G2b	0,50	0,50	1188	0,60	0,77	0,37	40
anterior	09-10	e03	solo embocadura	150	G2b	0,08	0,00	856	0,20	0,69	0,00	16

Ensayos posteriores a la prueba reservada (ajuste)

v32 · Hipótesis integrada: casas porosas, agua turbia en el faldeo y rasgos del campus. Qué prueba: Reúne lo aprendido después de la prueba reservada: casas de la zona oficial que dejan entrar el barro, agua turbia (Cv 0,10) en el faldeo del campus y La Plaza Sur, barro de Cv 0,40 en la rama principal, y los rasgos que el relieve de 30 m no resuelve (camino del cerro, calzada baja de La Plaza Sur, entradas a la universidad y al estacionamiento), con lluvia sobre todo el faldeo fuera de las cuencas aportantes. **Qué muestra:** Calculado: cumple los cuatro criterios originales (IEC 82/100 sin verificar); el barro urbano dentro de la zona oficial llega a 51 %; el campus marca 0,61 m; La Plaza Sur se moja en el 46 % de su largo; el agua entra por el claro al patio (0,07 m) y al estacionamiento. **Dónde falla:** En la urgencia de la UC

Christus calcula 0,30 m (informado: cerca de 1 m). En el campus llega menos agua que en las simulaciones de detalle, porque la lluvia excluye las cuencas aportantes, que incluyen parte del cerro. **Qué levanta:** Que el barro espeso de la rama principal y el agua turbia del campus fueron procesos distintos el mismo día, y que la retención en los lotes explica parte de la distribución dentro de la zona oficial. **Estado:** IEC 82/100 verificado con paso fino (z32). Ajuste posterior a la prueba reservada.

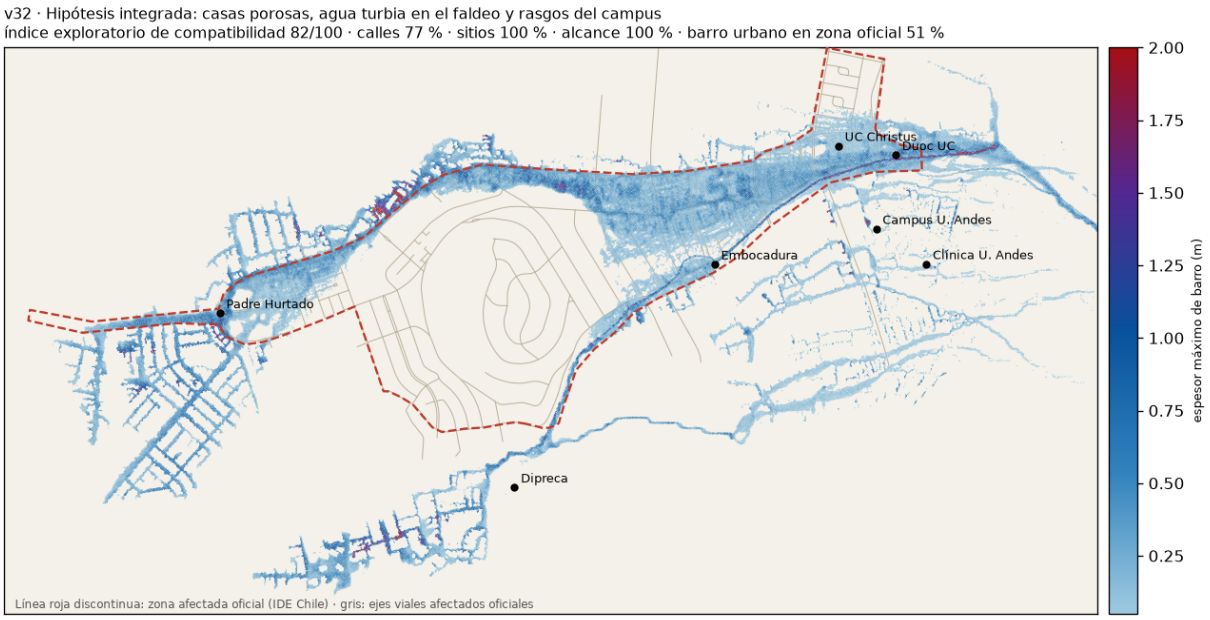

Figura 7: Ficha v32: Hipótesis integrada: casas porosas, agua turbia en el faldeo y rasgos del campus.

z26 · Casas porosas (paso fino). **Qué prueba:** Que los edificios de la zona oficial dejen entrar el barro (piso a la cota del terreno más 0,3 m y alta resistencia), en vez de ser bloques macizos. **Qué muestra:** Calculado: el barro urbano dentro de la zona oficial sube de 34 % a 54 %; moja el 36 % del área oficial y el 40 % de sus predios afectados; cumple los cuatro criterios originales. Con la mitad de la resistencia (v30) casi no cambia. **Dónde falla:** La urgencia de la UC Christus baja a 0,30 m. El punto del campus no se moja con paso fino. **Qué levanta:** La retención del barro en los lotes es clave para la distribución dentro de la zona oficial; su representación exacta sigue siendo un supuesto. **Estado:** IEC verificado con paso fino: 76/100 (ajuste posterior).

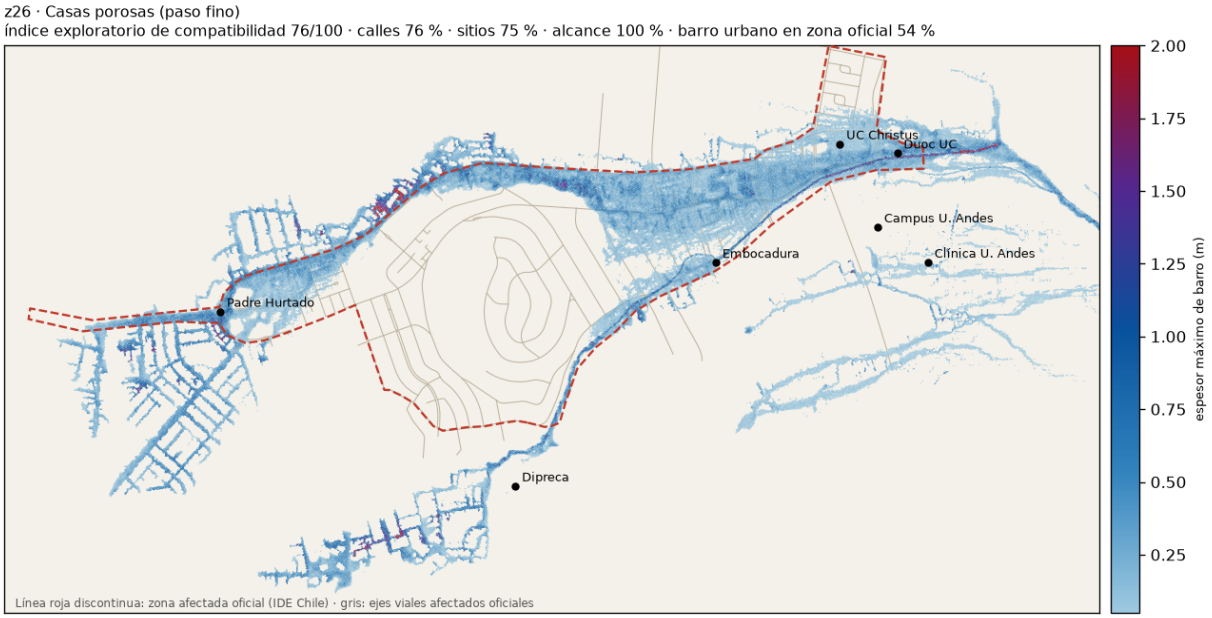

Figura 8: Ficha z26: Casas porosas (paso fino).

z29 · Faldeo más líquido (paso fino). **Qué prueba:** Dos barros según la zona: Cv 0,27 en el faldeo del campus y Cv 0,43 en la rama principal, con la lluvia solo fuera de las cuencas aportantes. **Qué muestra:** Calculado: el punto de control del campus se mantiene mojado con paso fino (0,09 m), a diferencia de la hipótesis con un solo barro (0,01 m). **Dónde falla:** No mejora la extensión fuera de la zona oficial (0,35). **Qué levanta:** Un fluido más líquido en el faldeo, compatible con el agua turbia del video, moja el campus de forma robusta. **Estado:** IEC verificado con paso fino: 78/100 (ajuste posterior).

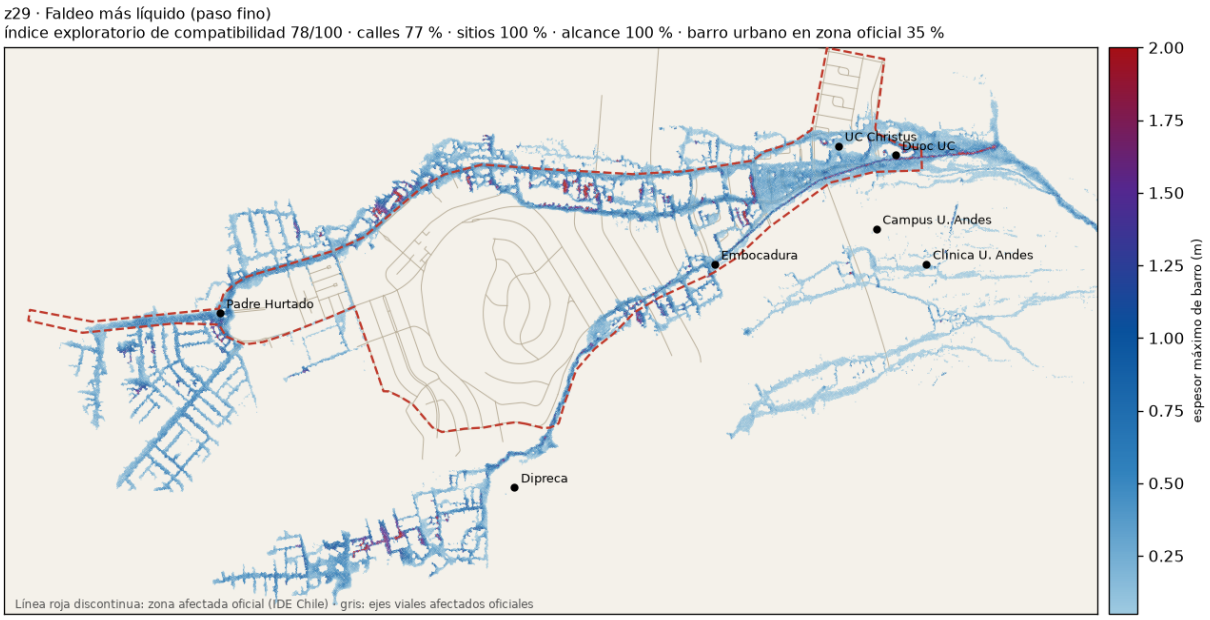

Figura 9: Ficha z29: Faldeo más líquido (paso fino).

Hipótesis actual

z02 · Cauce + brazos sur + lluvia en ladera, ciudad completa (paso fino). **Qué prueba:** La hipótesis más completa entre las ensayadas: el barro sale por el cauce principal al abanico y por los brazos sur, y además se aplica una lluvia de 35 mm/h sobre la ladera quemada. Repite v02 con un paso de tiempo cuatro veces más fino para examinar la sensibilidad al paso de tiempo. **Qué muestra:** Calculado: el flujo simulado recorre los dos corredores que delimitan la zona oficial (El Alba–General Blanche y Quebrada Honda) y llega a menos de 200 m de Padre Hurtado; en el entorno de la Clínica UC Christus calcula 1,13 m (la fuente consultada informó cerca de 1 m en urgencias) y produce flujo junto a la Clínica U. de los Andes. Los indicadores coinciden con los de v02; esta comprobación numérica no valida la reconstrucción del evento. **Dónde falla:** Solo un tercio del barro simulado en zona urbana cae dentro de la zona oficial: se extiende al poniente de Padre Hurtado, por Quebrada Honda hacia Dipreca y, por la lluvia aplicada, por calles de otros barrios. No alcanza el campus de la U. de los Andes. Parte de la lluvia aplicada (unos 9.400 m^3) se superpone con cuencas que ya entran por los hidrogramas; v28 lo corrige. **Qué levanta:** En z02, el aporte de lluvia sobre la ladera contribuye a reproducir el flujo junto a la clínica; su predominio durante el evento permanece como hipótesis. Como posibles explicaciones de la extensión fuera de la zona oficial se consideran la representación de los edificios, la carga gruesa y la vegetación (v25–v27). **Estado:** Hipótesis seleccionada antes de la prueba con observaciones reservadas (prueba desfavorable): IEC 72/100. Los ensayos posteriores (casas porosas, faldeo líquido, hipótesis integrada) la superan, como ajuste.

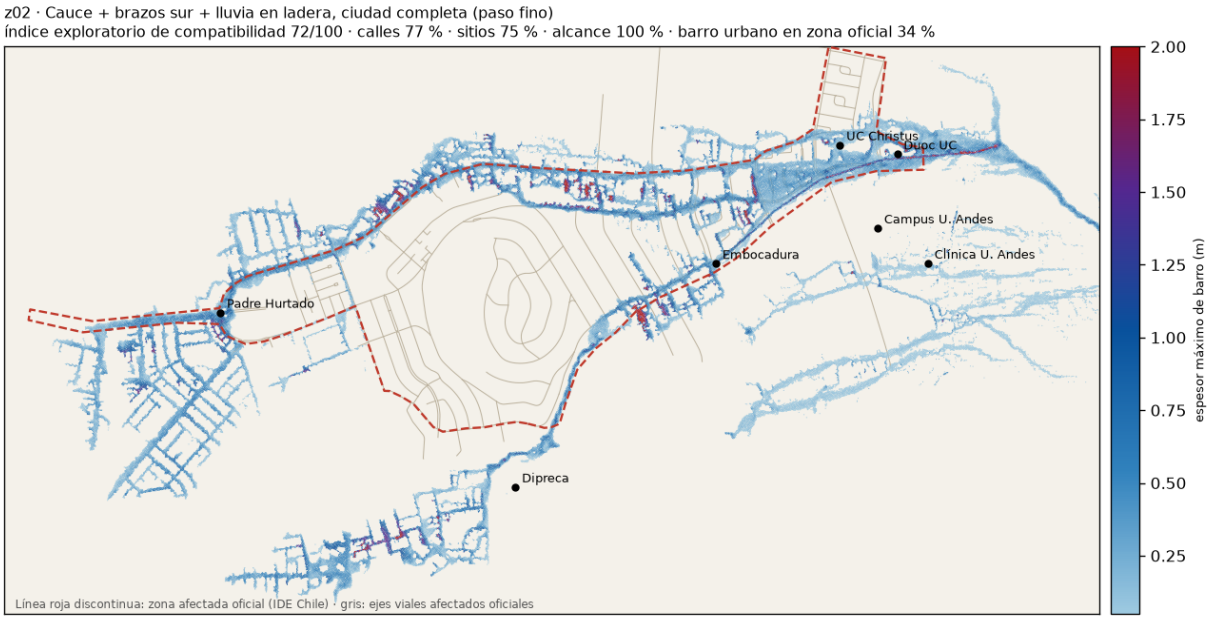

Figura 10: Ficha z02: Cauce + brazos sur + lluvia en ladera, ciudad completa (paso fino).

Ciudad completa

v01 · Solo cauce principal, colector con capacidad nula supuesta (300 mil m^3). Qué prueba: Todo el barro sale por el cauce principal al abanico, con los ductos de General Blanche y el colector de Bulnes Correa con capacidad nula supuesta (escenario hipotético). **Qué muestra:** Calculado: con los 42 mil edificios, el flujo se encauza por las calles; calcula 1,16 m en el entorno de la UC Christus (0,3 m con el terreno anterior), 1,9 m junto a Duoc UC, llega a 96 m de Padre Hurtado y moja Quebrada Honda. **Dónde falla:** No reproduce la afectación junto a la Clínica U. de los Andes, en La Plaza Sur ni en el campus. **Qué levanta:** Esta configuración no reproduce la afectación del sector sur. Los aportes desde ese sector constituyen una de las hipótesis consideradas para explicar la discrepancia. **Estado:** Referencia: IEC 68/100.

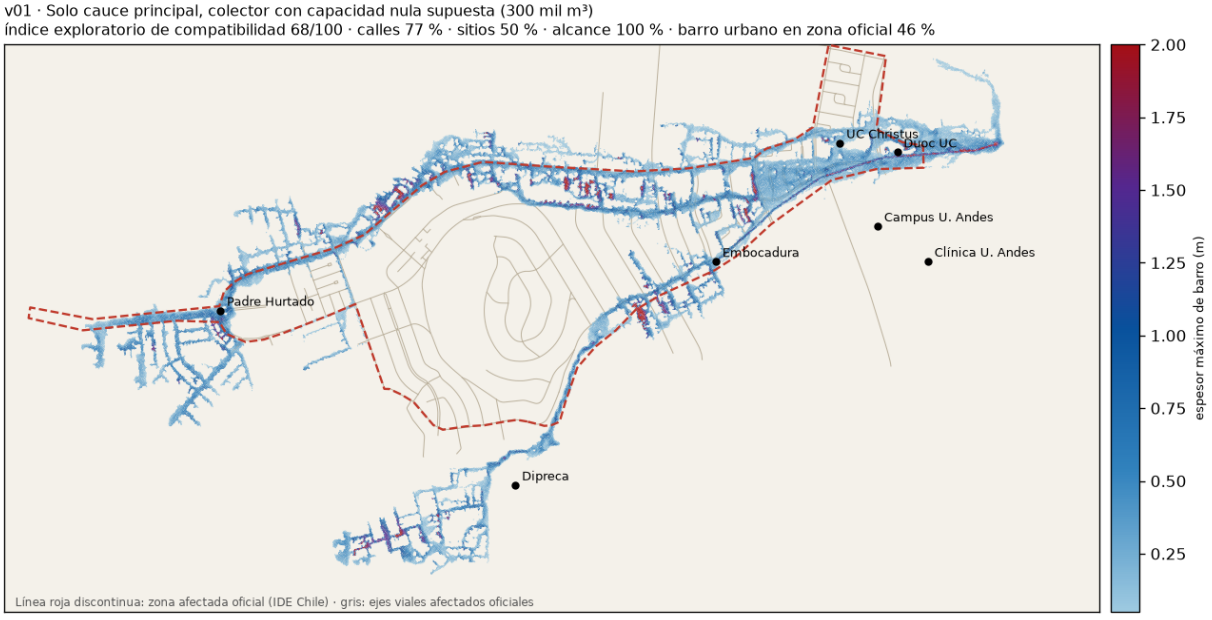

Figura 11: Ficha v01: Solo cauce principal, colector con capacidad nula supuesta (300 mil m^3).

v07 · Solo cauce principal con 150 mil m^3. Qué prueba: Igual que v01, pero con la mitad del volumen: el valor central de la primera estimación por lluvia. **Qué muestra:** Calculado: el frente se detiene a 348 m de Padre Hurtado. **Dónde falla:** No cumple el criterio de alcance. **Qué levanta:** En los escenarios

ensayados y bajo sus supuestos, unos 300 mil m^3 permiten reproducir el criterio de alcance; ese orden de magnitud es coherente con una estimación por lluvia que adopta la saturación del suelo informada por la autoridad. **Estado:** La configuración con el volumen bajo no cumple el criterio de alcance: IEC 67/100.

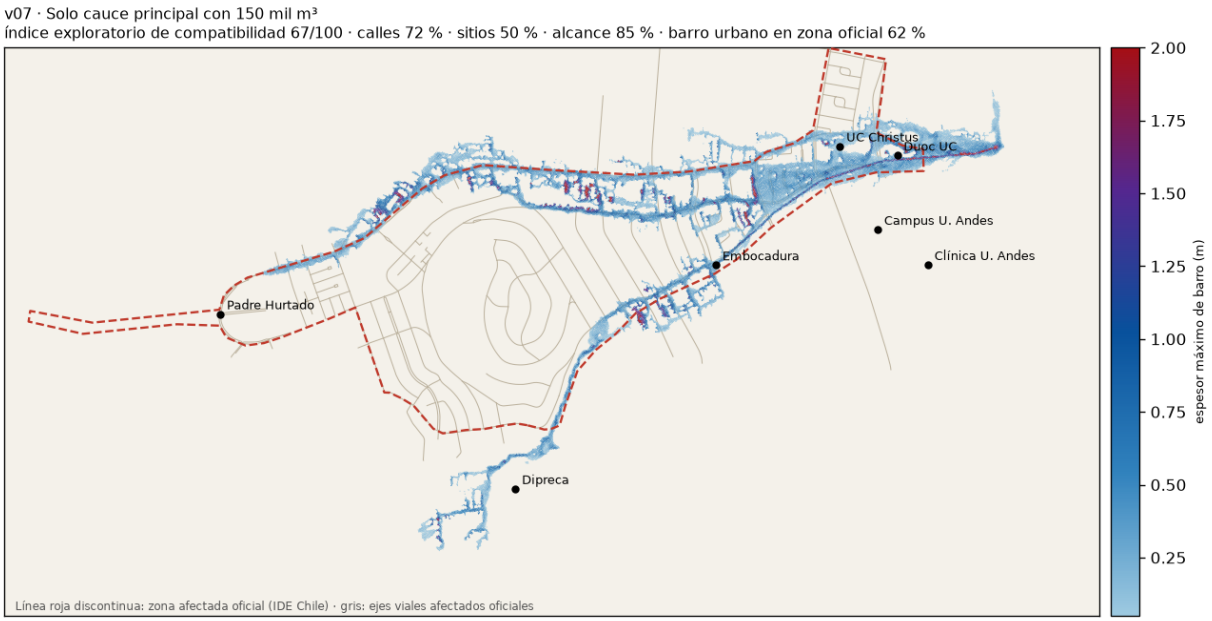

Figura 12: Ficha v07: Solo cauce principal con 150 mil m^3.

Campus U. Andes

v21 · Brazo sur por el cauce oficial, sin lluvia en ladera. **Qué prueba:** El brazo sur sigue el trazado de la red hidrográfica oficial hasta la parte alta de la Av. Álvaro del Portillo, donde se corta para representar la quebrada que colapsa. Sin lluvia en la ladera, para aislar su efecto. **Qué muestra:** Calculado: el barro del brazo sur llega a la avenida (0,48 m donde termina el cauce) y baja por ella hacia La Plaza y General Blanche, de forma compatible con lo informado por el vicerrector de la universidad y por Carabineros. **Dónde falla:** Sin la lluvia en la ladera no se reproduce la afectación junto a la Clínica U. de los Andes (0 m) y el flujo no alcanza la Biblioteca. **Qué levanta:** En las configuraciones comparadas, la lluvia sobre la ladera permite reproducir la afectación junto a la clínica, y el brazo sur genera un desborde compatible con el informado en el costado norte del campus. **Estado:** IEC 68/100.

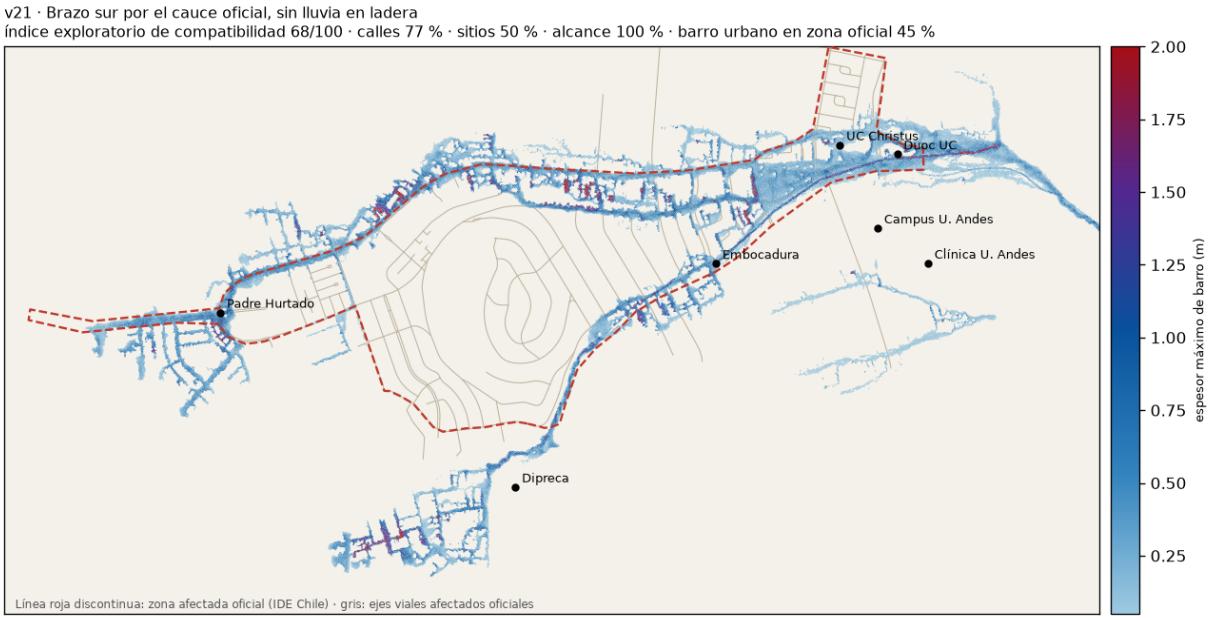

Figura 13: Ficha v21: Brazo sur por el cauce oficial, sin lluvia en ladera.

v19 · Brazo sur por el cauce oficial hasta Álvaro del Portillo + lluvia (paso fino). Qué prueba: La hipótesis actual con el brazo sur trazado según la cartografía oficial, para examinar si el flujo llega al campus y al Aula Magna. **Qué muestra:** Calculado: reproduce un desborde en la parte alta de Álvaro del Portillo y su descenso por la avenida, además de lo que logra z02. **Dónde falla:** El flujo simulado sigue por la avenida, de mayor pendiente (∼8 %) que el bosque hacia la Biblioteca (∼4 %), y no alcanza la depresión junto al edificio ni el punto de control del campus (1 cm). **Qué levanta:** Entre las explicaciones consideradas están un aporte mayor del brazo sur (v22–v24), una cuenca local propia de la Biblioteca (11,3 ha) que en esta configuración solo recibe lluvia en parte, un fluido más líquido en el faldeo (v29 y microsimulaciones) y un relieve local no resuelto por el terreno disponible. **Estado:** IEC 71/100; en análisis.

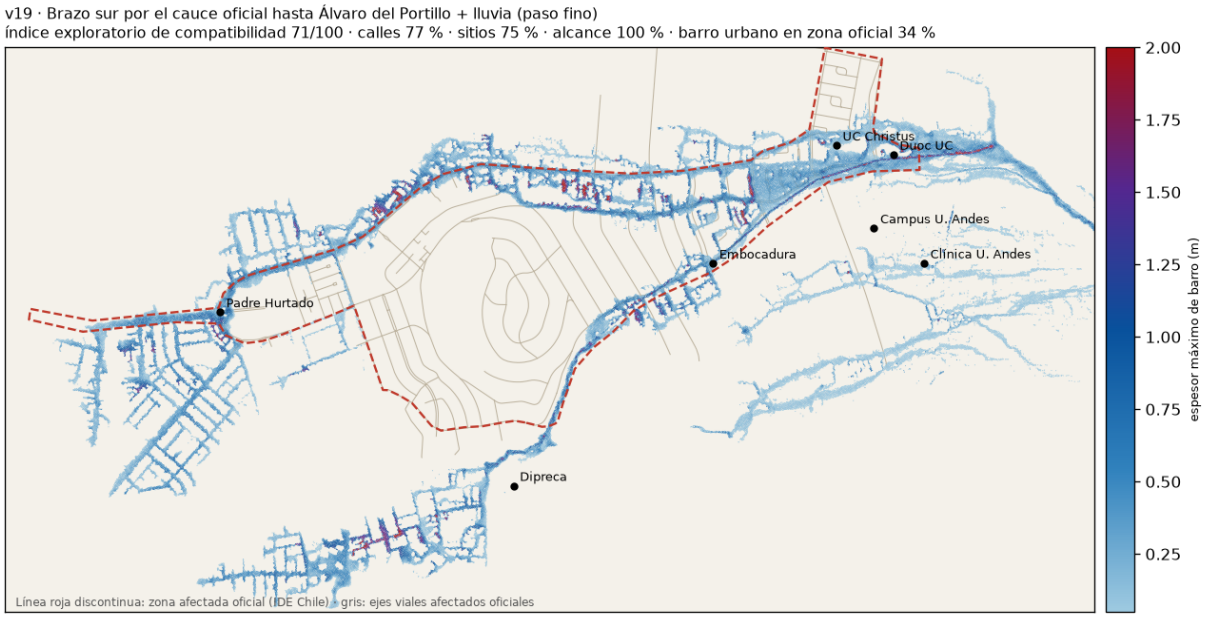

Figura 14: Ficha v19: Brazo sur por el cauce oficial hasta Álvaro del Portillo + lluvia (paso fino).

Colector de Bulnes Correa (escenarios hipotéticos)

v17 · Escenario hipotético: capacidad del colector fijada en 30 m^3/s. Qué prueba: Escenario hipotético con capacidad del colector fijada en 30 m^3/s y captura de toda la sección del cauce. La capacidad

y el estado reales del colector no son públicos. **Qué muestra:** Calculado: el colector modelado alcanza la capacidad impuesta (retira 67,6 mil m^3 a 30 m^3/s) y Quebrada Honda se moja en el 62 % de sus puntos. **Dónde falla:** — **Qué levanta:** Bajo los supuestos ensayados, una capacidad hipotética de 30 m^3/s resulta insuficiente para evitar el flujo hacia Quebrada Honda. No es una evaluación de la obra real. **Estado:** Referencia inferior del intervalo explorado en estos escenarios: IEC 69/100.

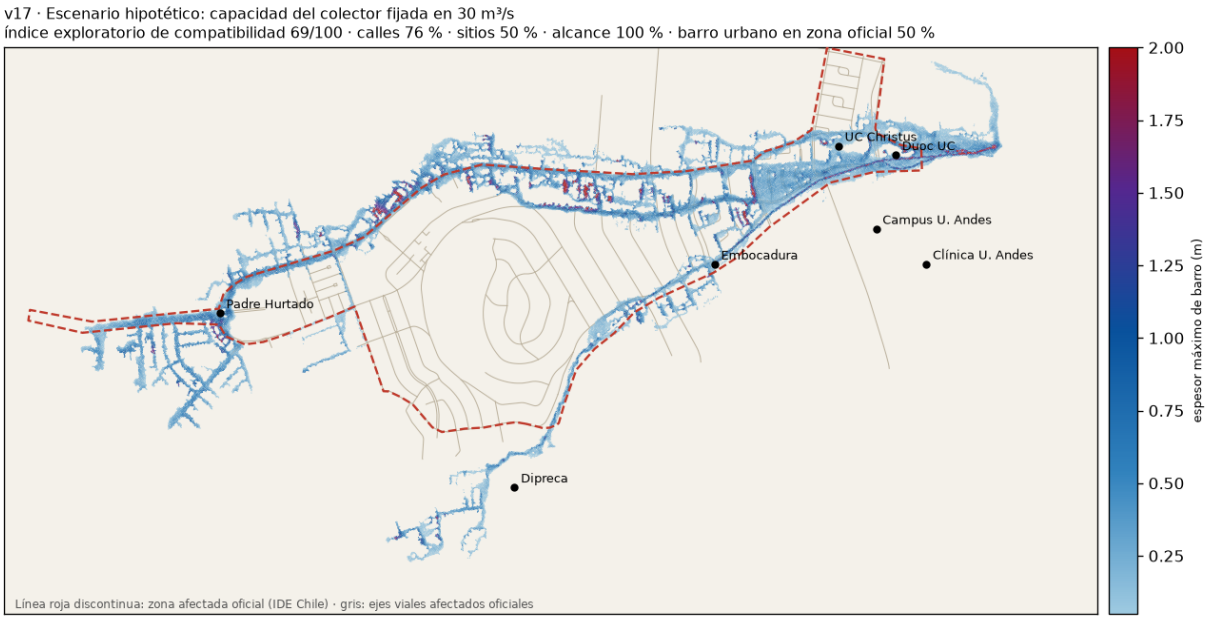

Figura 15: Ficha v17: Escenario hipotético: capacidad del colector fijada en 30 m^3/s.

v10 · Escenario hipotético: capacidad del colector fijada en 100 m^3/s. Qué prueba: Escenario hipotético de gran capacidad con captura de toda la sección del cauce. **Qué muestra:** Calculado: el colector modelado retira 94 mil m^3 con un pico de ∼64 m^3/s y Quebrada Honda queda seca. Con 200 m^3/s el resultado es el mismo, porque el caudal calculado de llegada no supera ∼65 m^3/s. **Dónde falla:** El escenario no reproduce la inundación informada en Quebrada Honda; esta discrepancia no permite establecer cómo funcionó el colector real. **Qué levanta:** Bajo los supuestos ensayados, la capacidad hipotética que evitaría el desborde se sitúa cerca de ∼65 m^3/s con captura completa. Un radio de captura de 12 m dejaba pasar el flujo por el costado del sumidero: era un artefacto de representación, ya corregido. **Estado:** Referencia superior del intervalo explorado en estos escenarios: IEC 68/100.

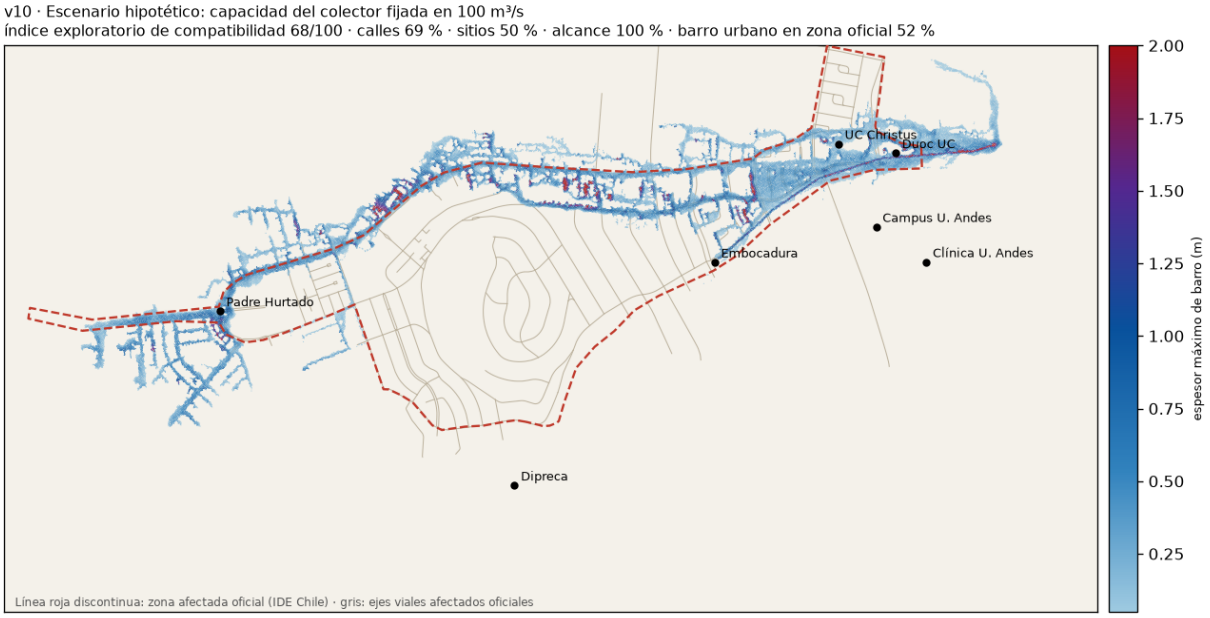

Figura 16: Ficha v10: Escenario hipotético: capacidad del colector fijada en 100 m^3/s.

Tipo de barro

v08 · Barro espeso (Glenwood 1, Cv 0,45). Qué prueba: Un barro más concentrado y viscoso (1.742 kg/m^3, fluencia 29 Pa). **Qué muestra:** Calculado: el frente se detiene a 396 m de Padre Hurtado. **Dónde falla:** No cumple el criterio de alcance. **Qué levanta:** Se considera como hipótesis un material intermedio entre este y el de referencia (Cv 0,43, v25); su correspondencia con el barro del evento no está establecida. **Estado:** Variante de mayor espesor: IEC 67/100.

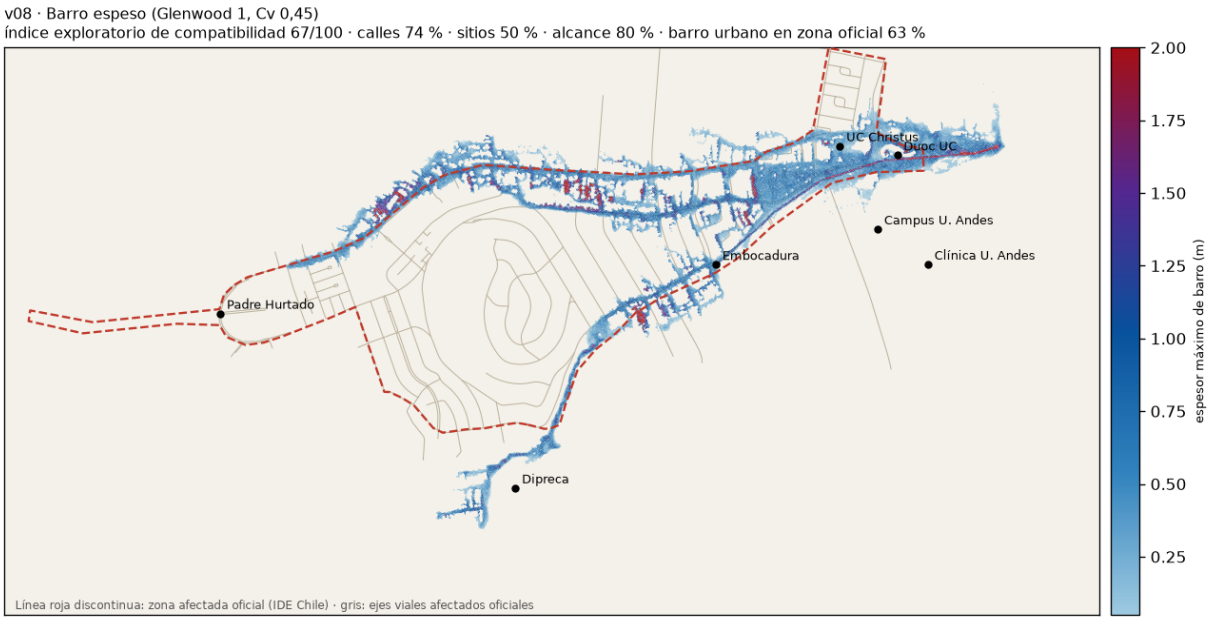

Figura 17: Ficha v08: Barro espeso (Glenwood 1, Cv 0,45).

v09 · Barro muy fluido (Aspen 2). Qué prueba: Un barro más fluido que el de referencia. **Qué muestra:** Calculado: resultado parecido al de referencia (IEC 70/100), con algo más de barro dentro de la zona oficial. **Dónde falla:** No llega al sector sur (sin brazos sur ni lluvia). **Qué levanta:** El IEC varía poco entre los materiales ensayados; esa variación no resume por sí sola los cambios de alcance, profundidad o velocidad. **Estado:** Sensibilidad del índice al material: baja. IEC 70/100.

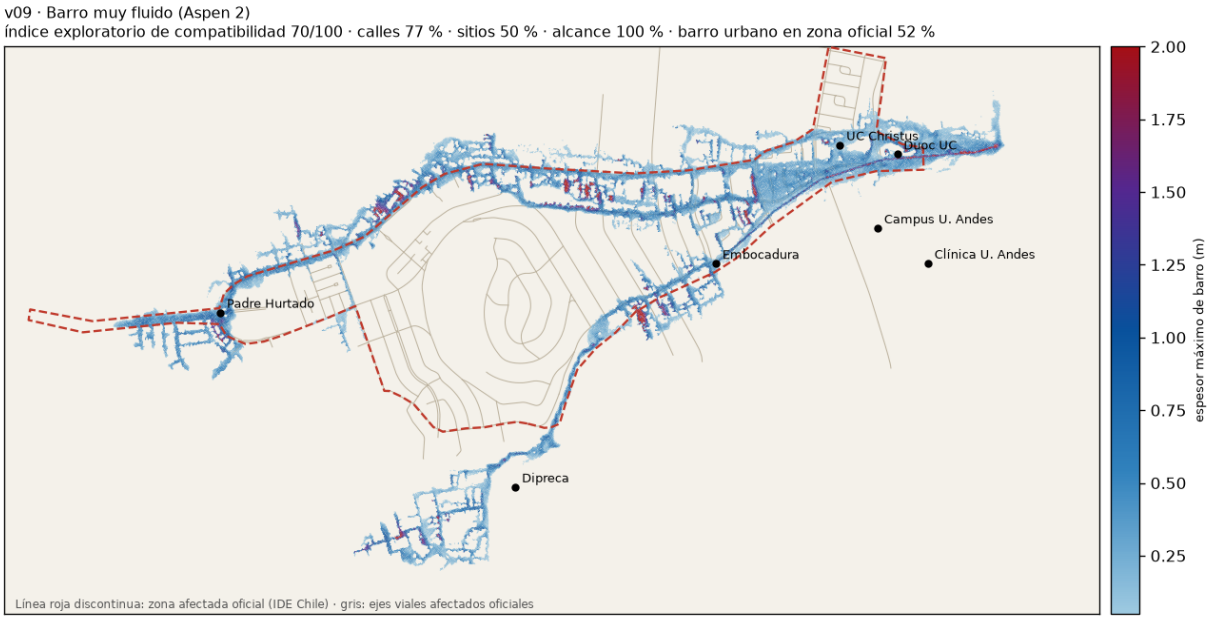

Figura 18: Ficha v09: Barro muy fluido (Aspen 2).

Terreno anterior (primera generación)

e04 · Cauce + colector con capacidad nula supuesta, terreno con 1.103 edificios. Qué prueba: La configuración seleccionada en la primera generación (9 de octubre), con solo 1.103 edificios representados y el criterio de perímetro de prensa. **Qué muestra:** Calculado: el flujo se reparte más en superficie (93 ha dentro de la zona oficial) con láminas más delgadas y llega a Padre Hurtado. **Dónde falla:** Calcula solo 0,3 m en el entorno de la UC Christus (la fuente consultada informó cerca de 1 m). **Qué levanta:** Representar todos los edificios cambió los resultados; la representación mediante bloques impermeables podría intensificar el encauzamiento respecto de una que permita retención en edificios (v26). **Estado:** Superada por las simulaciones con la ciudad completa: IEC 68/100.

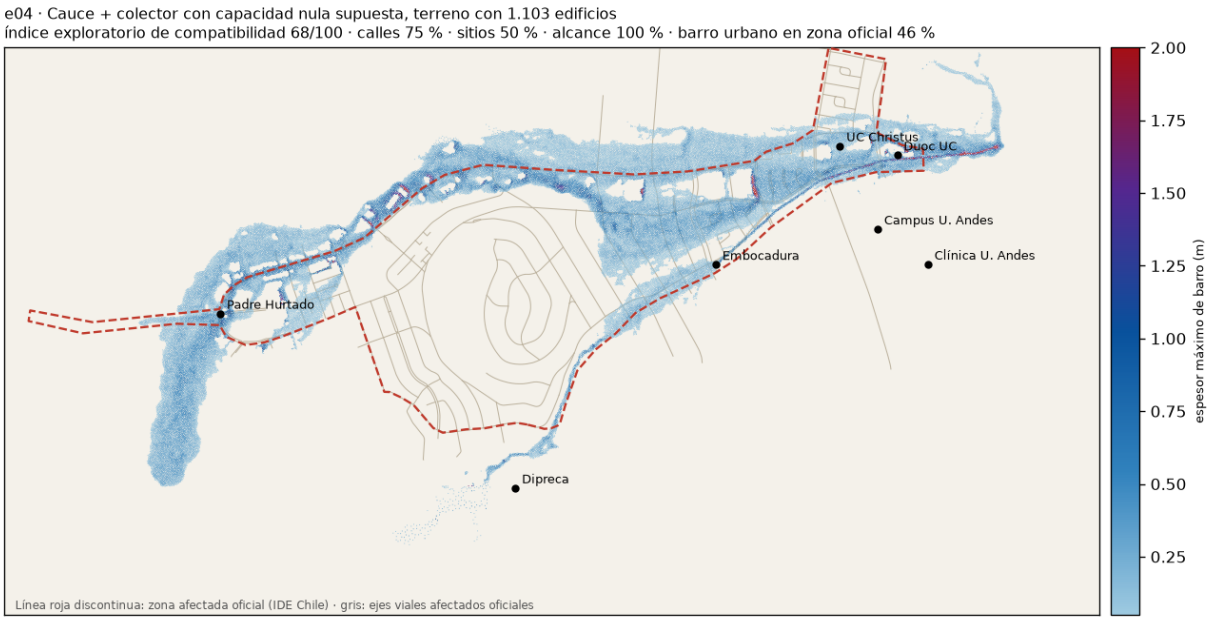

Figura 19: Ficha e04: Cauce + colector con capacidad nula supuesta, terreno con 1.103 edificios.

f03 · Abanico + embocadura + lluvia en ladera, terreno anterior. Qué prueba: La primera simulación con lluvia sobre la ladera, con el terreno anterior. **Qué muestra:** Calculado: fue la primera en producir flujo junto a la Clínica U. de los Andes y en La Plaza Sur. **Dónde falla:** Espesor bajo en el entorno

de la UC Christus y extensión fuera de la zona oficial. **Qué levanta:** Dio origen a la hipótesis actual (cauce + brazos sur + lluvia). **Estado:** IEC 71/100.

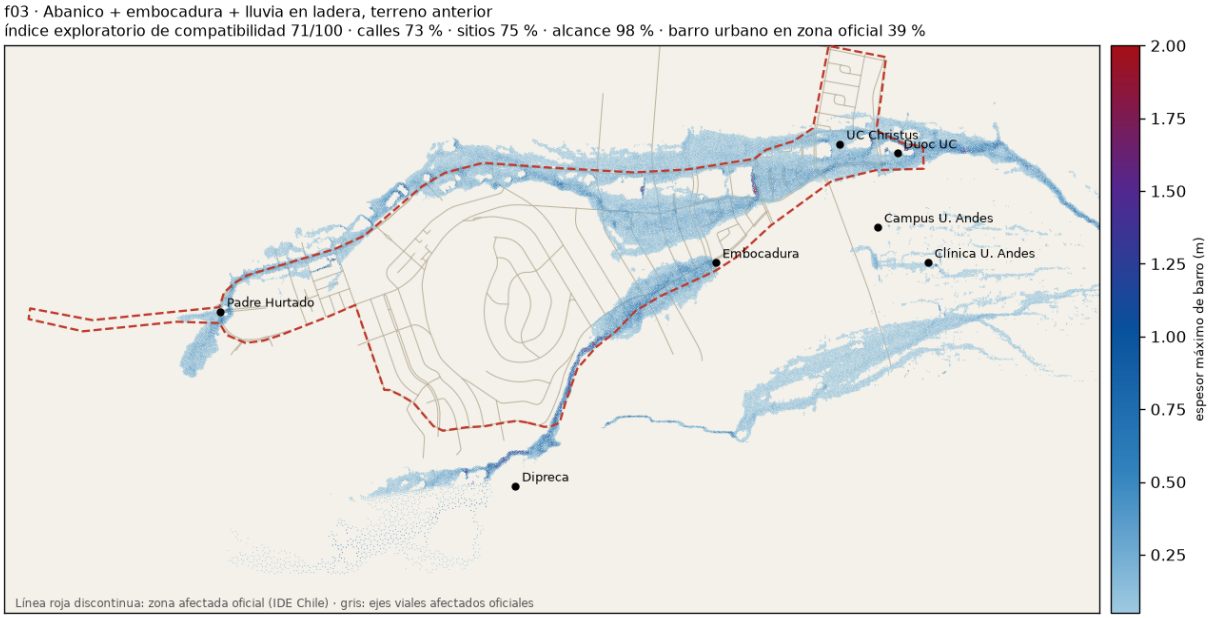

Figura 20: Ficha f03: Abanico + embocadura + lluvia en ladera, terreno anterior.

e03 · Solo desborde en la embocadura (H2). **Qué prueba:** Que todo el barro haya salido por el desborde del canal en Francisco Bulnes Correa. **Qué muestra:** Calculado: moja Quebrada Honda, pero nada del abanico. **Dónde falla:** No reproduce General Blanche, Camino El Alba, Duoc UC ni la UC Christus. **Qué levanta:** Las fuentes consultadas informaron un desborde en Bulnes Correa. La simulación e03 no reproduce por sí sola el conjunto de observaciones. **Estado:** No reproduce por sí sola el conjunto de observaciones bajo los supuestos y el terreno de e03: IEC 16/100.

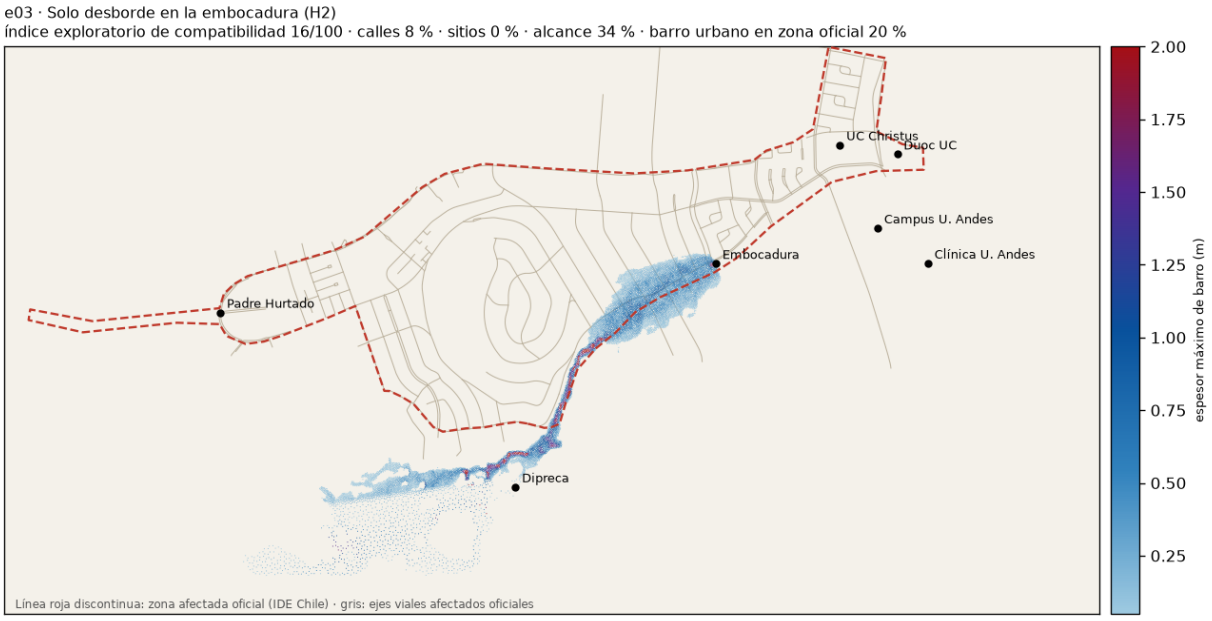

Figura 21: Ficha e03: Solo desborde en la embocadura (H2).