



### Efectividad y límites de la independencia de escala en las huellas deposicionales de un abanico aluvial experimental

#### *Effectiveness and limits of scale independence in the depositional signatures of an experimental alluvial fan*

Rosario Florín<sup>(1)</sup>, Bruno Mazzorana<sup>(1), (2)\*</sup>, Ivan Rojas<sup>(3)</sup>, Pablo Iribarren<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Procesos Superficiales, Valdivia 5090000, Chile.

<sup>(2)</sup> Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra, Valdivia 5090000, Chile.

<sup>(3)</sup> Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Gradados, Valdivia 5090000, Chile.

\*Corresponding author: Bruno Mazzorana – tel: 0056966515334;

email: [bruno.mazzorana@uach.cl](mailto:bruno.mazzorana@uach.cl); address: Campus Isla 9 Teja, Edificio Pugin, office 339, 5090000, Valdivia, Chile

#### Resumen

Los abanicos aluviales constituyen entornos atractivos para el desarrollo de asentamientos humanos en zonas montañosas, no obstante, su evolución dinámica conlleva un importante riesgo para la población e infraestructura aledaña. En las últimas décadas ha habido un notable desarrollo en el estudio de estas formas de terreno desde un enfoque experimental, sin embargo, existen limitaciones fundamentales al aplicar los principios del escalamiento clásico para representar estos sistemas. Por lo tanto, es necesario evaluar cuán capaces son los modelos de capturar la dinámica de los paisajes naturales y avanzar hacia una comprensión cuantitativa sobre la efectividad y límites de la independencia de escala natural en la morfodinámica. Para ello realizamos una serie de lanzamientos experimentales con flujos cargados de sedimentos en un modelo físico de abanico aluvial replicado en dos escalas diferentes (1:1 y 3:4). Las áreas de exposición asociadas a cada experimento se cuantificaron y mapearon en SIG. Luego, para evaluar el grado de similitud estadística de los patrones al variar la escala del modelo se generaron mapas de probabilidad de exposición, análisis estadístico descriptivo e inferencial de los porcentajes de exposición y análisis estadístico espacial de la distribución de la probabilidad de exposición. Los resultados obtenidos evidenciaron variaciones estadísticas significativas en la dinámica distributiva de ambos modelos, reflejando una disimilitud en la cinemática de los procesos que ocurren en el abanico, lo cual lleva a concluir que, al menos para un modelo bajo condiciones de flujo no confinado similar al utilizado en este estudio, la independencia de escala no aplica totalmente. Esto implica que los modelos a escala reducida deben utilizarse con precaución, especialmente para el estudio de riesgos en abanicos reales, ya que la respuesta en términos estadísticos sobre la indicación del peligro presenta discrepancias significativas al variar la escala del modelo utilizado.

**Palabras clave:** abanico aluvial, independencia de escala, modelos físicos, geomorfología experimental.



## Abstract

Alluvial fans constitute attractive environments for human settlements in mountainous areas, however, their dynamic evolution entails a significant risk to the surrounding population and infrastructure. In recent decades there has been a remarkable development in the study of these landforms from an experimental approach, nevertheless, there are fundamental limitations in applying the principles of classical dynamical scaling to represent these systems. Therefore, it is necessary to assess how capable models are of capturing the dynamics of natural landscapes and to advance towards a quantitative understanding of the effectiveness and limits of natural scale independence in morphodynamics. To this aim, we performed a series of experiments with sediment-laden flows on a physical model of alluvial fan replicated at two different scales (1:1 and 3:4). The exposed areas associated with each experiment were quantified and mapped in a GIS. Exposure probability maps, descriptive and inferential statistical analysis of exposure percentages, and spatial statistical analysis of the exposure probability distribution were then conducted to evaluate the degree of statistical similarity of the patterns as the scale of the model was varied. The results obtained showed significant statistical variations in the distributary dynamics of both models, reflecting a dissimilarity in the kinematics of the processes occurring in the fan, which leads to the conclusion that, at least for a model under unconfined flow conditions similar to the one used in this study, scale independence does not fully apply. This implies that small-scale models should be used with caution, especially for the study of hazards in real alluvial fans, since the response in statistical terms on the indication of the hazard presents significant discrepancies when varying the scale of the model used.

**Keywords:** alluvial fan, scale independence, physical modelling, geomorphological experiments.

## 1. Introducción

Los abanicos aluviales son depósitos de material sedimentario que suelen desarrollarse en la base de los frentes de las montañas cuando una corriente que desciende por un valle estrecho y empinado emerge hacia una zona de menor pendiente y de relieve no confinado (Colombo, 2010). La desaceleración brusca del flujo por la ruptura de pendiente y la pérdida de encajamiento del canal producen el depósito de sus cargas en un patrón radiante, formando un cuerpo con forma de segmento de cono (Bull, 1977; Blair y McPherson, 1994) que presenta un perfil longitudinal cóncavo y un perfil transversal convexo (Clevis *et al.*, 2003). Estas formas terrestres son comunes en casi todos los ambientes climáticos de la Tierra (Antronico *et al.*, 2015) y juegan un rol fundamental en los sistemas fluviales de las montañas al acoplar las cuencas hidrográficas y los desagües aguas abajo (Harvey, 2002), ejerciendo un control importante en la transferencia de sedimentos actuando como áreas de almacenamiento temporal (Clarke, 2015). Además, son entornos propensos al desarrollo de asentamientos humanos en

zonas montañosas y altamente pobladas, ya que suelen parecer sitios adecuados para una amplia variedad de actividades que van desde la agricultura hasta la vivienda, instalaciones industriales o rutas de transporte (Santangelo *et al.*, 2011). Sin embargo, estas formas de relieve se caracterizan por ser dinámicas, presentando cambios episódicos y, en ocasiones, abruptos, lo que las hace vulnerables ante peligros relacionados con cambios de flujo y riesgos de inundación (Okunishi y Suwa, 2001; Mazzorana *et al.*, 2020). Por esta razón, se ha evidenciado la importancia de considerar los procesos de formación de canales, la morfología de los abanicos y las condiciones de flujo, en la formulación de mapas de riesgo (Zarn y Davies, 1994).

La evolución de los abanicos aluviales está dominada por forzamientos alogénicos (correspondientes a fuerzas externas al sistema del abanico, tales como características de los caudales líquidos y sólidos, tectónica, clima y cambios del nivel de base) que interactúan con las morfologías preexistentes dando lugar a procesos autógenos (es decir, retroalimentaciones internas tales como avulsiones,

depósito remontante, etc), lo cual provoca que la propagación del flujo cargado de sedimentos a menudo resulte impredecible (Blair y McPherson, 2009; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2019; Mokarram *et al.*, 2021). La interacción compleja entre todos estos factores implica que sea difícil aislar los impactos individuales de cada uno de ellos en el campo (Clarke, 2015). Además, la escala de tiempo (geomorfológica a geológica) en que ocurren estos procesos y la naturaleza periódica de los eventos dificulta su monitoreo en terreno, ya que la evolución morfodinámica de estos sistemas suele ser intermitente y a menudo ocurre durante eventos de alta energía. Esto ha llevado a un notable desarrollo en el estudio de los abanicos aluviales desde un enfoque experimental, que se remonta a la década de 1960 (Hooke, 1967; Hooke, 1968; Schumm, 1977; Hooke y Rohrer, 1979; Schumm *et al.*, 1987). Las condiciones controladas que ofrece el trabajo en laboratorio permiten aislar variables y procesos individuales y explorar diversas condiciones de entrada y de borde, además de posibilitar la observación de procesos geomorfológicos y geológicos a una escala temporal mucho más pequeña, favorecer la interpretación de eventos esporádicos que son difíciles de investigar in situ (como las avulsiones) y monitorear las condiciones de la superficie y topografía durante la evolución completa del abanico (Clarke, 2015).

Peakall *et al.* (1996) sugirieron que los modelos experimentales pueden clasificarse por su especificidad, es decir, el grado en que el modelo replica un prototipo. Así, pueden corresponder a réplicas individuales del prototipo de campo escaladas por el número de Froude, o bien, servir como análogos experimentales sin escala que intentan reproducir algunas propiedades del prototipo. Uno de los pioneros en aplicar el trabajo experimental al estudio de abanicos aluviales fue Roger Hooke (1968) quien estudió la morfología del abanico y los mecanismos de transporte de los sedimentos utilizando un modelo de similitud por proceso; esto quiere decir que no pretende ser un modelo a escala de un prototipo específico en el campo, sino que utiliza la

autosimilitud para producir un modelo independiente. Desde entonces, diversos trabajos han demostrado la utilidad del modelado experimental como herramienta de análisis para el estudio de la dinámica de los abanicos aluviales y la comprensión de la relación forma-proceso en estos sistemas, abarcando áreas diversas tales como el impacto de los factores alogénicos en la morfología y evolución de los abanicos (Hooke y Dorn, 1992; Guerit *et al.*, 2014), la integridad de la preservación de registros estratigráficos (Straub y Esposito, 2013; Straub y Wang, 2013), la influencia de los procesos autógenos en los patrones de flujo y morfología resultante (Whipple *et al.*, 1998; van Dijk y Postma, 2008; van Dijk *et al.*, 2009, 2012; Clarke *et al.*, 2010; Reitz *et al.*, 2010; Hamilton *et al.*, 2013; ) y la evaluación del peligro de inundación (Zarn y Davies, 1994; Cazanacli *et al.*, 2002; Davies *et al.*, 2003). Este enfoque analógico se basa en la teoría de que los aspectos importantes de la morfodinámica de estos sistemas son independientes de la escala en un amplio rango de escala. Sin embargo, si bien se han utilizado micromodelos para representar prototipos específicos en el campo e incluso para formular mapas tentativos de riesgo de inundación (Straight, 1992; Clarkson, 1999) el éxito en la aplicación de estos mapas a la realidad es discutible, dada la complejidad de los abanicos naturales en comparación con las condiciones experimentales utilizadas y debido a que el impacto de la escala del modelo a menudo puede distorsionar el dominio de ciertas morfologías y procesos de flujo (Clarke, 2015). El escepticismo frente a la geomorfología y estratigrafía experimental surge principalmente porque en la actualidad no se comprende bien cuán representativos son estos modelos de los sistemas a escala de campo, ya que desde el enfoque del escalamiento clásico existen problemas formidables que deben abordarse y que, de hecho, en la mayoría de los casos no se resuelven completamente (Peakall *et al.*, 1996; Paola, 2000; Paola *et al.*, 2009).

El escalado dinámico clásico se basa en el análisis dimensional para diseñar experi-

mentos que permitan estudiar un fenómeno hidráulico y predecir el comportamiento de un flujo prototipo, mediante una representación a escala con condiciones de flujo controladas. Este tipo de modelos pueden proporcionar información relevante y confiable si es diseñado adecuadamente bajo criterios de similitud con el fenómeno real o prototipo (Chanson, 2004). Se dice que las condiciones de flujo del modelo físico son similares a las del prototipo si el modelo muestra similitud de forma (geométrica), similitud de movimiento (cinemática) y similitud de fuerzas (dinámica). El objetivo del escalado dinámico clásico es que las mediciones realizadas en el modelo puedan ampliarse y aplicarse al prototipo mediante el uso de números adimensionales. De este modo, si todos los números adimensionales relevantes coinciden entre el experimento y el prototipo, cualquier medida realizada en el experimento se puede convertir mediante una transformación algebraica simple a un valor de campo equivalente (Yalin, 1971; Peakall *et al.*, 1996). Para un prototipo que involucra flujos líquidos, las variables adimensionales principales son el número de Froude ( $Fr$ ) y el número de Reynolds ( $Re$ ).

Desafortunadamente, cumplir con estas condiciones en experimentos que involucran flujo de agua y transporte de sedimentos resulta imposible, ya que no existe una forma práctica de escalar adecuadamente dentro del modelo ciertos parámetros del campo, como la baja viscosidad cinemática del agua o la presencia de sedimentos finos (Paola *et al.*, 2009). Esto impide igualar simultáneamente todas las variables adimensionales involucradas, lo cual implica que los experimentos posiblemente no sean equiparables con un sistema natural (Clarke, 2015). Por esta razón, usualmente el escalamiento se realiza bajo una ley de semejanza donde se eliminan aquellos números adimensionales cuya intervención es nula o poco relevante. En particular, para el diseño de modelos de obras hidráulicas con flujo a superficie libre, donde el flujo se ve sujeto a fuerzas dinámicas y fuerzas de peso, se utiliza la similitud de Froude, que caracteriza la rela-

ción entre la fuerza de inercia y la fuerza de gravedad (Chanson, 2004).

Aun así, de acuerdo con los casos documentados por Paola *et al.* (2009) en su revisión de estratigrafía experimental y geomorfología, parece ser que los modelos de laboratorio logran capturar la esencia de muchos procesos importantes que ocurren en los sistemas naturales de manera que la autoorganización morfodinámica en los experimentos crea patrones espaciales y cinemáticos notablemente similares a los observados en el campo. Esta consistencia observada entre los sistemas experimentales y de campo a pesar de la ausencia de una escala dinámica estricta es lo que estos autores denominan “efectividad irracional” (Wigner, 1960) y sugieren que ésta surge de una aparente independencia de escala en la naturaleza anunciada a través de la autosimilitud que presentan algunos sistemas naturales. Sin embargo, en la actualidad no se sabe cuán extendida es la independencia de escala natural en la morfodinámica (Paola *et al.*, 2009), y si bien los experimentos han demostrado ser herramientas de análisis muy útiles (Martin *et al.*, 2009), es necesario evaluar cuán capaces son de capturar la dinámica de los sistemas naturales. Por esta razón se hace necesario avanzar hacia una comprensión cuantitativa de los orígenes y los límites de la independencia de escala, para lo cual los experimentos son una fuente indispensable de información. En la búsqueda de nuevos hallazgos sobre este tema, se definió para esta investigación el propósito principal de generar flujos bifásicos en el canal alimentador de un abanico aluvial experimental replicado en dos escalas diferentes y analizar de manera cuantitativa el grado de similitud estadística de los patrones distributivos resultantes al variar la escala del modelo.

Por otro lado, el comportamiento distributivo en un abanico aluvial involucra cierta aleatoriedad en los procesos, lo cual se evidencia en la variabilidad de frecuencias y localización espacial de fenómenos incluso bajo las mismas condiciones de carga y borde (Blasi *et al.*, 2023). Lo anterior implica que es necesario

realizar un mismo experimento repetidas veces para obtener resultados válidos y representativos desde el punto de vista estadístico. El mínimo de repeticiones necesario depende de la variabilidad de los procesos observados y, por tanto, del sistema y fenómeno que se quiera estudiar. En este caso, con el fin de establecer un tamaño representativo de muestra para el estudio, se escogió abordar el problema experimentalmente comparando los resultados obtenidos a partir de distinto número de repeticiones y analizando en qué medida varía estadísticamente la respuesta al aumentar el número de experimentos y en qué momento la varianza de la respuesta se estabiliza.

Para cumplir con dichos propósitos se trazaron los siguientes objetivos:

- i. Diseñar, elaborar y ejecutar un programa experimental con un modelo de abanico aluvial de flujo bifásico replicado en dos escalas diferentes
- ii. Mapear y cuantificar las áreas que resultaron expuestas en el abanico aluvial luego de cada experimento
- iii. Analizar estadísticamente los porcentajes de área expuesta asociados a cada configuración experimental
- iv. Analizar estadísticamente la distribución espacial de la probabilidad de exposición asociada a cada configuración experimental
- v. Comparar los patrones producidos al variar la escala del modelo y analizar si estos presentan una variación estadística significativa
- vi. Comparar los patrones producidos al variar el número de repeticiones y analizar si estos presentan una variación estadística significativa

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera: La sección 2 está dedicada a los materiales y métodos empleados. Allí se detallan

las características del montaje experimental y su funcionamiento, el diseño del programa experimental y los principios aplicados para el escalamiento tanto del modelo físico como de las condiciones de carga. Además, se explica el procedimiento para la detección y cuantificación de las áreas expuestas, así como para la generación de las diferentes herramientas de análisis estadístico utilizadas. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos y en la sección 4 se discute sobre las implicancias de estos hallazgos para la geomorfología experimental y la evaluación de riesgos. Se concluye el artículo con proyecciones del trabajo y alcances para futuras investigaciones respecto a la independencia de escala y la capacidad de los experimentos de laboratorio para reproducir la estructura espacial y cinemática de los sistemas naturales.

## 2. Metodología

### 2.1 Antecedentes generales

Se utilizó un modelo experimental que pudiera reproducir de manera simplificada la geometría de un abanico aluvial natural basándose en el concepto de “similitud de proceso” de Roger Hooke, de modo que no corresponda a una versión a escala de un verdadero abanico en el campo sino a un pequeño prototipo independiente capaz de exhibir las características principales de un abanico aluvial y que, a pesar de su sencillez, permita controlar y medir los parámetros de carga, así como observar y analizar la respuesta del sistema en cuanto a los patrones distributivos en su superficie. Posteriormente, se construyó una réplica de este modelo a una escala geométrica correspondiente a 3:4 de las piezas originales y se definió un programa experimental que se ejecutó en ambos abanicos obteniendo los registros en video para su posterior análisis. A partir de los fotogramas finales de cada experimento se identificaron y cuantificaron las áreas expuestas por agua y por sedimento, y se utilizaron estos resultados para comparar los patrones geomorfológicos producidos por ambos modelos y evaluar su similitud me-

dian­te distintas herramientas de análisis esta­dístico espacial, descriptivo e inferencial. Los métodos estadísticos empleados para este análisis consistieron en mapas de probabili­dad de exposición, elipses de desviación es­tán­dar, diagramas de caja y la prueba t-Student. Cabe señalar que los mismos métodos utilizados para comparar los patrones resul­tantes al variar la escala del modelo se utiliza­ron para comparar los patrones resultantes al variar el número de repeticiones.

En esta sección se presenta, en primer lugar, la configuración del modelo experimental y programa experimental utilizados. Luego, se describen los pasos analíticos realizados para mapear la exposición resultante de la propa­gación del flujo cargado de sedimentos en la superficie del abanico aluvial para cada ejecu­ción experimental. Y, finalmente, se describen las herramientas estadísticas utilizadas para evaluar el grado de similitud de los patrones obtenidos.

## 2.2. Modelo experimental

### 2.2.1 Prototipo

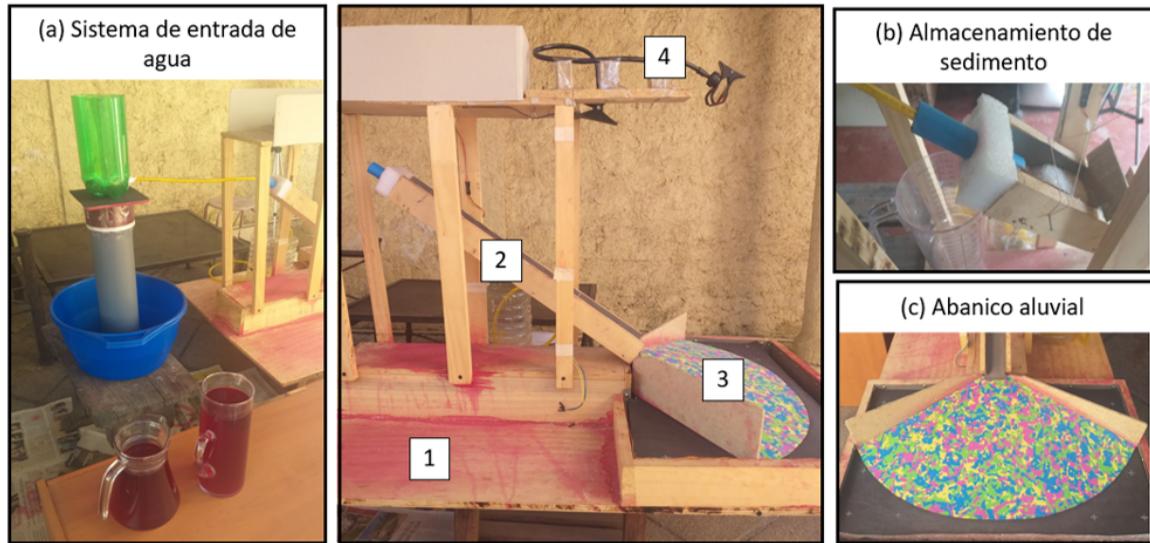
La configuración del modelo experimental utilizado consta de cinco componentes des­armables: la plataforma de madera, el canal alimentador, la superficie cónica, el sistema de grabación y el sistema de entrada de agua (Figura 1). La plataforma de madera posee di­mensiones de 1,2x70x110 cm y se subdivide en dos secciones: el compartimiento de ele­vación del canal y la zona de exposición sobre la cual se ubica el abanico aluvial. El canal de madera posee una longitud de 60 cm y una sección de 5x5,4 cm y se encuentra imper­meabilizado con papel vinílico. En su interior cuenta con una compuerta para controlar el lanzamiento del sedimento, la cual se abre manualmente al ejecutar el experimento. El abanico aluvial fue confeccionado a partir de una impresión 3D compuesta por tres piezas: dos piezas iguales que corresponden a la sex­ta parte de la superficie de un cono de radio basal 34 cm y altura 7 cm, y una tercera pieza

con forma de cuña cuyas dimensiones son 34 cm de largo, 7 cm de alto y 6 cm de ancho. Ambas piezas unidas forman una figura no maciza similar a una sección cónica, la cual se encuentra revestida por pliegos de etilvi­nilacetato (EVA), confinada por paredes late­rales de madera e instalada sobre una base de plumavit impermeabilizada con papel vi­nílico. El sistema de grabación consistió en un smartphone sujeto, mediante un soporte para celular, a una placa de madera que se encuentra unida a la plataforma mediante tablas atornilladas. Por último, el sistema de entrada de agua consistió en un estanque de plástico con un orificio en su parte inferior al cual se adhirió una manguera de bencina. A partir del principio de Torricelli fue posible medir y controlar el caudal del flujo que sale por la man­guera en función de  $h$  (la altura de la botella desde el orificio) y  $r$  (el radio de la manguera), utilizando la expresión:  $Q = \pi r^2 C_o \sqrt{2gh}$ . El coeficiente de velocidad  $C_o$  se calculó empí­ricamente en cada caso igualando el caudal teórico al caudal real dado por  $Q = \frac{V}{t}$ . Para que el caudal sea constante, la botella debe permanecer rebosada del líquido durante todo el experimento, por lo cual se utilizaron dos jarras para añadirle agua de manera per­manente y un recipiente de mayor tamaño para recolectar el agua sobrante. Además, un tubo de PVC unido al recipiente recolector sir­vió de soporte para mantener la botella a una altura fija y así evitar inclinaciones de la man­guera que pudieran afectar la velocidad de salida del fluido. El detalle del procedimiento experimental se explica en la Figura 2.

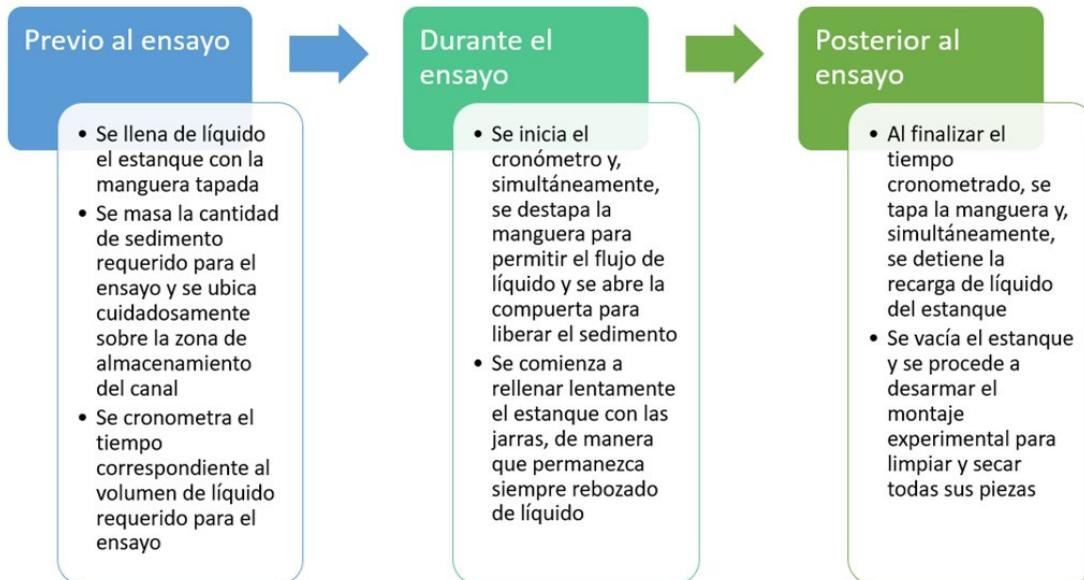
El líquido utilizado fue agua con colorante rojo para facilitar la identificación visual de las áreas expuestas y el material sedimenta­rio empleado fue cuarzo, con una densidad conocida de 2,58 g/cm<sup>3</sup>.

### 2.2.2. Escalamiento geométrico

La similitud geométrica implica que la rela­ción entre dimensiones homólogas de mode­lo y prototipo sean iguales (Chanson, 2004). Es decir, que todas las dimensiones del siste-



**Figura 1.** Estructura principal del montaje experimental (panel central) compuesto por: plataforma (1), canal alimentador (2), abanico aluvial (3) y sistema de grabación (4). Sistema de entrada de agua (panel a). Zona de almacenamiento de sedimento y compuerta manual (panel b). Abanico aluvial sobre la zona de exposición (panel c).  
**Figure 1.** Main structure of the experimental setup (central panel) composed of: platform (1), feeder channel (2), alluvial fan (3), and recording system (4). Water inlet system (panel a). Sediment storage area and manual gate (panel b). Alluvial fan over the exposure area (panel c).



**Figura 2.** Diagrama de flujo que detalla la metodología llevada a cabo antes, durante y después de cada lanzamiento experimental.

**Figure 2.** Flowchart detailing the methodology carried out before, during, and after each experimental run.

ma en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala de longitudes, de manera que se cumpla:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m}$$

donde  $L_p$  es una longitud en el prototipo,  $L_m$  es la longitud homóloga en el modelo y  $L_e$  es la escala de longitudes que establece la relación geométrica entre ambos sistemas.

Utilizando este principio se construyeron réplicas geoméricamente escaladas tanto para el canal alimentador como para el abanico aluvial, a una escala 3:4 del prototipo y a partir de los mismos materiales que constituyen las piezas originales. Las dimensiones de las piezas resultantes se presentan en la Figura 3.

### 2.3. Programa experimental

Se determinó una configuración experimental específica para el prototipo luego de realizar una serie de experimentos preliminares variando de manera aislada distintos parámetros tales como la pendiente del canal alimentador, el caudal de la corriente, el diámetro del cuarzo, el volumen total del flujo y la fracción de sedimento contenida. De las distintas combinaciones se escogieron las condiciones que resultaron más favorables para la apreciación de la dinámica distributiva del abanico. La configuración experimental resultante está dada por una pendiente del canal de 35°, un caudal de 36,5 cm<sup>3</sup>/s, un diámetro de cuarzo de 1,5 mm (media), un volumen total de 0,8 l y una fracción sólida de 6%.

Posteriormente, estas condiciones de carga fueron escaladas mediante las ecuaciones dadas por la similitud de Froude (Chanson, 2004) para obtener la configuración experimental específica del modelo a escala 3:4. Así, el diámetro del sedimento se escaló mediante la escala de longitudes  $L_e = \frac{L_p}{L_m}$ , tomando en cuenta sólo la media del tamaño de grano y no otros factores de su distribución granulométrica. Los rangos del tamaño

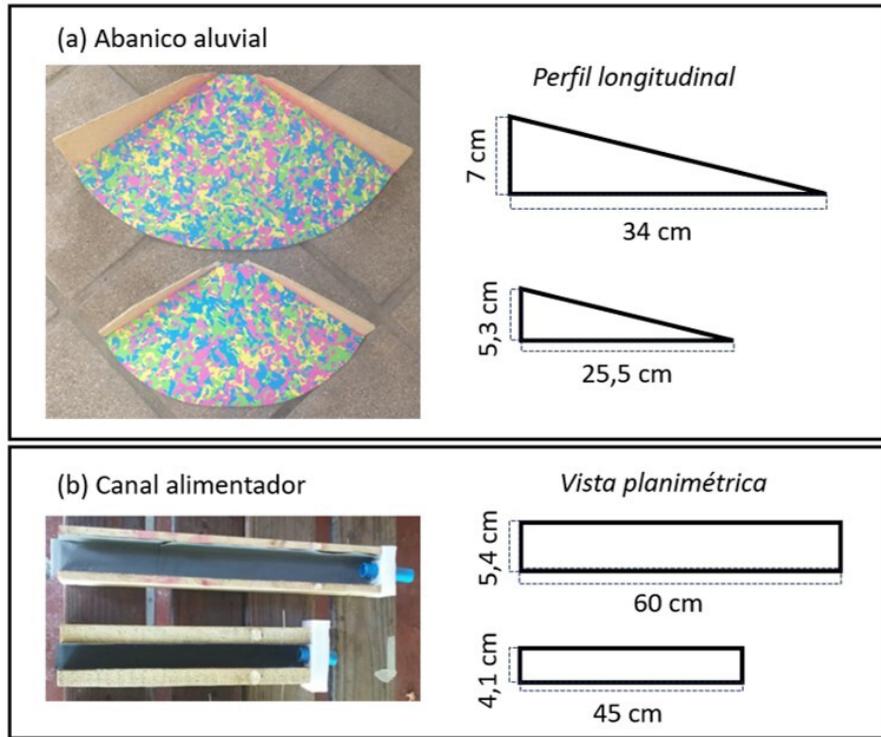
de granos son, respectivamente, de 1 a 2 mm para la escala 1:1 y de 0.6 a 1.7 para la escala 3:4. Los volúmenes de descarga total se escalaron mediante la escala de volúmenes dada por la relación  $V_e = \frac{V_p}{V_m} = L_e^3$  y el caudal de la corriente mediante la escala de caudales definida por la fórmula  $Q_e = \frac{Q_p}{Q_m} = L_e^{5/2}$ . Por último, para evaluar la variabilidad de la respuesta, la configuración experimental de la escala 1:1 (prototipo) se repitió 24 veces, mientras que la configuración de la escala 3:4 (modelo) se repitió 8 veces, resultando un programa de 32 ejecuciones experimentales en total (Figura 4).

Previo a la realización de los experimentos, se debió determinar la cantidad de sedimento (g) y el volumen de agua (l) a suministrar en cada ejecución, así como el tiempo (s) necesario para controlar el volumen de agua suministrado (ver Tabla S1).

### 2.4. Análisis de magnitud y distribución espacial de la exposición

#### 2.4.1. Porcentajes de área expuesta y mapas de probabilidad de exposición

Para analizar el comportamiento distributivo del abanico aluvial experimental se identificaron y cuantificaron para cada experimento las áreas expuestas, es decir, las zonas que resultaron cubiertas por el flujo después del evento. Estas se diferenciaron en áreas de exposición total (o sea, expuestas por flujo de agua y sedimento) y áreas expuestas sólo por sedimento (Figura 5). La identificación de estas áreas se realiza mediante los siguientes pasos: (i) extraer los fotogramas del resultado final de cada experimento empleando un script Python; (ii) delimitar en cada imagen la superficie del abanico mediante una capa vectorial de tipo polígono en el software QGIS; (iii) superponer sobre el polígono una grilla mediante las herramientas Python Plugin TomBio (QGIS, 2018) para el posterior recuento de las celdas expuestas, las cuales deben encontrarse cubiertas por el flujo en más de un 50% de su área; (iv) Crear una clasificación



**Figura 3.** Piezas escaladas del abanico aluvial y sus respectivas dimensiones en perfil longitudinal (panel a). Piezas escaladas del canal alimentador y sus respectivas dimensiones en visión planimétrica (panel b).

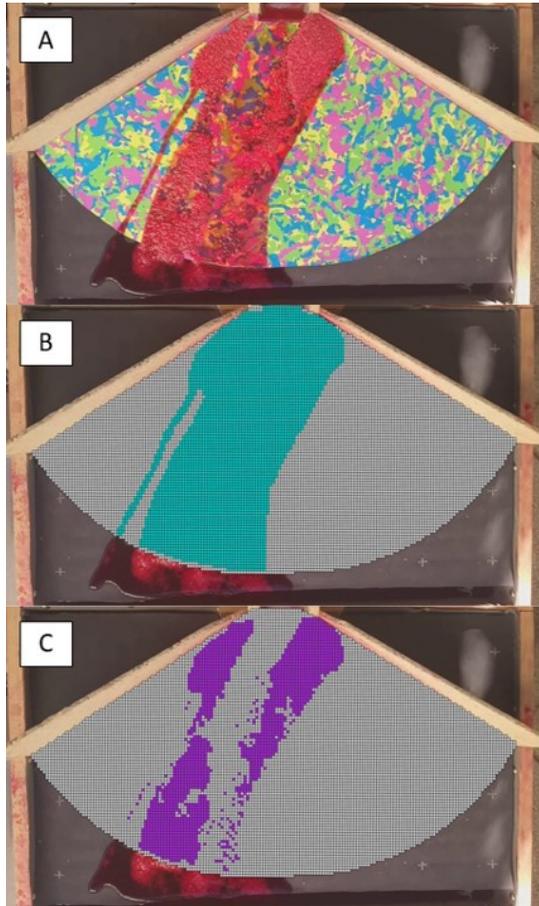
**Figure 3.** Scaled pieces of the alluvial fan and their respective dimensions in longitudinal profile (panel a). Scaled pieces of the feeder channel and their respective dimensions in plan view (panel b).

Escala de la configuración experimental	Pendiente del canal alimentador	Caudal (cm <sup>3</sup> /s)	Volumen total (l)	Fracción sólida	Diámetro del sedimento (mm)	Repeticiones
1:1 (prototipo)	35°	36,5	0,8	6%	1,5	24
3:4 (modelo)		17,8	0,34		1,15	8

**Figura 4.** Esquema del programa experimental que detalla las condiciones de carga correspondientes a cada configuración.

**Figure 4.** Diagram of the experimental program detailing the load conditions corresponding to each configuration.

específica en la tabla de atributos de la grilla para diferenciar las celdas expuestas por agua y sedimento, expuestas sólo por sedimento y no expuestas, obteniendo así para cada imagen dos polígonos que encierran las áreas de exposición total y exposición por sedimento, respectivamente. Luego, generar un mapa



**Figura 5.** Fotograma del depósito resultante de un experimento y sus respectivos mapas de exposición, donde el color gris representa las zonas no expuestas, el color celeste las zonas expuestas por agua y sedimento y el color morado las zonas expuestas sólo por sedimento. (A) Depósito final del experimento, (B) Mapa de exposición total y (C) Mapa de exposición por sedimento.

**Figure 5.** Frame of the deposit resulting from an experiment and its respective exposure maps, where the gray color represents non-exposed zones, light blue indicates areas exposed to water and sediment, and purple indicates areas exposed only to sediment. (A) Final deposit of the experiment, (B) Total exposure map, and (C) Sediment exposure map.

rasterizado correspondiente a cada polígono; (v) Paralelamente, cuantificar las celdas expuestas mediante medición directa dentro de QGIS y almacenar los valores obtenidos en una hoja de cálculo de Excel; (vi) Sumar los ráster correspondientes a todas las repeticiones de una misma configuración experimental para generar un mapa de probabilidad de exposición total y un mapa de probabilidad de exposición por sedimento para cada configuración específica. En este mapa la probabilidad de exposición para cada celda es igual a la suma de las contribuciones de probabilidad de exposición obtenida en cada una de las repeticiones del experimento. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de un mapa de probabilidad de exposición. La probabilidad de cada pixel se representa en una rampa de colores dividida en nueve clases con un rango de probabilidad de 0,125 por cada clase, donde las áreas de color gris tienen una probabilidad nula (valor 0) por lo que representan zonas no expuestas, mientras las zonas de color rojo tienen una probabilidad máxima (valor 1) por lo que se consideran incondicionalmente expuestas.

Por otro lado, a partir de los datos de cantidad de celdas expuestas almacenados en la planilla Excel y su razón con la cantidad de celdas totales de la grilla, se obtuvieron porcentajes de exposición total y porcentajes de exposición por sedimento para cada experimento. Luego, para el análisis estadístico descriptivo de estos datos se realizaron diagramas de caja, lo cual permitió comparar estadísticamente las magnitudes de la exposición entre las distintas configuraciones experimentales.

#### 2.4.2. Elipses de desviación estándar

Para analizar estadísticamente la distribución espacial de la probabilidad de exposición se utilizaron elipses de desviación estándar (SDE) generadas mediante la herramienta "Standard deviational ellipse" del software QGIS. Estas elipses representan gráficamente la tendencia de la distribución direccional del conjunto de datos de la variable analizada (en

este caso, la probabilidad de exposición) permitiendo observar si las entidades se elongan o si tienen alguna orientación particular (Alperin, 2013).

Para ello, los ráster correspondientes a cada mapa de probabilidad se convirtieron en capas de puntos y, luego, se filtraron los puntos de la capa en un rango de valores específico según la probabilidad de interés, para crear cuatro tipos de elipses diferentes (Figura 7). Para la elipse “probabilidad 1” (en color verde) se filtraron los puntos con probabilidad de exposición máxima, por lo que representa las áreas que resultaron siempre expuestas. Para la elipse “probabilidad 0” (en color celeste) se filtraron los puntos con valor de probabilidad nula, o sea, representa las áreas que nunca resultaron expuestas. La elipse “probabilidad intermedia” (en color amarillo) muestra la distribución de las áreas con probabilidad estrictamente mayor que 0 y estrictamente menor que 1. Por último, para la elipse “pesos” (en color rosado) no se filtraron datos y se utilizó la opción “*use weights*” que realiza ponderaciones asignando a cada punto un peso según el valor de su atributo. Es decir, esta elipse muestra la distribución de la exposición general de todo el abanico, donde cada pixel se pondera por su valor de probabilidad específico.

### 2.5. Pruebas estadísticas de similitud

Para determinar si las diferencias de las magnitudes de la exposición entre los grupos de datos comparados son estadísticamente significativas o no, se aplicaron tres pruebas estadísticas utilizando el software R. El primer paso fue determinar en cada caso si la variable presenta distribución normal o no, para lo cual se aplicó el test de normalidad Shapiro-Wilk que plantea la hipótesis nula  $H_0$  de que la muestra proviene de una distribución normal. Posteriormente, y debido a que uno de los requisitos para que una prueba paramétrica sea válida es que las varianzas sean de similar magnitud, se aplicó la prueba F, cuya hipótesis nula  $H_0$  plantea que las varianzas de ambos grupos no presentan diferencias sig-

nificativas. Finalmente, para evaluar si existe una diferencia significativa en las medias de los grupos se utilizó la prueba t-Student para dos muestras independientes. Esta prueba se basa en el cálculo del estadístico t, que tiene en cuenta la diferencia de medias a comparar y su error estándar. Bajo el supuesto de la hipótesis nula  $H_0$ , la diferencia de medias es igual a cero, con lo que el valor de t será también igual a cero. Cuanto más se aleje t de ese valor, menos probable será que la diferencia observada se deba al azar.

En todos los casos, para validar la prueba de hipótesis se utiliza el p-valor, que se define como la probabilidad de que ocurra un evento al azar siendo  $H_0$  cierta. Mientras menor sea p-valor, más fuerte será la evidencia de la muestra para rechazar  $H_0$ . En general, y para efectos de este estudio, cuando p-valor < 0,05 se conduce a rechazar la hipótesis.

## 3. Resultados

### 3.1. Distribución espacial de la probabilidad de exposición

En relación con los objetivos planteados para esta investigación, con el fin de poder visualizar cómo varían los patrones distributivos de la exposición en el abanico al variar la escala del modelo, se presentan en la Figura 8, paralelamente, los mapas de probabilidad de exposición y las elipses de desviación estándar (SDE) correspondientes a cada configuración, donde se destacan notorias diferencias en los patrones distributivos tanto de la exposición total como de la exposición por sedimento. Los datos espaciales de cada elipse se encuentran especificados en S2.

Como se evidencia en el mapa de probabilidad de exposición total, al disminuir la escala del modelo se obtiene un menor confinamiento del flujo abarcando una mayor área de exposición y limitando las zonas de probabilidad nula hacia las zonas más próximas a las paredes laterales del abanico. Las áreas de probabilidad máxima también presentan geo-

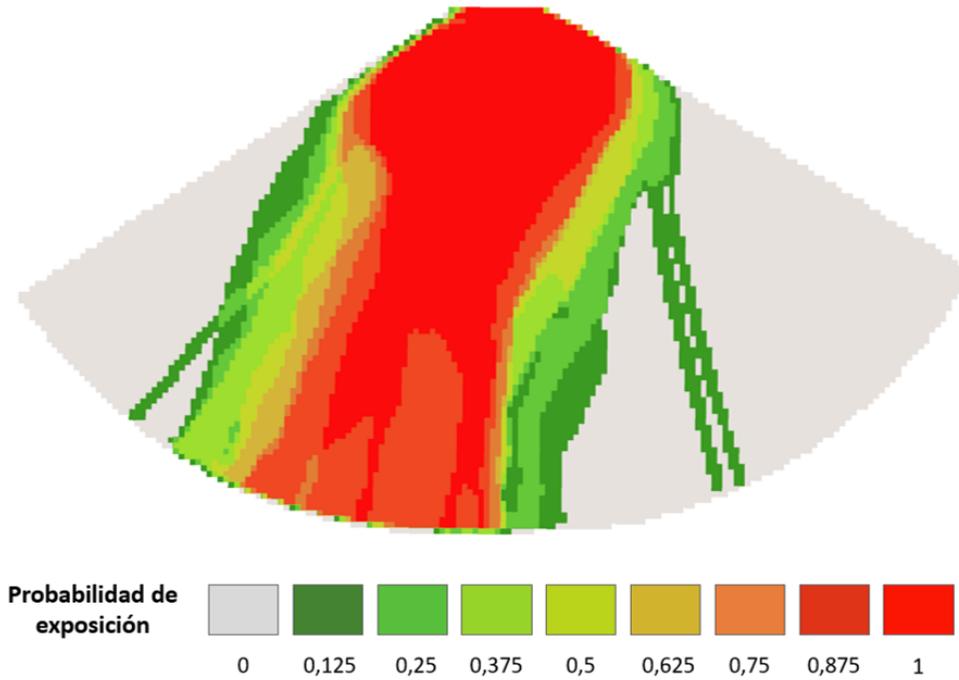


Figura 6. Mapa de probabilidad de exposición asociado a la configuración experimental de la escala 1:1 (prototipo).  
*Figure 6. Exposure probability map associated with the experimental configuration at 1:1 scale (prototype).*

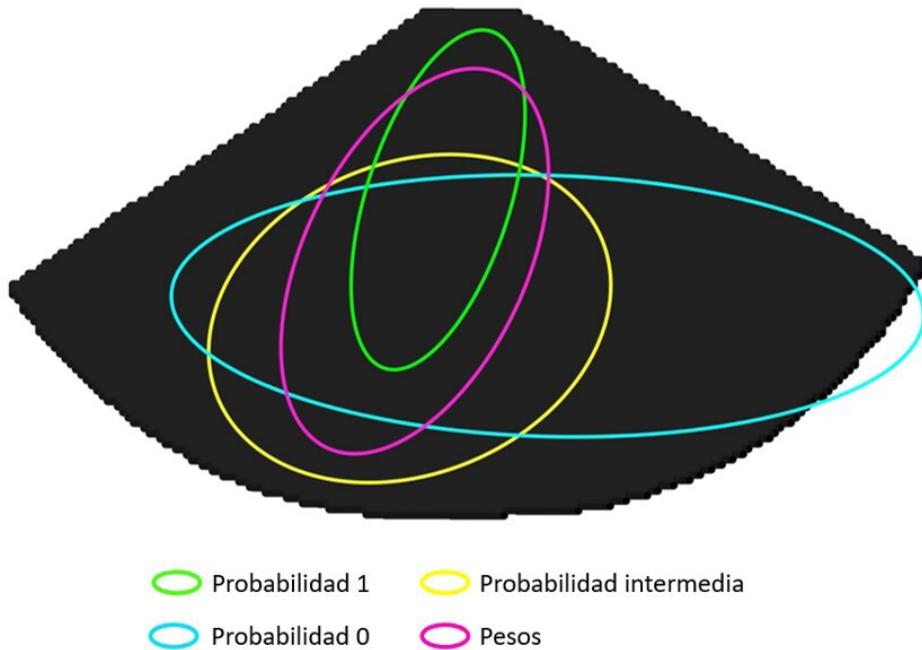
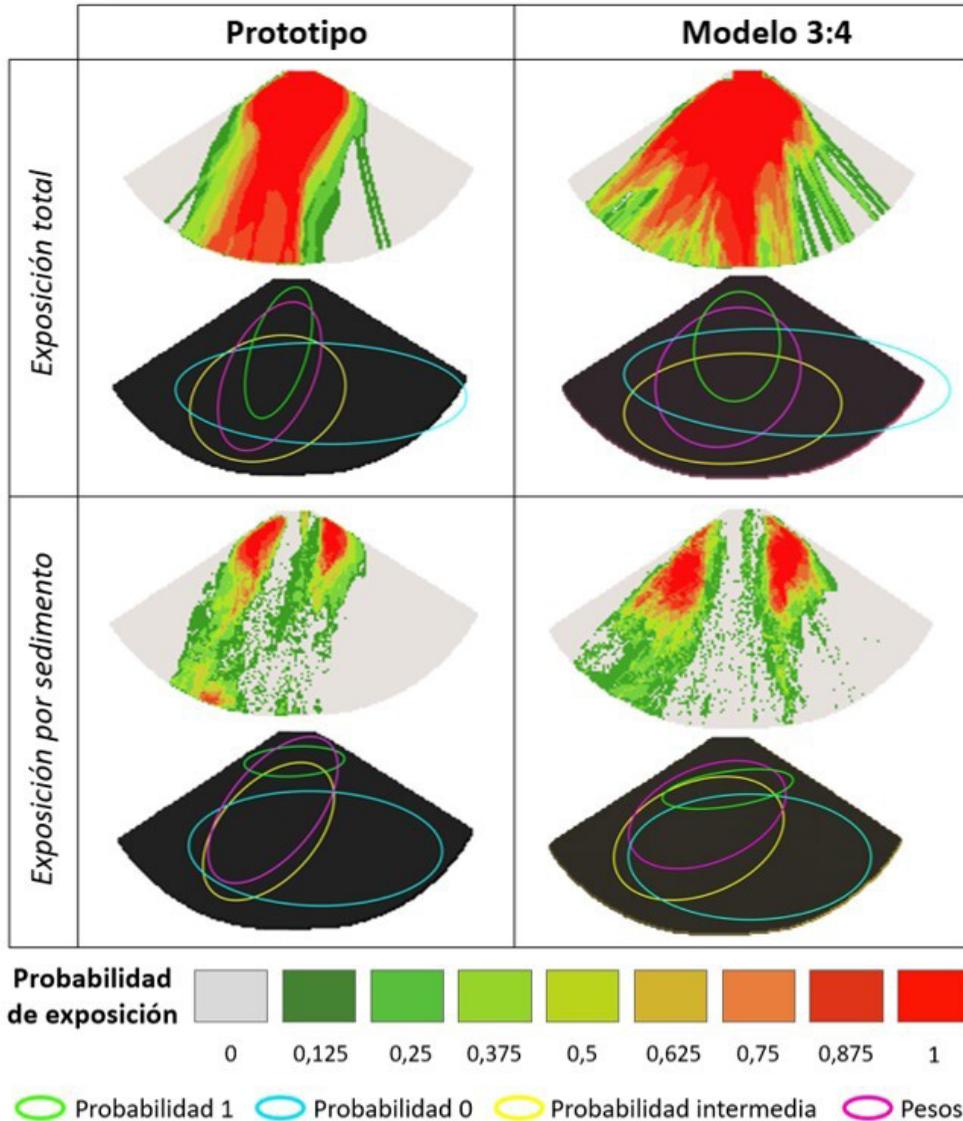


Figura 7. Mapa de elipses de desviación estándar asociado a la configuración experimental de la escala 1:1 (prototipo).  
*Figure 7. Standard deviation ellipse map associated with the experimental configuration at 1:1 scale (prototype).*

metrías diferentes, especialmente en la mitad izquierda del cono aluvial, donde se pueden identificar zonas en que la probabilidad de exposición y, por tanto, la indicación de peligro, son notoriamente incongruentes al variar la escala. El menor confinamiento del flujo al disminuir la escala del modelo se ve reflejado también en la orientación y elongación de las elipses, que muestran en general una va-

riación de una distribución preferentemente longitudinal en la escala 1:1 a una extensión más lateral en la escala 3:4, lo cual implica una diferencia en las excentricidades de las elipses “probabilidad 1”, “probabilidad intermedia” y “pesos”.

Para la exposición por sedimento, al reducir la escala del modelo las áreas de exposición no



**Figura 8.** Mapas de probabilidad y mapas de SDE que muestran la distribución espacial de la exposición para el flujo total y para el depósito del sedimento obtenidas al variar la escala del modelo.

**Figure 8.** Probability maps and standard deviation ellipse maps showing the spatial distribution of exposure for total flow and sediment deposit obtained by varying the model scale.

nula parecen tener un área levemente mayor y una distribución lateral más extensa, abarcando zonas más cercanas a las paredes del abanico, especialmente en el sector izquierdo. Esta tendencia direccional del depósito se expresa también en el mayor ángulo de rotación que presentan las elipses “probabilidad intermedia” y “pesos” de la escala 3:4. Además, las zonas con mayor probabilidad de exposición abarcan áreas ligeramente mayores y alcanzan zonas levemente más distales del ápice al reducir la escala, lo que se evidencia también en un desplazamiento negativo en el eje ‘y’ del centro medio de la elipse “probabilidad 1”.

Por otro lado, con el fin de analizar la variabilidad de la respuesta en los patrones distributivos de la exposición al aumentar el número de repeticiones por experimento, se presentan en la Figura 9 los mapas de probabilidad y elipses de desviación estándar correspondientes a 8, 16 y 24 repeticiones de la configuración experimental del modelo a escala 1:1. Los datos espaciales de cada elipse se encuentran especificados en S2.

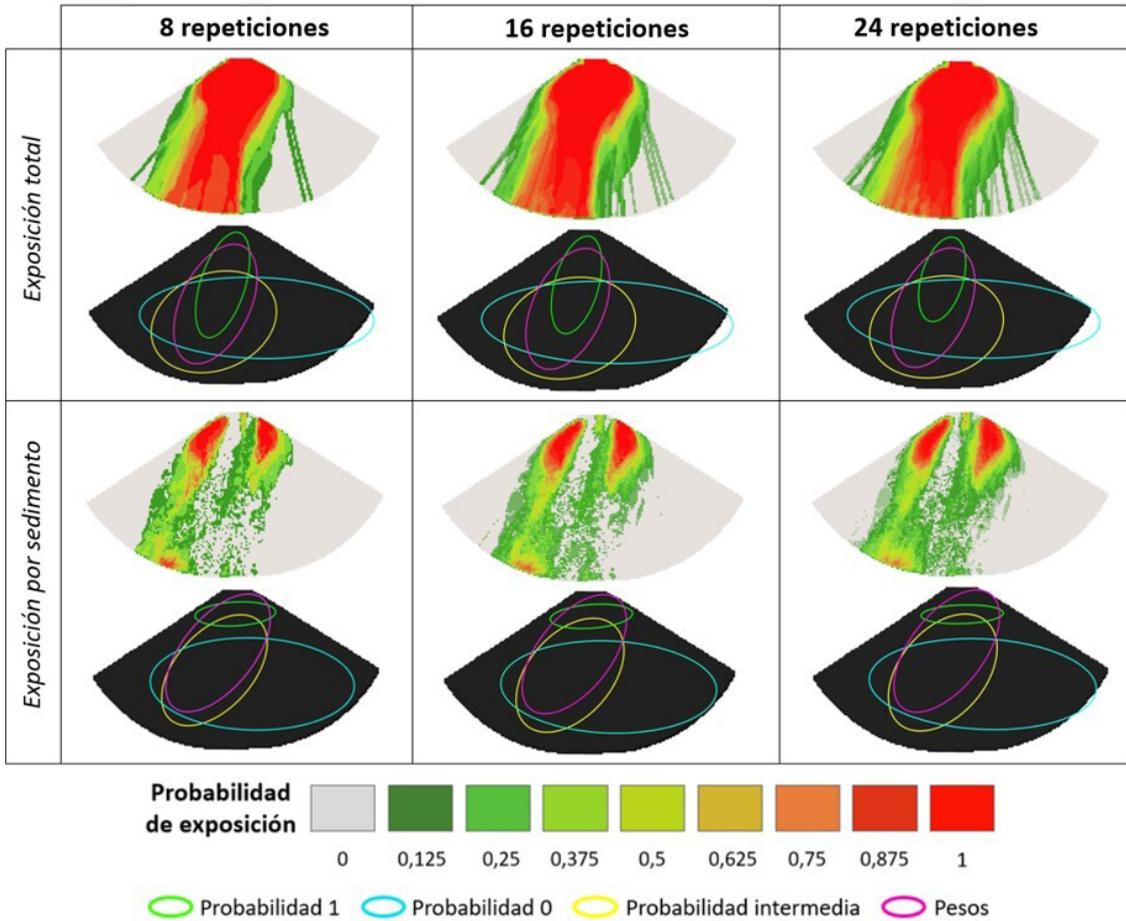
Los patrones distributivos de la probabilidad de exposición total y por sedimento parecen notablemente similares, tanto en la distribución de las áreas con probabilidad distinta de cero como de las áreas ciertamente expuestas, presentando como única diferencia un leve aumento en la variabilidad espacial de la probabilidad de exposición al aumentar el número de experimentos, ampliando ligeramente las áreas de baja exposición y disminuyendo levemente las zonas de probabilidad de exposición máxima. Para la exposición total, esto se refleja en los mapas de probabilidad de exposición en una mayor cantidad de canales que se desprenden hacia la derecha de la zona de propagación principal al aumentar el número de experimentos, aumentando ligeramente la probabilidad en algunas zonas de baja exposición, mientras que en los mapas de elipses la distribución de la probabilidad máxima se ve restringida y más concentrada hacia la zona apical, disminuyendo la longitud del eje mayor de la elipse “probabilidad 1”.

De manera similar, en los patrones producidos por el sedimento las diferencias más notorias se observan en las áreas de menor probabilidad de exposición donde al aumentar la cantidad de experimentos se producen nuevos depósitos aumentando levemente la probabilidad de exposición de aquellas zonas, mientras que la distribución de probabilidad máxima se ve levemente reducida longitudinalmente, lo que se evidencia en el leve aumento de excentricidad que presenta la elipse “probabilidad 1” al aumentar la muestra a 24 experimentos.

### 3.2. Estadística descriptiva de los porcentajes de exposición

Para comparar la magnitud de la exposición resultante se cuantificaron los porcentajes de área expuesta de cada experimento obteniendo los promedios, desviación estándar y diagramas de caja correspondientes a cada configuración experimental. Los datos y cálculos realizados para los porcentajes de exposición de cada experimento se encuentran tabulados en S3 y los datos estadísticos respectivos a cada diagrama de caja se presentan en S4. En la Figura 10 y Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos al variar la escala del modelo y en la Figura 11 y Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos al variar el número de repeticiones.

Los resultados (Figura 10 y Tabla 1) muestran que tanto los promedios como las medianas de los porcentajes de exposición aumentan al disminuir la escala del modelo, de manera más considerable para la exposición total que para la exposición por sedimento. Además, para la exposición total, el modelo más pequeño conduce a un notorio aumento de la dispersión de los datos con respecto a la media, lo cual se ve representado por una mayor desviación estándar y por un mayor rango de valores típicos y rango intercuartílico. En cambio, para la exposición por sedimento la desviación estándar es levemente mayor para la escala 1:1, los datos típicos muestran una menor dispersión en la escala 1:1 y una mayor concentración en la escala 3:4, mientras



**Figura 9.** Mapas de probabilidad y mapas de SDE que muestran la distribución espacial de la exposición para el flujo total y para el depósito de sedimento obtenidas al variar el número de repeticiones en la configuración experimental de escala 1:1.

**Figure 9.** Probability maps and standard deviation ellipse maps showing the spatial distribution of exposure for total flow and sediment deposit obtained by varying the number of repetitions in the 1:1 scale experimental configuration.

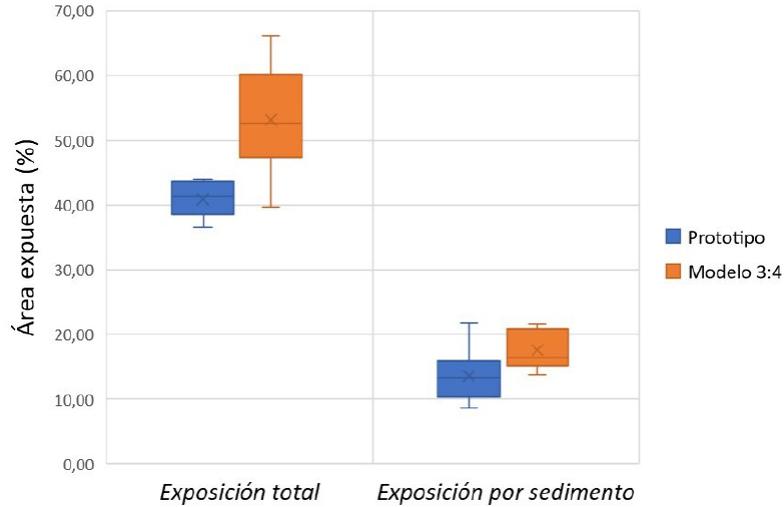
la variabilidad de los datos centrales es similar para ambas escalas.

Por otra parte, al aumentar el número de experimentos (Figura 11 y Tabla 2) los promedios de porcentajes de exposición total y por sedimento no varían significativamente y las medianas presentan diferencias leves. En cuanto a la dispersión de los datos, para la exposición total la desviación estándar aumenta levemente conforme aumenta el número de repeticiones, mientras el rango de valores típicos aumenta y el rango intercuartílico se mantiene constante. Para la exposición por

sedimento, se destaca que la desviación estándar disminuye ligeramente, el rango para valores típicos disminuye para 24 experimentos dejando el valor máximo como valor atípico y el rango intercuartílico es levemente menor para 24 experimentos, mostrando una menor dispersión de los datos centrales.

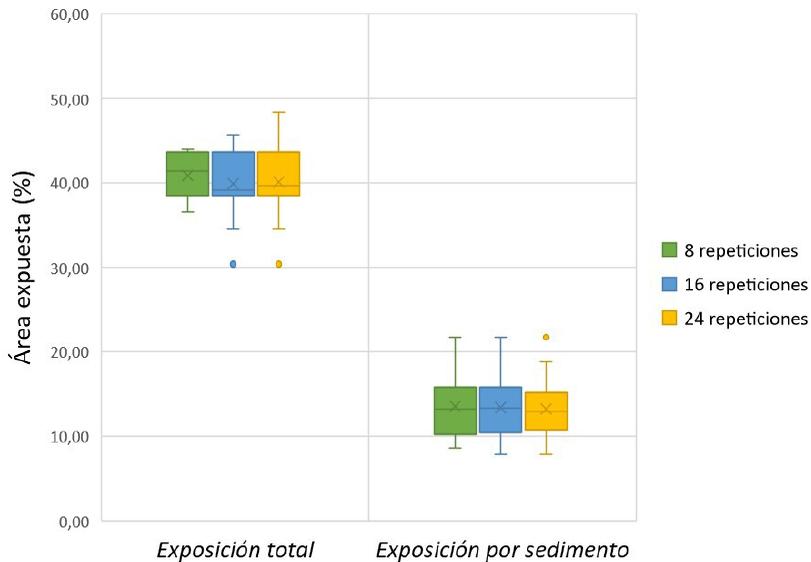
### 3.3. Estadística inferencial

Los resultados arrojados por la prueba de normalidad Shapiro-Wilk, prueba F y t-Student para los distintos grupos de datos com-



**Figura 10.** Diagrama de caja que muestra la variabilidad y la mediana de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento obtenidos al variar la escala del modelo. La línea que divide la caja representa la mediana de la distribución, la “x” dentro de la caja representa el promedio de los datos y los puntos extremos representan datos atípicos (si los hay).

**Figure 10.** Boxplot showing the variability and median of total exposure percentages and sediment exposure percentages obtained by varying the model scale. The line dividing the box represents the median of the distribution, the “x” inside the box represents the mean of the data, and the whiskers represent outliers (if any).



**Figura 11.** Diagrama de caja que muestra la variabilidad y la mediana de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento obtenidos al variar el número de repeticiones en la configuración experimental de escala 1:1. La línea que divide la caja representa la mediana de la distribución, la “x” dentro de la caja representa el promedio de los datos y los puntos extremos representan datos atípicos (si los hay).

**Figure 11.** Boxplot showing the variability and median of total exposure percentages and sediment exposure percentages obtained by varying the number of repetitions in the 1:1 scale experimental configuration. The line dividing the box represents the median of the distribution, the “x” inside the box represents the mean of the data, and the whiskers represent outliers (if any).

**Tabla 1.** Promedios y desviaciones estándar de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento obtenidos al variar la escala del modelo.**Table 1.** Means and standard deviations of total exposure percentages and sediment exposure percentages obtained by varying the model scale.

	Escala	Promedio	Desviación estándar
Porcentaje de exposición total	1:1	40,91	2,75
	3:4	53,13	8,45
Porcentaje de exposición por sedimento	1:1	13,60	4,17
	3:4	17,55	2,98

**Tabla 2.** Promedios y desviaciones estándar de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento obtenidos al variar el número de repeticiones en la configuración experimental de escala 1:1.**Table 2.** Means and standard deviations of total exposure percentages and sediment exposure percentages obtained by varying the number of repetitions in the 1:1 scale experimental configuration.

	Tamaño muestra	Promedio	Desviación estándar
Porcentaje de exposición total	8 experimentos	40,91	2,75
	16 experimentos	39,92	4,02
	24 experimentos	40,14	3,99
Porcentaje de exposición por sedimento	8 experimentos	13,60	4,17
	16 experimentos	13,42	3,76
	24 experimentos	13,29	3,47

parados se presentan a continuación. Para la prueba Shapiro-Wilk (ver Tablas S5), los resultados arrojan que todos los grupos analizados siguen una distribución normal ( $p$ -valor  $> 0,05$ ). Al comparar las varianzas entre las diferentes escalas (Tabla 3), la prueba F permite concluir diferencias significativas para la exposición total ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), pero no para la exposición por sedimento ( $p$ -valor  $> 0,05$ ). Mientras que el t-Student conduce a rechazar la hipótesis nula de que las medias son iguales y aceptar la hipótesis alternativa de que existen variaciones significativas

entre las medias de las distintas escalas tanto para la exposición total como para la exposición por sedimento ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). En cuanto a la comparación para distinto número de repeticiones (Tabla 4), se aplicaron las pruebas comparando 8 con 16, 16 con 24 y 8 con 24, y en todos los casos la prueba F y el t-Student indicaron que no es posible concluir que existan diferencias significativas al comparar las varianzas y las medias entre los grupos, tanto para la exposición total como para la exposición por sedimento ( $p$ -valor  $> 0,05$ ).

**Tabla 3.** Significancia estadística obtenida al analizar la diferencia entre las varianzas y medias de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento variando la escala del modelo.**Table 3.** Statistical significance obtained from analyzing the differences between variances and means of total exposure percentages and sediment exposure percentages by varying the model scale.

	Grupos comparados	Prueba estadística	p-valor
Exposición total	Escala 1:1 vs. 3:4	Prueba F	0,00838
		t-Student	0,00413
Exposición por sedimento	Escala 1:1 vs. 3:4	Prueba F	0,3986
		t-Student	0,04708

**Tabla 4:** Significancia estadística obtenida al analizar la diferencia entre las varianzas y medias de los porcentajes de exposición total y de exposición por sedimento variando el número de repeticiones.

**Table 4.** Statistical significance obtained from analyzing the differences between variances and means of total exposure percentages and sediment exposure percentages by varying the number of repetitions.

	Grupos comparados	Prueba estadística	p-valor
Exposición total	8 vs. 16 repeticiones	Prueba F	0,315
		t-Student	0,5397
	16 vs. 24 repeticiones	Prueba F	0,944
		t-Student	0,8694
	8 vs. 24 repeticiones	Prueba F	0,3173
		t-Student	0,6149
Exposición por sedimento	8 vs. 16 repeticiones	Prueba F	0,6898
		t-Student	0,9162
	16 vs. 24 repeticiones	Prueba F	0,7095
		t-Student	0,9084
	8 vs. 24 repeticiones	Prueba F	0,4696
		t-Student	0,8846

#### 4. Discusión y conclusiones

El desafío de la experimentación con modelos físicos de laboratorio consiste, por un lado, en lograr reproducir el fenómeno de manera veraz limitando la cantidad de repeticiones necesarias para capturar la variabilidad estadística de los patrones y, por otra parte, representar el sistema de estudio reduciendo lo más posible la diferencia de escala entre modelo y prototipo para así limitar las distorsiones generadas por las limitaciones del escalamiento. La dificultad de intentar compatibilizar ambos propósitos radica en que al aumentar el tamaño del modelo se requiere incrementar el gasto de recursos monetarios y de tiempo (ya que la escala geométrica afecta la escala temporal en que ocurren los procesos) restringiendo las posibilidades de realizar una mayor cantidad de ejecuciones experimentales, lo cual introduce un riesgo y una mayor incertidumbre sobre la validez de los resultados.

A pesar de la gran variedad de trabajos que se han realizado basándose en el estudio de modelos escalados, la discusión sobre la existencia de una aparente independencia de escala en la naturaleza se ha abordado hasta la actualidad tan solo de forma teórica y mediante

la comparación de los hallazgos experimentales con modelos numéricos y observaciones de campo (Clarke, 2015), ya que en la actualidad se carece de una base física teórica para su comprensión (Paola *et al.*, 2009). Debido a esto, las preocupaciones sobre cuán representativos son estos modelos de los sistemas reales continúan produciendo escepticismo e incertidumbre en el trabajo de investigación experimental, especialmente al aplicar esta técnica a un análisis cuantitativo y predictivo de un prototipo específico en el campo; por lo que, aunque muchos conceptos básicos parezcan ser independientes de la escala y los detalles del proceso (Martin *et al.*, 2009), los hallazgos generados a partir de modelos a pequeña escala a menudo se utilizan tan solo para mejorar la comprensión del proceso cualitativo (Clarke, 2015). Así mismo, en la escasa literatura que brinda orientaciones sobre la aleatoriedad de los procesos y el número adecuado de repeticiones, esta problemática se suele abordar bajo principios teóricos buscando reducir la varianza de los resultados, para lo cual se utilizan enfoques probabilísticos por medio de intervalos de confianza y cálculos de precisión estadística de las estimaciones (Schalko, 2017; Furlan *et al.*, 2019). Por lo anterior, se hace necesario abordar estas cuestiones de manera experimental,

para lo cual esta investigación constituye una primera aproximación que contribuye a avanzar hacia una comprensión cuantitativa y estadística de estos fenómenos, permitiendo complementar las discusiones previas y vislumbrar nuevas aristas de investigación para desarrollar a futuro.

Los resultados presentados en este estudio proporcionan evidencia convincente de que los patrones obtenidos en el abanico aluvial al variar la escala del modelo utilizado exhiben diferencias considerables. La distribución espacial de la probabilidad de exposición muestra que al disminuir la escala se obtiene un patrón de flujo menos confinado, áreas más extensas tanto para las probabilidades máximas como para las probabilidades no nulas y un depósito más distal del sedimento. Además, se identifican en particular zonas con discrepancias significativas en la probabilidad de exposición entre ambas escalas, lo cual tiene una implicancia directa en la aplicación de modelos escalados para el estudio de riesgos asociados a abanicos aluviales reales, ya que es evidente que al cambiar la escala del modelo no se obtiene la misma indicación sobre el peligro. Por otra parte, el análisis estadístico de los porcentajes de exposición dados por los diagramas de caja y la prueba t-Student, verifica la existencia de variaciones estadísticamente significativas en la respuesta de los modelos de escalas diferentes.

Estas incongruencias en el comportamiento del flujo y los patrones resultantes reflejan una disimilitud en la cinemática de los procesos subyacentes ocurridos en el abanico, incluso bajo la generación de condiciones iniciales experimentalmente equivalentes y utilizando las ecuaciones dadas por la similitud de Froude. Por lo tanto, se puede establecer que, al menos para una similitud estadística y bajo condiciones de flujo no confinadas (como son los abanicos aluviales), la independencia de escala no aplica totalmente. De hecho, considerando que la diferencia de escala entre los dos modelos utilizados en esta investigación es mucho menor que la diferencia de escala existente entre los modelos de laboratorio

y los sistemas naturales a escala de campo, para poder tener confianza en la aplicabilidad de los resultados experimentales a prototipos reales debería obtenerse una independencia de escala mucho más extensa para el caso de este estudio. En este sentido, para efectos de representar un prototipo de abanico aluvial real en el campo y, más aún, en estudios cuyo objetivo sea analizar cómo se distribuye la exposición y evaluar o recomendar medidas de prevención de riesgos, no parece lo suficientemente seguro basarse en un modelo escalado de la realidad, ya que las indicaciones que estos proporcionan sobre el peligro no son congruentes entre las distintas escalas, por lo que no es posible distinguir qué modelo proporciona la información más acertada.

Sin embargo, cabe señalar que los hallazgos discutidos en este trabajo corresponden a un modelo experimental de abanico aluvial con determinadas características topográficas y no son necesariamente extrapolables a otros sistemas, por ejemplo, con diferentes condiciones de confinamiento del flujo. Por lo tanto, pese a las deficiencias que se evidencian acerca de la eficacia de la independencia de escala, es necesario realizar más investigaciones con el fin de poder evaluar y comprender los efectos de estas limitaciones en cada caso y, si es posible, establecer mecanismos para corregir o reducir su impacto. Así, dependiendo de cuál sea el propósito del diseño hidráulico que se desee realizar se podrían explorar distintas soluciones que ayuden a reducir la incertidumbre introducida por los problemas de escalamiento.

Por otra parte, al aumentar el número de repeticiones de 8 a 24 no varió significativamente la respuesta en términos estadísticos, ni en los porcentajes de área expuesta ni en la distribución espacial de la probabilidad de exposición y, por tanto, tampoco en la indicación del peligro. Esto implica que, si el objetivo al escoger un tamaño de muestra es reducir y optimizar el trabajo experimental sin perder información relevante y garantizando la representatividad de los resultados, carece de sentido realizar 24 repeticiones por experimento en este caso, ya

que con 8 experimentos los resultados estadísticos y la respuesta de la indicación del peligro son suficientemente fidedignos. Sin embargo, cabe señalar que estos resultados se obtuvieron al analizar únicamente el área expuesta como variable de respuesta, por lo que es posible que al considerar otras variables (tales como: volúmenes y formas tridimensionales de los depósitos, procesos autógenos, etc.) el número de repeticiones requeridas para que los resultados sean estadísticamente representativos sea mayor.

Recalamos que los efectos de modelo y los efectos de escala siempre existirán al reducir geoméricamente una geoforma fluvial. Para mitigar eficazmente estos efectos de escala, decidimos aplicar una reducción mínima en este estudio (de 1:1 a 1:¼). Entre los efectos de modelo que pueden existir, hay que considerar el mecanismo de inicio del deslizamiento del material sólido y el inicio de la descarga líquida. En relación con lo primero, la rapidez de la apertura de la compuerta manual garantiza, dentro de ciertos límites, una similitud de proceso relativamente alta. En relación con el mecanismo de inicio de la descarga líquida, seguramente se pueden hipotetizar mejoras técnicas. De todas formas, dada la reducción mínima de escala implementada, el mecanismo adoptado interfiere en medida exigua.

Según lo reportado por Kessler *et al.* (2020), efectos de escala significativos están relacionados con la fuerza de arrastre del material sólido granular en experimentos de deslizamiento de material granular seco, también cuando el número de Reynolds del grano varía en el rango de  $10^2$  a  $10^3$  y las escalas empleadas en la modelación física varían con un factor 4. En este caso, no pudimos cuantificar este efecto en relación a nuestros experimentos y asumimos que, aun cuando adoptamos una reducción mínima de escala, este efecto no pudo ser completamente eliminado y, de hecho, puede ser una de las causas de la falta de independencia de escala de los patrones distributivos observados.

Por otra parte, tanto la efectividad de la independencia de escala como el tamaño de muestra adecuado para el programa experimental son factores que dependen de las características del sistema y del tipo de fenómeno en cuestión, por lo que, para tener una mayor certeza al momento de escoger las condiciones adecuadas para el trabajo experimental, ambos factores debiesen ser evaluados previamente según cada caso particular. Por esta razón, como recomendación para futuras investigaciones que involucren modelos físicos, se sugiere trabajar preliminarmente con modelos de escala reducida para evaluar tanto la variabilidad estadística de la dinámica distributiva como la efectividad de la independencia de escala aplicados específicamente al sistema y fenómeno de interés, para detectar tempranamente las limitaciones experimentales y generar soluciones pertinentes. De este modo sería posible determinar experimentalmente cuál es el mejor escenario de investigación posible, que contemple un número de repeticiones por experimento suficientemente representativo y, a la vez, permita reducir tanto como sea posible la relación de escala geométrica entre modelo y prototipo, asegurando la construcción de un modelo definitivo que resulte confiable y que se adapte a los recursos y plazos disponibles para llevar a cabo el programa experimental.

Por último, si bien lo revelado en esta investigación constituye una primera aproximación cuantitativa a esclarecer la efectividad de la independencia de escala, nuevas preguntas y aristas de investigación se desprenden de los resultados presentados. Es evidente la necesidad de desarrollar nuevas propuestas para estudios futuros que permitan alcanzar un entendimiento más acabado acerca de cómo opera la independencia de escala, en qué condiciones topográficas y de flujo funciona mejor, qué variables influyen en su efectividad, con qué se relaciona la pérdida de similitud cinemática de los modelos y cómo se puede corregir, entre otros aspectos relevantes.

Dentro de los estudios que podrían proporcionar información útil se encuentra el análisis de los resultados tridimensionales de los experimentos y la similitud estadística en la distribución de los volúmenes depositados sobre la superficie del abanico, lo cual se podría realizar con técnicas fotogramétricas de reconstrucción 3D. Dicha variable, al igual que el área de exposición, podría ser también estudiada bajo diferentes condiciones de carga para determinar si estas tienen algún efecto en la efectividad de la independencia de escala. También podría resultar interesante estudiar la similitud de los patrones de flujo en modelos con condiciones menos extremas de confinamiento (por ejemplo, un corredor fluvial en condiciones aluviales) y, dado que un factor que influye en el confinamiento del flujo es la topografía de la superficie por la cual transcurre, convendría analizar la respuesta de similitud cinemática del flujo en modelos de abanicos aluviales con diferentes características topográficas, por ejemplo, variando la curvatura de la superficie cónica o la pendiente del perfil longitudinal del abanico.

Otro elemento de análisis potencial para la comprensión de la independencia de escala podría apuntar a clarificar en qué medida existe la similitud cinemática incluyendo la variable de temporalidad de los procesos, ya que, incluso la existencia de similitud estadística en los patrones resultantes de un experimento no implica que la dinámica en el proceso haya sido la misma. Esto podría llevarse a cabo analizando la evolución en el tiempo de la frontera de propagación del flujo, de manera que la similitud cinemática entre ambas escalas se daría si estos bordes de propagación resultaran ser estadísticamente similares al comparar pares de fotogramas correspondientes a tiempos homólogos del experimento. Esto permitiría constatar, por una parte, si en experimentos que muestran un patrón similar en el resultado final la construcción de dicho patrón está dada por una dinámica que es similar en el tiempo y, por otro lado, identificar cómo es la evolución de la similitud a lo largo del tiempo en experimentos que muestran patrones diferentes en

el resultado final (es decir, cómo y cuándo se pierde la similitud). Todos estos aspectos son esenciales para avanzar tanto en la comprensión de los orígenes y límites de la independencia de escala como en la física involucrada en los flujos bifásicos y la naturaleza de la variabilidad de los procesos que ocurren en este tipo de sistemas. Adquirir estos conocimientos es fundamental para mejorar nuestras herramientas de análisis y seguir desarrollando estrategias eficaces de adaptación de las sociedades ante el riesgo de inundación. En este sentido, y a modo de conclusión, los modelos empleados están disponibles en el laboratorio de procesos superficiales de la Facultad de Ciencias de la Universidad Austral de Chile y, dado su tamaño reducido, pueden ser trasladados a otros laboratorios para futuras investigaciones relacionadas.

### Agradecimientos

Esta investigación fue realizada en el marco del proyecto ANID/FONDECYT Regular Nr. 1200091 “*Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT)*”.

### Referencias

- Alperin, M. (2013). *Introducción al análisis estadístico de datos geológicos*. Libros de Cátedra, Universidad Nacional de La Plata, 282 p. <https://doi.org/10.35537/10915/34221>
- Antronico, L., Greco, R., Robustelli, G., Sorriso-Valvo, M. (2015). Short-term evolution of an active basin-fan system, Aspromonte, south Italy. *Geomorphology*, 228, 536-551. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.013>
- Blair, T.C., McPherson, J.G. (1994). Alluvial Fan Processes and Forms. In A.D. Abrahams, A.J. Parsons (Eds.) *Geomorphology of Desert Environments* (pp. 354-402). [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8254-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8254-4_14)
- Blair, T.C., McPherson, J.G. (2009). Processes and forms of alluvial fans. In A.J. Parsons, A.D. Abrahams (Eds.) *Geomorphology of desert environments* (pp. 413 - 467). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5719-9>

- Blasi, A., Mazzorana, B., Sturm, M., Gems, B.N. (2023). Spatial patterns of exposure to sediment-laden flows on an experimental alluvial fan. *Cuaternario y Geomorfología*, 37(1-2), 77-112. <https://doi.org/10.17735/cyg.v37i1-2.95210>
- Bull, W.B. (1977). The alluvial-fan environment. *Progress in Physical Geography*, 1(2), 222-270. <https://doi.org/10.1177/030913337700100202>
- Cazanacli, D., Paola, C., Parker, G., Asce, M. (2002). Experimental Steep, Braided Flow: Application to Flooding Risk on Fans. *Journal of Hydrologic Engineering*, 128(3), 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:3\(322\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:3(322))
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow* (2nd ed.). Elsevier, 579 p.
- Clarke, L.E. (2015). Experimental alluvial fans: Advances in understanding of fan dynamics and processes. *Geomorphology*, 244, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.013>
- Clarke, L., Quine, T.A., Nicholas, A. (2010). An experimental investigation of autogenic behaviour during alluvial fan evolution. *Geomorphology*, 115(3-4), 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.033>
- Clarkson, P.J. (1999). *Small scale hydraulic modeling of alluvial fans*. Tesis doctoral, Lincoln University. <https://hdl.handle.net/10182/3302>
- Clevis, Q., de Boer, P., Wachter, M. (2003). Numerical modelling of drainage basin evolution and three-dimensional alluvial fan stratigraphy. *Sedimentary Geology*, 163(1-2), 85-110. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00174-X](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00174-X)
- Colombo, F. (2010). Abanicos aluviales: Secuencias y modelos de sedimentación. In A. Arche (Ed.) *Sedimentología. Del Proceso Físico a La Cuenca Sedimentaria* (pp. 131-224). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Davies, T.R., McSaveney, M.J., Clarkson, P.J. (2003). Anthropogenic aggradation of the Waiho River, Westland, New Zealand: Microscale modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(2), 209-218. <https://doi.org/10.1002/esp.449>
- Furlan, P., Pfister, M., Matos, J., Amado, C., Schleiss, A.J. (2019). Experimental repetitions and blockage of large stems at ogee crested spillways with piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 250-262. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1478897>
- Guerit, L., Devauchelle, O., Lajeunesse, E., Barrier, L. (2014). Laboratory alluvial fans in one dimension. *Physical Review E*, 90(2), 022203, 1-7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.022203>
- Hamilton, P.B., Strom, K., Hoyal, D.C.J.D. (2013). Autogenic incision-backfilling cycles and lobe formation during the growth of alluvial fans with supercritical distributaries. *Sedimentology*, 60, 1498-1525. <https://doi.org/10.1111/sed.12046>
- Harvey, A.M. (2002). The role of base-level change in the dissection of alluvial fans: Case studies from southeast Spain and Nevada. *Geomorphology*, 45(1-2), 67-87. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00190-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00190-8)
- Hooke, R. (1967). Processes on Arid-Region. *The Journal of Geology*, 75(4), 438-460. <https://doi.org/10.1086/627271>
- Hooke, R. (1968). Model Geology: Prototype and Laboratory Streams: Discussion. *GSA Bulletin*, 79, 391-394. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1968\)79\[391:MGPALS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1968)79[391:MGPALS]2.0.CO;2)
- Hooke, R.B. Le, Rohrer, W.L. (1979). Geometry of alluvial fans: Effect of discharge and sediment size. *Earth Surface Processes*, 4(2), 147-166. <https://doi.org/10.1002/ESP.3290040205>
- Hooke, R., Dorn, R. (1992). Segmentation of alluvial fans in Death Valley, California: new insights from surface exposure dating and laboratory modelling. *Earth Surface Processes and Landforms Landforms*, 17, 557-574. <https://doi.org/10.1002/esp.3290170603>
- Kessler, M., Heller, V., Turnbull, B. (2020). Grain Reynolds number scale effects in dry granular slides. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(1), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2019JF005347>
- Martin, J., Sheets, B., Paola, C., Hoyal, D. (2009). Influence of steady base-level rise on channel mobility, shoreline migration, and scaling properties of a cohesive experimental delta. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(3), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2008JF001142>
- Mazzorana, B., Ghiandoni, E., Picco, L. (2020). How do stream processes affect hazard exposure on alluvial fans? Insights from an experimental study. *Journal of Mountain Science*, 17(4), 753-772. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5788-x>
- Mokarram, M., Pourghasemi, H.R., Tiefenbacher, J.P. (2021). Morphometry of AFs in upstream and downstream of floods in Gribayegan, Iran. *Natural Hazards*, 108(1), 425-450 <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04690-0>

- Okunishi, K., Suwa, H. (2001). Assessment of debris-flow hazards of alluvial fans. *Natural Hazards*, 23(2-3), 259-269. <https://doi.org/10.1023/A:1011162516211>
- Paola, C. (2000). Quantitative models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, 47, 121-178. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00006.x>
- Paola, C., Straub, K., Mohrig, D., Reinhardt, L. (2009). The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, 97(1-4), 1-43. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.05.003>
- Peakall, J., Ashworth, P., Best, J. (1996). Physical modelling in fluvial geomorphology: principles, applications and unresolved issues. In B.L. Rhoads, C.E. Thorn (Eds.) *The scientific nature of geomorphology*, (pp. 221-253). Wiley & Sons.
- Reitz, M.D., Jerolmack, D.J., Swenson, J.B. (2010). Flooding and flow path selection on alluvial fans and deltas. *Geophysical Research Letters*, 37, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2009GL041985>
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E. (2019). Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(9), 1694-1709. <https://doi.org/10.1002/esp.4603>
- Santangelo, N., Santo, A., Di Crescenzo, G., Foscarini, G., Liuzza, V., Sciarrotta, S., Scorpio, V. (2011). Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: The case study of Sala Consilina (southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(10), 2765-2780. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2765-2011>
- Shalko, I. (2017). *Large wood accumulation probability at a single bridge pier*. In Proceedings of the 37th IAHR World Congress (pp. 1704-1713). International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR).
- Schumm, S.A. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New York.
- Schumm, S.A., Mosley, M.P., Weaver, W. (1987). *Experimental fluvial geomorphology*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY.
- Straight, B. (1992). *The Water Flow and Building Behaviour of a Small Alluvial Fan: A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Applied Science at Lincoln University*. Tesis Doctoral. Lincoln University.
- Straub, K.M., Esposito, C.R. (2013). Influence of water and sediment supply on the stratigraphic record of alluvial fans and deltas: Process controls on stratigraphic completeness. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 625-637. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20061>
- Straub, K.M., Wang, Y. (2013). Influence of water and sediment supply on the long-term evolution of alluvial fans and deltas: Statistical characterization of basin-filling sedimentation patterns. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1602-1616. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20095>
- QGIS (2018). *QGIS Python Plugins Repository*. Accessed online at: <https://plugins.qgis.org/plugins/TomBio/>
- van Dijk, M., Postma, G., Kleinhans, M.G. (2008). Autogenic cycles of sheet and channelised flow on fluvial fan-deltas. In C.M. Dohmen-Janssen, S.J.M.H. Hulchser. *River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics* (pp. 823-828). Taylor and Francis Group, London. <https://doi.org/10.1201/NOE0415453639-c104>
- van Dijk, M., Postma, G., Kleinhans, M. (2009). Autocyclic behaviour of fan deltas: an analogue experimental study. *Sedimentology*, 56, 1569-1589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2008.01047.x>
- van Dijk, M., Kleinhans, M.G., Postma, G., Kraal, E. (2012). Contrasting morphodynamics in alluvial fans and fan deltas: effect of the downstream boundary. *Sedimentology*, 59, 2125-2145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01337.x>
- Whipple, K.X., Parker, G., Paola, C., Mohrig, D. (1998). Channel dynamics, sediment transport, and the slope of alluvial fans: experimental study. *The Journal of geology*, 106(6), 677-694. <https://doi.org/10.1086/516053>
- Wigner, E.P. (1960). The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences. *Mathematics and Science*, 291-306. [https://doi.org/10.1142/9789814503488\\_0018](https://doi.org/10.1142/9789814503488_0018)
- Yalin, M.S. (1971). *Theory of hydraulic models*. Macmillan Press. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-00245-0>
- Zarn, B., Davies, T.R.H. (1994). The significance of processes on alluvial fans to hazard assessment. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 38(4), 487-500. <https://doi.org/10.1127/ZFG/38/1994/487>

Recibido el 8 de marzo de 2024

Aceptado el 22 de mayo de 2025

## Material suplementario

**S1.** Cálculos realizados para obtener la cantidad de sedimento, volumen de agua y tiempo requeridos para cada configuración experimental, a partir de los parámetros establecidos para el volumen total ( $V_t$ ), fracción de sedimento ( $F_s$ ) y caudal ( $Q$ ), considerando un valor de  $2,58 \text{ g/cm}^3$  para la densidad de los granos de cuarzo utilizados.

$$\text{Sedimento (g)} = \frac{F_s [\%] * V_t [L] * 1000 \left[ \frac{\text{cm}^3}{L} \right] * 2,58 \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}{100} \quad (26)$$

$$\text{Volumen de agua (l)} = \frac{(100 - F_s [\%])}{100} * V_t [L]$$

$$\text{Tiempo (s)} = \frac{V_t [L] * 1000 \left[ \frac{\text{cm}^3}{L} \right]}{Q \left[ \frac{\text{cm}^3}{s} \right]}$$

Escala	$V_t [L]$	$F_s [\%]$	$Q \left[ \frac{\text{cm}^3}{s} \right]$	Sedimento (g)	Volumen agua (l)	Tiempo (s)
<b>1:1</b>	0,8	6	36,5	124	0,75	21
<b>3:4</b>	0,34	6	17,8	52	0,32	18

Tabla S1. Parámetros utilizados en las ejecuciones experimentales de cada configuración.

*Table S1. Parameters used in the experimental runs for each configuration.*

**S2.** Resumen de datos estadísticos espaciales para las distintas distribuciones analizadas de la probabilidad de exposición (probabilidad nula, probabilidad máxima, probabilidad intermedia y probabilidad ponderada).

$\bar{X}$ : coordenada 'x' del centro medio;  $\bar{Y}$ : coordenada 'y' del centro medio; a: distancia estándar del eje mayor (m); b: distancia estándar del eje menor (m);  $\theta$ : ángulo de rotación con respecto al eje mayor (grados);  $\epsilon$ : excentricidad.

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
<b>Probabilidad 0</b>	1115,58	-567,23	710,06	246,57	91,66	0,94
<b>Probabilidad 1</b>	909,03	-366,91	333,63	135,87	17,57	0,91
<b>Probabilidad intermedia</b>	855,52	-591,00	392,00	293,61	67,60	0,66
<b>Pesos</b>	864,95	-482,68	389,33	210,53	25,13	0,84

Tabla S2.1. Datos espaciales para exposición total de 8 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.1. Spatial data for total exposure from 8 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
<b>Probabilidad 0</b>	1060,53	-573,90	616,58	278,38	91,52	0,89
<b>Probabilidad 1</b>	958,22	-150,73	244,01	72,13	86,76	0,96
<b>Probabilidad intermedia</b>	831,97	-490,89	400,56	231,68	42,14	0,82
<b>Pesos</b>	853,62	-386,25	424,46	214,80	39,13	0,86

Tabla S2.2. Datos espaciales para exposición por sedimento de 8 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.2. Spatial data for sediment exposure from 8 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1108,19	-560,07	747,22	245,49	91,57	0,94
Probabilidad 1	926,03	-335,39	301,01	131,31	15,59	0,90
Probabilidad intermedia	884,98	-594,32	398,76	295,65	73,81	0,67
Pesos	873,81	-479,03	385,50	210,98	24,31	0,84

Tabla S2.3. Datos espaciales para exposición total de 16 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.3. Spatial data for total exposure from 16 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1075,51	-572,49	640,56	272,59	92,12	0,90
Probabilidad 1	972,90	-153,74	244,55	70,05	85,67	0,96
Probabilidad intermedia	846,14	-502,77	393,74	247,26	41,44	0,78
Pesos	871,16	-378,11	416,00	216,56	38,38	0,85

Tabla S2.4. Datos espaciales para exposición por sedimento de 16 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.4. Spatial data for sediment exposure from 16 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1118,95	-547,85	761,65	236,11	91,91	0,95
Probabilidad 1	928,58	-308,75	263,62	126,31	16,23	0,88
Probabilidad intermedia	894,37	-596,01	408,47	301,57	76,04	0,67
Pesos	873,09	-479,60	384,90	213,57	24,84	0,83

Tabla S2.5. Datos espaciales para exposición total de 24 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.5. Spatial data for total exposure from 24 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1091,77	-572,19	665,22	264,60	92,77	0,92
Probabilidad 1	971,25	-164,01	240,73	54,66	88,12	0,97
Probabilidad intermedia	857,18	-504,53	393,58	251,46	39,97	0,77
Pesos	880,71	-379,06	420,67	215,80	37,82	0,86

Tabla S2.6. Datos espaciales para exposición por sedimento de 24 repeticiones en escala 1:1.

*Table S2.6. Spatial data for sediment exposure from 24 repetitions at 1:1 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1172,15	-511,93	778,26	252,76	93,12	0,95
Probabilidad 1	933,41	-340,17	263,03	204,01	7,52	0,63
Probabilidad intermedia	913,63	-637,13	519,05	262,27	86,39	0,86
Pesos	890,88	-487,19	365,61	312,64	52,04	0,52

Tabla S2.7. Datos espaciales para exposición total de 8 repeticiones en escala 3:4.

*Table S2.7. Spatial data for total exposure from 8 repetitions at 3:4 scale.*

Elipse	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	a	b	$\theta$	$\epsilon$
Probabilidad 0	1081,17	-588,19	593,46	307,15	90,26	0,86
Probabilidad 1	973,52	-256,02	322,66	85,85	81,59	0,96
Probabilidad intermedia	832,22	-497,21	434,39	274,23	67,80	0,78
Pesos	873,76	-381,71	404,08	232,75	67,75	0,82

Tabla S2.8. Datos espaciales para exposición por sedimento de 8 repeticiones en escala 3:4.

*Table S2.8. Spatial data for sediment exposure from 8 repetitions at 3:4 scale.*

S3. Cálculos de los porcentajes de área expuesta total y por sedimento para cada experimento, realizados a partir de la cuantificación de celdas expuestas respecto a la cantidad de celdas totales de la grilla.

Repetición	Celdas Totales	Exposición Total	Exposición Sedi- mento	% Total	% Sedimento
1	10387	4325	2261	41,64	21,77
2	10387	4286	1268	41,26	12,21
3	10387	4003	1139	38,54	10,97
4	10387	4569	1510	43,99	14,54
5	10387	4560	1695	43,90	16,32
6	10387	4001	1048	38,52	10,09
7	10387	4452	1489	42,86	14,34
8	10387	3799	893	36,57	8,60
9	10387	4004	1944	38,55	18,72
10	10387	4041	1443	38,90	13,89
11	10387	4044	1333	38,93	12,83
12	10387	4104	1115	39,51	10,73
13	10387	4754	1755	45,77	16,90
14	10387	4657	1521	44,83	14,64
15	10387	3589	1077	34,55	10,37
16	10387	3159	817	30,41	7,87
17	10387	5026	1957	48,39	18,84
18	10387	4225	1592	40,68	15,33
19	10387	4160	1129	40,05	10,87
20	10387	4067	1344	39,15	12,94
21	10387	4157	1354	40,02	13,04
22	10387	4584	1350	44,13	13,00
23	10387	3612	926	34,77	8,91
24	10387	3875	1168	37,31	11,24

Tabla S3.1. Porcentajes de área expuesta para escala 1:1.

*Table S3.1. Percentages of exposed area for the 1:1 scale.*

Repetición	Celdas Totales	Exposición Total	Exposición Sedimento	% Total	% Sedimento
1	10953	4351	1748	39,72	15,96
2	10953	5357	1635	48,91	14,93
3	10953	5513	1507	50,33	13,76
4	10953	6185	1817	56,47	16,59
5	10953	6021	2356	54,97	21,51
6	10953	5141	1776	46,94	16,21
7	10953	6730	2300	61,44	21,00
8	10953	7258	2240	66,26	20,45

Tabla S3.2. Porcentajes de área expuesta para escala 3:4.

*Table S3.2. Percentages of exposed area for the 3:4 scale.*

**S4.** Resumen de las medidas estadísticas de los diagramas de caja generados a partir de los datos de exposición total y exposición por sedimento para diferentes escalas y distinto número de repeticiones.

	Escala	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Rango valores típicos	Q1	Q3	IQR
Exposición total	1:1	41,45	36,57	43,99	7,41	38,53	43,12	4,59
	3:4	52,65	39,72	66,26	26,54	48,42	57,71	9,30
Exposición sedimento	1:1	13,27	8,60	21,77	13,17	10,75	14,98	4,24
	3:4	16,40	13,76	21,51	7,75	15,70	20,59	4,89

Tabla S4.1. Medidas estadísticas para diagramas de caja al variar la escala del modelo.

*Table S4.1. Statistical measures for boxplots varying the model scale.*

	Tamaño muestra	Mediana	Valor mínimo	Valor máximo	Rango valores típicos	Q1	Q3	IQR
Exposición total	8	41,45	36,57	43,99	7,41	38,53	43,12	4,59
	16	39,22	34,55	45,77	11,22	38,53	43,12	4,59
	24	39,77	34,55	48,39	13,84	38,53	43,12	4,59
Exposición sedimento	8	13,27	8,60	21,77	13,17	10,75	14,98	4,24
	16	13,36	7,87	21,77	13,90	10,64	15,06	4,42
	24	12,97	7,87	18,84	10,97	10,84	14,81	3,98

Tabla S4.2. Medidas estadísticas para diagramas de caja al variar el número de experimentos.

*Table S4.2. Statistical measures for boxplots varying the number of experiments.*

**S5.** Resumen de las significancias estadísticas obtenidas para los distintos grupos de datos analizados mediante el test de normalidad Shapiro-Wilk, donde un p-valor < 0,05 conduce a rechazar la hipótesis nula de que el grupo de datos sigue una distribución normal.

<b>Exposición total</b>	Escala 1:1	p-valor = 0,3924
	Escala 3:4	p-valor = 0,9931
<b>Exposición por sedimento</b>	Escala 1:1	p-valor = 0,5886
	Escala 3:4	p-valor = 0,1914

Tabla S5.1. Significancia estadística de test de normalidad Shapiro-Wilk para ocho experimentos de cada escala.

*Table S5.1. Statistical significance of the Shapiro-Wilk normality test for eight experiments at each scale.*

<b>Exposición total</b>	8 repeticiones	p-valor = 0,3924
	16 repeticiones	p-valor = 0,4326
	24 repeticiones	p-valor = 0,8842
<b>Exposición por sedimento</b>	8 repeticiones	p-valor = 0,5886
	16 repeticiones	p-valor = 0,7795
	24 repeticiones	p-valor = 0,5099

Tabla S5.2. Significancia estadística de test de normalidad Shapiro-Wilk para distinto número de experimentos de la escala 1:1.

*Table S5.2. Statistical significance of the Shapiro-Wilk normality test for different numbers of experiments at 1:1 scale.*