

ANDRÉS DÍEZ-HERRERO^a; MARIO HERNÁNDEZ RUIZ^a; JULIO LÓPEZ GUTIÉRREZ^a;
JAVIER MARTÍNEZ-MARTÍNEZ^b; JOSÉ F. MEDIATO^a; JUANA VEGAS^a; MARÍA
ÁNGELES PERUCHA^a; DANIEL VÁZQUEZ-TARRÍO^a; K. PATRICIA SANDOVAL-
RINCÓN^a; JULIO GARROTE^c; J. HERIBERTO LORENZO^d; ERNEST BLADÉ I
CASTELLET^e; MARCOS SANZ-RAMOS^e; NIEVES SÁNCHEZ^f; INÉS GALINDO^f

ENSAYOS EN CAMPO DE REMOVILIZACIÓN HÍDRICA DE PIROCLASTOS DEL VOLCÁN DE TAJOGAITE DE 2021 (LA PALMA, ISLAS CANARIAS)

RESUMEN

La erupción del volcán de Tajogaite en la isla de La Palma (Islas Canarias), entre septiembre y diciembre de 2021, generó una ingente cantidad de depósitos piroclásticos de caída (tefra), de los que aún permanecen acumulaciones en sectores próximos al cono que superan los 3 m de espesor. Durante

a Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid. andres.diez@igme.es, <https://orcid.org/0000-0003-1106-191X>. m.hernandez@igme.es, <https://orcid.org/0000-0002-4088-2269>. j.lopezgu@igme.es, <https://orcid.org/0000-0003-4250-8788>. jf.mediateo@igme.es, <https://orcid.org/0000-0002-4333-1163>. j.vegas@igme.es, <https://orcid.org/0000-0001-9137-0020>. ma.perucha@igme.es, <https://orcid.org/0000-0003-1960-9265>. d.vazqueztarrio@igme.es, <https://orcid.org/0000-0002-5658-4426>. kp.sandoval@igme.es, <https://orcid.org/0009-0000-5934-659X>

b Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC). C/ La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Comunidad de Madrid). javier.martinez@igme.es, <https://orcid.org/0000-0002-2067-6644>

c Dept. Geodinámica, Estratigrafía, y Paleontología, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid (UCM). C/ José Antonio Nováis, 12, 28040 Madrid. juliog@ucm.es, <https://orcid.org/0000-0002-7727-8014>

d Parque Nacional Caldera de Taburiente (Gobierno de Canarias), Centro de Visitantes de El Paso. Carretera general de Padrón, n.º 47, 38750 El Paso (Santa Cruz de Tenerife). jlorperl@gobiernodecanarias.org, <https://orcid.org/0009-0008-1423-6811>

e Instituto Flumen, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) - International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona. ernest.blade@upc.edu, <https://orcid.org/0000-0003-1770-3960>. marcos.sanz-ramos@upc.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2534-0039>

f Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), Unidad Territorial de Canarias. C/ Alonso Alvarado, 43, 2A, 35003 Las Palmas de Gran Canaria. n.sanchez@igme.es, <https://orcid.org/0000-0001-9239-5254>. i.galindo@igme.es, <https://orcid.org/0000-0002-2545-5234>

Fecha de recepción: 11-09-2024. Fecha de aceptación: 01-10-2024.

la erupción, y con posterioridad a esta, se ha producido la removilización de la tefra, tanto por acciones antrópicas de retirada y limpieza en edificios, vías de comunicación y otras infraestructuras, como por procesos naturales debidos a las dinámicas volcánica, eólica, gravitacional e hídrica. Para estimar la capacidad de removilización hídrica en los procesos naturales y prevenir posibles peligros y riesgos asociados a eventos extremos de tipo *lahar* por precipitaciones intensas, se han realizado ensayos de removilización antrópica en campo, usando lluvia artificial y escorrentía concentrada sobre microparcelas experimentales y sectores de laderas y fondo de uno de los barrancos del sector suroccidental de la isla (barranco de Tamanca). Con ellos se ha podido estimar qué variables (pendiente, granulometría y tipo de cobertura de la superficie, tefra desnuda, vegetada o roca consolidada) condicionan tanto la generación de la escorrentía como el inicio de la removilización, así como obtener unos valores umbral orientativos. Entre todas las variables, la que mayor influencia tiene en el inicio de las removilizaciones no es la pendiente, como cabría esperar, sino la concentración de la escorrentía en superficies impermeables (rocas consolidadas, superficies antropizadas) o en las ramas y tallos de la vegetación arbustiva y arbórea. Estos resultados tienen utilidad práctica para la cartografía preventiva de las zonas susceptibles de ser removilizadas, como valores de entrada en modelos numéricos de desencadenamiento y circulación de flujos no newtonianos por laderas y barrancos, de los que derivarán mapas de riesgos para la ordenación territorial y la gestión de las emergencias.

PALABRAS CLAVE: lahares; La Palma; piroclastos; removilización; Tajogaite; volcán.

FIELD TESTS OF HYDRIC TEPHRA REMOBILISATIONS AT THE TAJOGAITE 2021 VOLCANO (LA PALMA, CANARY ISLANDS, SPAIN)

ABSTRACT

The eruption of the Tajogaite volcano at the island of La Palma (Canary Islands, Spain) between September and December 2021 generated a huge amount of fallout deposits (tephra), of which there are still accumulations of more than 3 metres thick in sectors close to the cone. During and after the eruption, the tephra has been remobilised, both by anthropic actions of removal from buildings, roads and other infrastructures, and by natural processes due to volcanic, aeolian, gravitational and runoff dynamics. Several remobilisation tests were carried out on field to estimate the water remobilisation capacity and prevent possible hazards and risks associated with extreme lahar-type events due to intense rainfall. They consisted on artificial rainfall and concentrated runoff on experimental micro-plots and sectors of slopes and at the bottom of one of the ravines in the southwestern sector of the island (Tamanca ravine). Therefore, it has been possible to estimate which variables (slope, granulometry, type of surface cover) condition both the generation of runoff and the start of remobilisation, as well as some indicative threshold values. Among all the variables, the one that has the greatest influence on the onset of remobilisations is not the slope, as might be expected, but the concentration of runoff on impermeable surfaces (consolidated rocks, anthropised surfaces) or on the branches and stems of shrub and tree vegetation. These results are of practical use for preventive mapping of areas susceptible to

suffer remobilisation. They may constitute the input for numerical models simulating the triggering and circulation of non-Newtonian flows on slopes and gullies, from which risk maps for land-use planning and emergency management will be derived.

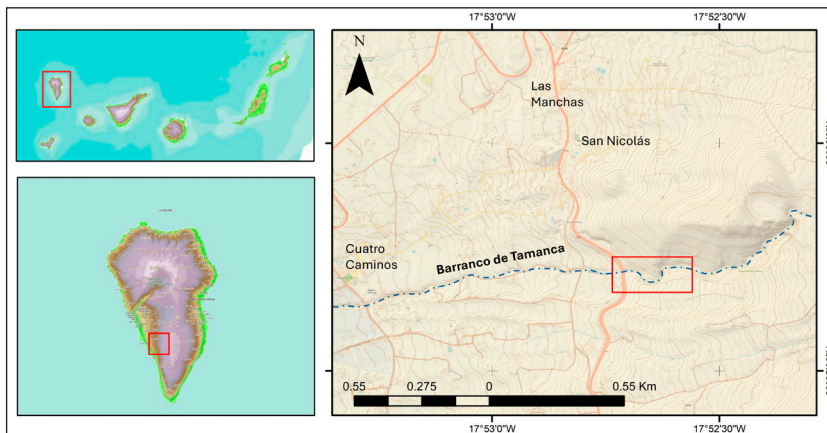
KEYWORDS: lahars; La Palma; remobilization; Tajogaite; tephra; volcano.

INTRODUCCIÓN Y ZONA DE ESTUDIO

La erupción volcánica del Tajogaite en 2021 y los materiales emitidos

Entre el día 19 de septiembre y el 13 de diciembre de 2021 tuvo lugar una erupción volcánica fisural con estilo eruptivo predominantemente estromboliano con algunos pulsos freatomagmáticos (magnitud VEI 3; PEVOLCA, 2021), emisión de gases, piroclastos y lavas desde la zona comprendida en el paraje de Cabeza de Vaca, en la vertiente noroccidental de la dorsal volcánica de Cumbre Vieja, en la isla de La Palma (Islas Canarias).

Figura 1. Situación geográfica de la zona de estudio en el contexto del archipiélago canario, en la isla de La Palma, dentro del sector suroccidental de la dorsal de Cumbre Vieja y el barranco de Tamanca en el cruce de la carretera LP-2 entre las localidades de Jedey y Las Manchas



Fuente de la base topográfica: WMS Mapa Topográfico Integrado de Canarias, IDECanarias.

A lo largo del evento eruptivo se emitió un volumen de lava superior a 200 Mm^3 a través de dos alineaciones eruptivas, la principal de dirección $\text{N}130^\circ\text{E}$ y $\text{N}70^\circ\text{E}$ en las fases finales (Rodríguez Pascua et al., 2024). Esta fisura, de 0,5 km de longitud, llegó a tener más de una docena de centros de emisión que generaron un cono de piroclastos principal, con un volumen de 34 Mm^3 , 200 m de altura máxima respecto a la topografía preeruptiva, 700 m de longitud media basal y un cráter principal elíptico de $172 \times 106 \text{ m}$ (PEVOLCA, 2021; Pérez-López et al., 2024). El campo de coladas de lava originado, de composición tefrítica-basanítica, ha ocupado una superficie superior a 1200 ha, con tipología mayoritariamente de

tipo a'ā (localmente denominado “malpaís”) y minoritariamente de tipo pāhoehoe (principalmente del tipo “cordadas”), con un espesor máximo estimado de 70 m y medio de 12 m y con un recorrido máximo subaéreo superior a 6,5 km y submarino superior a 1,1 km (PEVOLCA, 2021; Romero et al., 2022; Sanz-Mangas et al., 2024). También se han formado dos deltas lávicos principales, con una extensión subaérea de 48 ha y submarina estimada de 21 ha (Sáez-Gabarrón et al., 2024).

El depósito de tefra acumulado nada más finalizar la erupción oscilaba entre los 3 m de espesor en las zonas próximas al cono principal y una capa de espesor milimétrico en las partes más distales. Está formado por piroclastos de tamaños entre bloques y bombas (con un alcance máximo en trayectorias balísticas de 1,5 km desde los cráteres; Day et al., 2022), lapilli y ceniza (tefra; Mata et al., 2022; Romero et al., 2022). Esta última alcanzó toda la isla de La Palma (figura 1) y se registró incluso en el resto de Islas Canarias occidentales en las fases de mayor explosividad (Bonadonna et al., 2023; Montoya et al., 2024).

La removilización de los productos piroclásticos del volcán de Tajogaite y su interés

Al tratarse de una erupción calificada como urbana, puesto que afectó gravemente a varios núcleos de población de los municipios de Los Llanos de Aridane, El Paso y Tazacorte y a miles de edificaciones (viviendas, comercios e industrias), vías de comunicación y explotaciones agropecuarias, muchos de los productos y las mesoformas y microformas volcánicas que se iban generando también fueron modificadas o destruidas antrópicamente desde el principio de la erupción, para garantizar la seguridad de personas y bienes (hundimiento de cubiertas y tejados), y recuperar la actividad socioeconómica del sector afectado (apertura de vías provisionales de comunicación y abastecimiento de agua y energía). Pero, sobre todo desde la finalización de la erupción y el retorno de la población a las zonas afectadas, se está produciendo un proceso acelerado de remoción de los mantos piroclásticos y de las coladas lávicas para la apertura de vías de comunicación, calles, limpieza de edificaciones y campos de cultivo, reposición de tendidos de energía y comunicaciones, etc. (Bautista, 2022).

A este desplazamiento y retirada de los materiales y productos eruptivos por acción antrópica se suma una removilización natural, durante y tras la erupción, por varios procesos geodinámicos y acciones geomorfológicas: *i*) los procesos volcánicos, como el avance de las coladas de lava, que enterraron, compactaron, desplazaron, empujaron e incorporaron ingentes cantidades de depósitos piroclásticos previos o coetáneos; *ii*) los procesos eólicos por vientos persistentes que erosionaron las acumulaciones de tefra y produjeron acumulaciones y formas deposicionales en otros sectores (Mediato et al., 2023); *iii*) los procesos gravitacionales, que produjeron removilizaciones de piroclastos por diferentes tipos de movimientos del terreno, desde desprendimientos hasta deslizamientos, avalanchas de derrubios (*debris avalanches*), flujos granulares de derrubios (*debris flows*), etc.; y *iv*) procesos fluviales y de arroyada *sensu lato*, incluyendo desde pequeños regueros (*rills*), canalillos entrelazados (*braids*), regueros y cárcavas (*gullies*) en laderas y vertientes (Díez-Herrero et al., 2023, 2024; figura 2), hasta el desplazamiento por cañadas y barrancos en la fase canalizada de la escorrentía superficial en eventos de avenidas torrenciales súbitas (*flash floods*) y avenidas de derrubios (*debris floods*).

Figura 2. Removilización natural de los mantos de piroclastos del volcán Tajogaite como consecuencia de eventos posteruptivos de precipitación intensa, que generaron erosión en la cabecera e incisión de canales, transporte y depósito de diques naturales (*levees*) y lóbulos superpuestos de escala decimétrica, formando conos complejos



El tamaño de la flecha negra en la escala de cartulina blanca son 10 cm de largo.

Tal ha sido el volumen y la intensidad de las removilizaciones artificiales y naturales de los productos piroclásticos de la erupción volcánica, que se han tenido que proponer diferentes estrategias de geoconservación de algunas de las formas y materiales más singulares de interés patrimonial (Vegas et al., 2022).

El estudio de las removilizaciones naturales (o antrópicamente inducidas) de piroclastos durante y tras una erupción volcánica tiene un doble interés científico-técnico: por un lado, desde el punto de vista teórico y académico, la caracterización y cuantificación de los procesos y formas de removilización interesa para conocer la evolución de los relieves volcánicos y de su incidencia en los paisajes presentes y pretéritos; y, por otro, desde una perspectiva técnica y aplicada, la predicción y estimación espacio-temporal de la removilización futura de la tefra puede tener interés en los estudios de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo asociados a eventos extremos súbitos (lahares, flujos hiperconcentrados, flujos de derrubios, avenidas de derrubios).

Efectivamente, de todos los procesos y fenómenos naturales de removilización de piroclastos en entornos volcánicos, aquellos ligados a procesos hidrodinámicos suelen ser los potencialmente más peligrosos, bien sea por la mezcla de la tefra con agua procedente de la rotura de almacenamientos (lagos naturales o embalses artificiales), bien sea por la rápida fusión de acumulaciones de nieve o hielo (glaciares), bien sea por precipitaciones prolongadas o intensas, que generan flujos de comportamiento dinámico no newtoniano, habitualmente agrupados bajo la denominación genérica de lahares (aunque muchas veces no utilizada de forma apropiada y acorde con dónde y cómo fueron definidos).

Estos flujos hídricos no newtonianos con materiales piroclásticos se suelen clasificar entre los peligros volcánicos indirectos, secundarios o derivados, a pesar de que en numerosas ocasiones son fenómenos catastróficos que causan mayores daños y efectos que la propia emisión de materiales efusivos. Tal fue el caso de eventos como los lahares por la erupción del Nevado del Ruiz (Colombia), que causó decenas de miles de víctimas mortales en la localidad de Armero en 1985 (Voight, 1990).

El archipiélago canario y en particular las erupciones históricas en la isla de La Palma no son ajenas a estos fenómenos de removilización hídrica súbita, a pesar de tratarse de volcanes monogenéticos y no de grandes estratovolcanes, y a pesar de tratarse de piroclastos de composición fundamentalmente máfica y no sálica como en las cordilleras andinas o los volcanes asiáticos. De hecho, el desastre volcánico documentado que ha producido un mayor número de víctimas mortales en Canarias no ha sido ningún peligro directo asociado a las erupciones históricas conocidas (desde el siglo xv a la actualidad), que han producido en total 24 víctimas mortales (la mayor parte de ellas por los sismos asociados a la erupción o la emisión de gases), sino un desastre volcánico indirecto: la denominada tragedia de El Llanito, una avenida torrencial súbita con elevada carga sólida piroclástica transportada, que se produjo la noche del 15 al 16 de enero de 1957 en el barranco de Amargavinos a su paso por la pedanía de San Pedro (Breña Alta, La Palma), tras unas intensas lluvias en la vertiente oriental de Cumbre Vieja que removilizaron los piroclastos depositados unos años antes durante la erupción del volcán San Juan (junio-agosto de 1949) y otros volcanes anteriores. Según datos de la época (prensa local y nacional; informes técnicos), durante este único evento y en apenas unas horas se produjeron: 22 (o 24, según las fuentes) víctimas mortales, cuyos nombres y edades aparecen en el monolito conmemorativo existente en el actual puente sobre el barranco; 413 personas evacuadas o desplazadas; 101 viviendas totalmente destruidas; 74 viviendas parcialmente destruidas; y 20 puentes con daños. Incluso se tienen noticias vagas de que, poco después de esa erupción del volcán San Juan en 1949, las fuertes lluvias otoñales e invernales produjeron flujos de cenizas que destruyeron puentes y las primeras reparaciones de las carreteras en la vertiente occidental de Cumbre Vieja.

Objetivo y alcance de la investigación

Por este doble interés del estudio de las removilizaciones hídricas de la tefra del volcán de Tajogaite de 2021, el teórico y el aplicado, pero sobre todo por sus implicaciones en el análisis de la susceptibilidad del desencadenamiento de los flujos no newtonianos, su peligrosidad y los riesgos asociados, desde el inicio de la erupción y sobre todo desde su finalización, el equipo del IGME-CSIC, con la colaboración de otros profesores universitarios e investigadores (Universidad Complutense de Madrid –UCM– y Universitat Politècnica de Catalunya –UPC–) decidieron hacer un estudio integral de estos fenómenos, los factores condicionantes y desencadenantes y su posible predicción espaciotemporal. Para ello se adoptó la metodología general, altamente contrastada en otras zonas con lahares frecuentes (Galárraga, 2005), que consta de varias etapas o tareas: *i*) estudio del espesor y características de los piroclastos; *ii*) caracterización del régimen de precipitaciones; *iii*) estimación del régimen de escurrimiento; *iv*) cálculo del porcentaje de piroclastos removilizables; y *v*) modelación numérica de los flujos no newtonianos. La

primera tarea, la caracterización de la tefra depositada por el volcán Tajogaite y su distribución espacio-temporal, ya ha sido abordada por diversos autores y dentro del equipo IGME-CSIC con la operación Cenicienta (Montoya et al., 2024). El régimen de precipitaciones en el entorno del volcán de Tajogaite y la caracterización morfodinámica de las removilizaciones posteruptivas también han sido tratadas en trabajos recientes (Díez Herrero et al., 2024). Por ello, antes de abordar la fase final de modelación numérica (en desarrollo), restan por abordar las tareas de estimación del régimen de escurrimiento y el cálculo del porcentaje de piroclastos removilizables según diferentes variables condicionantes.

En consecuencia, el objetivo principal de este trabajo es la caracterización de los parámetros hidrológicos (como el umbral de escorrentía), morfométricos (como la pendiente) y fisiográficos (como la vegetación) que condicionan el inicio de las removilizaciones de piroclastos en la zona de afección del volcán de Tajogaite. Y, para ello, se han diseñado y desarrollado una serie de ensayos de precipitación artificial sobre diferentes superficies y coberteras en campo que permiten estimar esos parámetros y determinar las variables de control y sus valores umbral.

No obstante, estos ensayos y sus resultados tienen un alcance limitado, como se expondrá en el apartado de discusión, y forman parte de una marcha metodológica más general, que requerirá que sean completados y replicados para que se puedan considerar estadísticamente representativos.

METODOLOGÍA

Para el estudio de la génesis de la escorrentía superficial (abstracciones iniciales, umbral y coeficiente de escorrentía, permeabilidad vertical saturada) y la caracterización del inicio de la removilización de materiales por erosión superficial se viene empleando desde hace décadas una amplia gama de metodologías y aproximaciones (Sala y Gallart, 1988; Cerdá y Jordá, 2010): simuladores de lluvia artificial; infiltrómetros, tanto de anillo doble como de anillo sencillo; levantamientos microtopográficos seriados y microperfiladores; parcelas experimentales, cerradas o abiertas, y a diferentes escalas, desde las cuencas hidrográficas, laderas o microparcels; trampas de captación de sedimentos removilizados, desde cajas Gerlach, divisores y fosos con sistemas de monitorización; marcaje de materiales removilizables por técnicas cromáticas, magnéticas o radioseguimiento; monitorización instrumental del proceso de movilización, con aparatos como turbidímetros; y adquisición de imágenes seriadas (videgrabaciones terrestres, drones, LiDAR, InSAR).

La elección de uno u otro método se realiza en función de cuáles sean los objetivos concretos, el contexto de estudio y la disponibilidad de recursos humanos y materiales. En nuestro caso, hubo que recurrir a metodologías sencillas y de fácil ejecución, ya que la investigación se desarrolló durante o tras una erupción volcánica en situación de emergencia nivel 2 (y luego nivel 1), compatibilizándolo con el asesoramiento científico a la dirección y gestión de la emergencia (PEVOLCA) y con restricción de acceso a determinadas zonas.

Además, a las incertidumbres y fuentes de error en los estudios hidrológicos-geomorfológicos habituales con estas técnicas en áreas emergidas, en los terrenos volcánicos se suman las particularidades de estos materiales, como: el denominado efecto de la repelencia al agua (Chhoden et al., 2009); la

heterogeneidad en la cohesión debida a las propiedades magnéticas (Larrasoña et al., 2024), eléctricas y termodinámicas de los materiales piroclásticos (Ontiveros-Ortega et al., 2023); la disposición de los depósitos de tefra y los ajustes por compactación y subsidencia cuando acaban de ser depositados hace días o pocos meses; el diferente comportamiento hidrológico de la secuencia de piroclastos según su granulometría, como la capa de ceniza fina caída el 22 de octubre, que actúa como barrera del flujo subsuperficial; y la escasez de estudios experimentales y datos empíricos disponibles para terrenos volcánicos en la literatura internacional, salvo excepciones en ambientes andinos (Zehetner y Miller, 2006).

Por ello, lejos de recurrir a fórmulas establecidas o valores tabulados estandarizados establecidos en zonas volcánicas (Mongil Manso, 2010), que no serían de aplicación para otros objetivos o fuera de las zonas donde fueron establecidos, ni a ensayos en laboratorio con cambios en la disposición y cohesión de los materiales (Jones et al., 2017; Williams et al., 2021), se ha considerado importante desarrollar ensayos empíricos en campo, específicos para la zona de estudio, sin alterar sus condiciones naturales. El diseño experimental de los ensayos se ha hecho para correlacionar las estimaciones de estos parámetros a tres escalas espaciales complementarias y sucesivas en la removilización de los piroclastos del Tajogaite:

- Microparcels acotadas en interfluvios, de área conocida, mediante precipitación artificial con medios manuales (regaderas).
- Sectores de laderas y vertientes, sin perímetro delimitado, con precipitación artificial con medios mecánicos-hidráulicos (camiones autobomba).
- Lecho de barrancos, con escorrentía concentrada a partir de entrada mecánica-hidráulica (camiones autobomba).

En los tres casos se realizó un control de la precipitación o caudales de entrada y los tiempos transcurridos desde el inicio de los ensayos hasta el inicio de la escorrentía superficial, la removilización o la formación de formas de erosión (surcos, canales) o depósito (lóbulos).

Ensayos en las microparcels acotadas en interfluvios

Para la estimación experimental del umbral de escorrentía (P_0) y del umbral de removilización superficial de piroclastos (P_r) en superficies de interfluvios y laderas con pendientes suaves desprovistas de vegetación arbustiva (piroclastos en superficie), se seleccionó una veintena de localizaciones representativas de la zona afectada por la caída y acumulación de tefra en la erupción del Tajogaite (sector suroccidental del cono y las coladas), tanto en Las Manchas como en las proximidades del mirador astronómico de El Pilar.

Las microparcels experimentales se delimitaron hincando en la superficie un aro metálico de 30 cm de diámetro (0,07 m² de superficie interior) y 10 cm de altura, semejante al utilizado como molde en repostería (figura 3), al que se practicó una apertura en el perímetro para registrar la salida de escorrentía y recoger los materiales removilizados (cubicación y granulometría). Para los ensayos de infiltración de anillo simple se usaron también vasos cilíndricos de medida (0,11 m²) y aros elípticos (0,10 m²).

El sistema generador de la lluvia artificial, por motivos logísticos (actuación durante la emergencia por erupción volcánica de 2021), hubo que simplificarlo respecto a los sistemas habituales de proyectos de investigación (Benito et al., 2001), que requieren la elección detallada del tamaño de gota de lluvia (mediante válvulas), la altura y velocidad de caída, y la intensidad de precipitación. Aquí únicamente se pudo controlar la intensidad de lluvia, tratando que los otros parámetros fueran uniformes en los diferentes ensayos y representativos de la lluvia habitual de Canarias, con el simple empleo de regaderas manuales aforadas.

Todos los ensayos fueron documentados mediante fotografías previas, durante y posteriores de las microparcels, así como con videograbaciones de cada ensayo. La toma de datos se completaba con la caracterización superficial, levantamiento de columnas y toma de muestras de los piroclastos (lapilli, ceniza).

Figura 3. Materiales básicos necesarios para los ensayos de lluvia artificial en microparcels experimentales en interfluvios y medición de la escorrentía y la removilización de piroclastos empleados durante la emergencia volcánica de 2021 en la isla de La Palma



Ensayos en sectores de laderas y lecho de barrancos

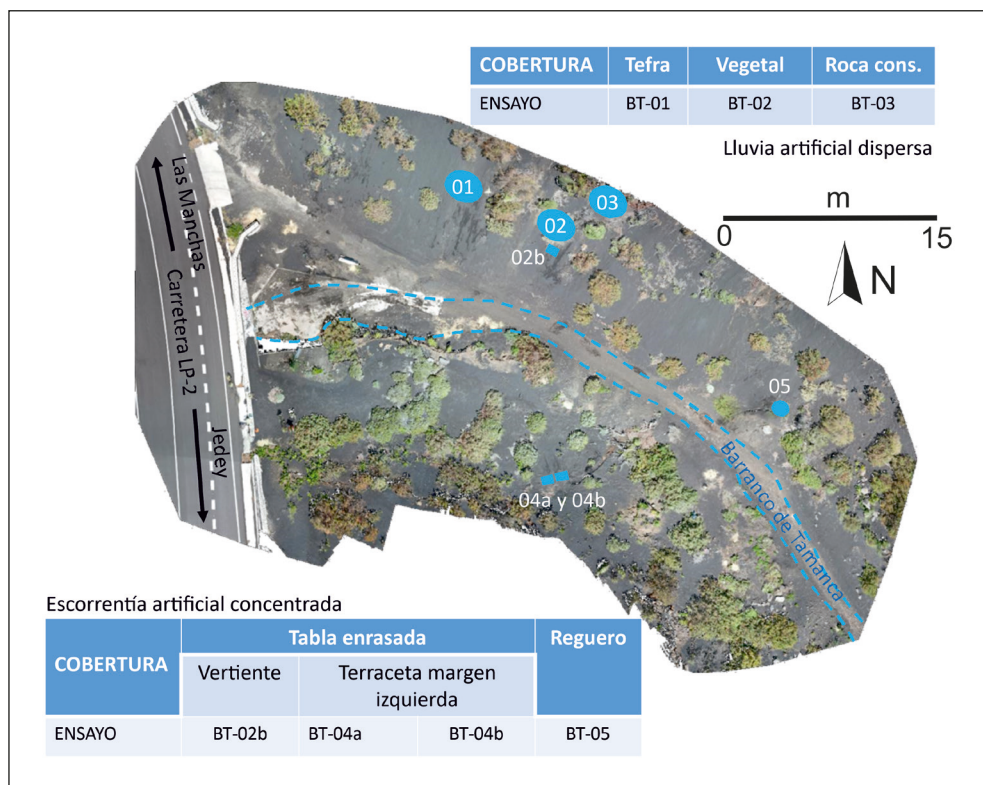
Para la selección de los parajes en campo donde se realizarían los ensayos de parcelas experimentales en laderas y barrancos, se cruzaron cartografías temáticas buscando la coincidencia de varios factores limitantes:

- Existencia de una acumulación con espesores significativos de piroclastos (lapilli y ceniza) para poder ser removilizados, con diferente rango de pendientes y cubierta vegetal (suelo desnudo, cubierta herbácea, cubierta arbustiva), lo que restringe la zona de ensayos al sector suroccidental del cono y coladas (zona de Las Manchas-Jedey).

- Existencia de disponibilidad de agua abundante para realizar los ensayos de lluvia artificial y poder recargar con rapidez los depósitos de las autobombas, lo que restringe el sector a las proximidades de las balsas de riego o zonas accesibles al tráfico rodado con tomas de agua.
- Existencia de vías de comunicación para tráfico rodado que posibilite el acceso de los camiones autobomba y la logística del equipo humano y material, lo que restringe la zona de ensayos a las principales carreteras asfaltadas y algunas de las pistas forestales.
- Existencia de barrancos o cañadas donde ensayar la removilización en el lecho de corrientes fluviales efímeras, representativas de La Palma.

La única localización donde confluyen todos los factores limitantes es el cruce del barranco de Tamanca con la carretera LP-2, entre las localidades de Jedey y Las Manchas (figura 4).

Figura 4. Ortoimagen de la localización del tramo del barranco de Tamanca (BT), aguas arriba del drenaje transversal bajo la carretera LP2, en la cual se concentraron los ensayos en lluvia artificial en laderas (BT-01, BT-02 y BT-03) y escorrentía en rellanos y fondo de aquel (BT-02b, BT-04a, BT-04b y BT-05)



Los sectores de las laderas y fondo del barranco donde realizar los ensayos se eligieron buscando abarcar una amplia gama de pendientes y coberteras superficiales (piroclastos desnudos, cubierta arbustiva, afloramientos de rocas consolidadas en cabecera); y además con suficiente extensión como para repetir los ensayos, si fuera necesario, sin tener que utilizar sectores previamente alterados.

El sistema generador de la lluvia artificial para sectores de ladera, de aproximadamente 9 m² de superficie, tuvo que ser necesariamente mecánico-hidráulico, empleando camiones autobomba de incendios urbanos y forestales, que disponen de bombas de presión regulable y mangueras con válvulas difusoras de caudal y tipología de lluvia variables. En concreto, se emplearon en los ensayos dos camiones autobomba con depósitos de agua de capacidades de 9000 l (nodriza de bomberos forestales del parque nacional de la Caldera de Taburiente) y 3000 l (bomberos del Cabildo Insular de La Palma), con recargas del primero al segundo para asegurar la continuidad de los ensayos. Los caudales de salida se establecieron en 300 l/min (con presiones entre 6 y 7 atm), y la altura de vertido fue la correspondiente a una persona ubicada en la parte superior del depósito del camión, con trayectoria parabólica de vertido. Para el control de la lluvia artificial total precipitada en el sector de ladera, se ubicaron cuatro pluviómetros de copa totalizadores en los cuatro extremos del sector ensayado.

El sistema generador de la escorrentía para los ensayos en el lecho y márgenes del barranco de Tamanca fueron también los camiones autobomba con mangueras, pero sin válvulas de difusión, sino con boca libre, con control del caudal efectivo emitido mediante aforo con bidón de capacidad conocida. Para conocer el ancho y la profundidad de la lámina de la escorrentía, se utilizaron unas tablas cuadradas (50 × 50 cm) de madera aglomerada sobre las que se realizó el vertido del caudal de la manguera.

En todos los ensayos, el control visual del inicio de la escorrentía, removilización y generación de formas erosivas (regueros) y deposicionales (lóbulos) fue realizado por las mismas dos personas, provistas de cronómetros.

Además, con anterioridad y posterioridad a los ensayos en las vertientes y lecho del barranco, se realizaron vuelos con dron para la obtención de imágenes para restitución fotogramétrica de modelos digitales de elevación de alta resolución espacial, grabación de los ensayos en vídeo y realización de columnas estratigráficas del depósito de piroclastos, con toma de muestras para granulometría en las zonas de removilización y en los depósitos (lóbulos y mantos).

De tal forma que la secuencia completa y detallada de las tareas realizadas es la siguiente (figura 5):

1. Reconocimiento general del tramo del barranco en el que se realizarán los ensayos, con medición de longitudes y pendientes de las vertientes y fondo del barranco.
2. Levantamiento de columna sedimentológica de la secuencia superficial de tefra en un lateral, fuera de la zona ensayada.
3. Marcaje de puntos de control topográfico en elementos fijos (no removilizables) con pintura en espray.

Figura 5. Tareas para la realización de los ensayos de removilización de piroclastos en las laderas, lecho y replanos del barranco de Tamanca (véase explicación según la numeración en el texto)



4. Toma de coordenadas X, Y y Z de los puntos de control con receptor GPS en modo diferencial con correcciones RTK.
5. Vuelo previo a los ensayos con drones, para posterior restitución fotogramétrica y obtener MDE de alta resolución.
6. Selección de las parcelas de ensayo.
7. Colocación de pluviómetros de copa en los extremos de la parcela de ensayo y un jalón-flexómetro de escala.
8. Ubicación del camión motobomba en posición frontal y de los operarios en la parte superior del vehículo.
9. Selección de la boca o válvula de salida, el caudal y la presión de la manguera.
10. Videograbación y fotografiado del ensayo completo, tanto desde superficie como con un vuelo de dron.
11. Inicio del ensayo, con cronometrado de tiempos y observación del inicio de la escorrentía superficial y la removilización de la tefra.
12. Finalización del ensayo cuando se alcance la removilización significativa, a juicio del coordinador de los ensayos.
13. Medición de la precipitación recogida por los pluviómetros de copa situados en las esquinas de la zona de ensayo.
14. Estimación, si procede, del caudal de salida por la manguera, mediante aforo por cubicación con recipiente (bidón).
15. Vuelo con drones tras los ensayos para posterior restitución fotogramétrica y obtener MDE de alta resolución.
16. Muestreo de la tefra removilizada en los lóbulos y depósitos para análisis granulométrico.

RESULTADOS

Los ensayos se realizaron tanto durante el proceso eruptivo (16 a 19 de octubre de 2021) como con posterioridad a este, en varias campañas en diciembre de 2021 y abril de 2024. Los resultados preliminares de estos ensayos, pendientes de ser calibrados y validados y, en su caso, completados con otros ensayos en diferentes rangos de valores (granulometría, pendientes, orientación, vegetación...), se enumeran a continuación.

Resultados de los ensayos en las microparcels acotadas en interfluvios

Se realizaron un total de 18 ensayos en microparcels, con granulometría superficial de piroclastos, tanto de lapilli como de ceniza, en un rango de pendientes (S) que oscilaron entre el 8 y el 46 %, y con caudal de lluvia artificial entre 52 y 118 l/min. Los resultados de cantidades de lluvia artificial necesaria para inicio de la escorrentía superficial (umbral de escorrentía, P_0) e inicio de la removilización superficial de piroclastos (P_c) se recogen en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Parámetros de control de los ocho ensayos de lluvia artificial en las microparcels experimentales y resultados de generación de escorrentía y removilización

Ensayo n.º	Pendiente (%)	Sustrato	Espesor (cm)	Caudal (l/min)	Precipitación (l/m ²) hasta	
					Escorrentía	Movilización
1	12	Ceniza	4	118	28,0	26,1
2	12	Lapilli	26	118	511,3	
6	15	Piroclastos	30	118	283,9	428,7
7	15	Ceniza	30	118	16,2	33,3
8	55	Ceniza	34	118	68,8	78,6
10	44	Ceniza	34	52	7,8	8,2
14	9	Piroclastos	34	52	36,8	51,0
16	47	Piroclastos	34	52	5,5	5,6

Tabla 2. Parámetros de control de los ensayos de infiltración de agua en la superficie del depósito piroclástico y resultados de los volúmenes específicos

Ensayo n.º	Pendiente (%)	Sustrato	Espesor (cm)	Intensidad de infiltración (l/s)
3		Lapilli	1	0,03
4		Ceniza	1,7	0,01
5		Lapilli	1	0,03
8	55,4	Ceniza	34	0,24
9	55,4	Lapilli	34	0,29
10	44,5	Ceniza	34	0,23
11	44,5	Ceniza	34	0,02
12	44,5	Ceniza	34	0,01
13	44,5	Lapilli	34	0,02
14	34	Piroclastos	0,37	0,22
15	34	Ceniza	0,37	0,20
17	34	Piroclastos	0,37	0,24
18	34	Piroclastos	0,37	0,21

Como puede comprobarse, los valores de precipitación total necesaria para producir el inicio de escorrentía superficial en las microparcels experimentales presentan una amplia dispersión (por encima de un orden de magnitud), entre un máximo de 651,04 l/m² y un mínimo de 12,00 l/m². Esto da una idea de la variabilidad espaciotemporal de las variables que controlan los fenómenos físicos que intervienen en la transformación precipitación-escorrentía, y en la complejidad de diseñar ensayos representativos en campo, con todas las variables actuando.

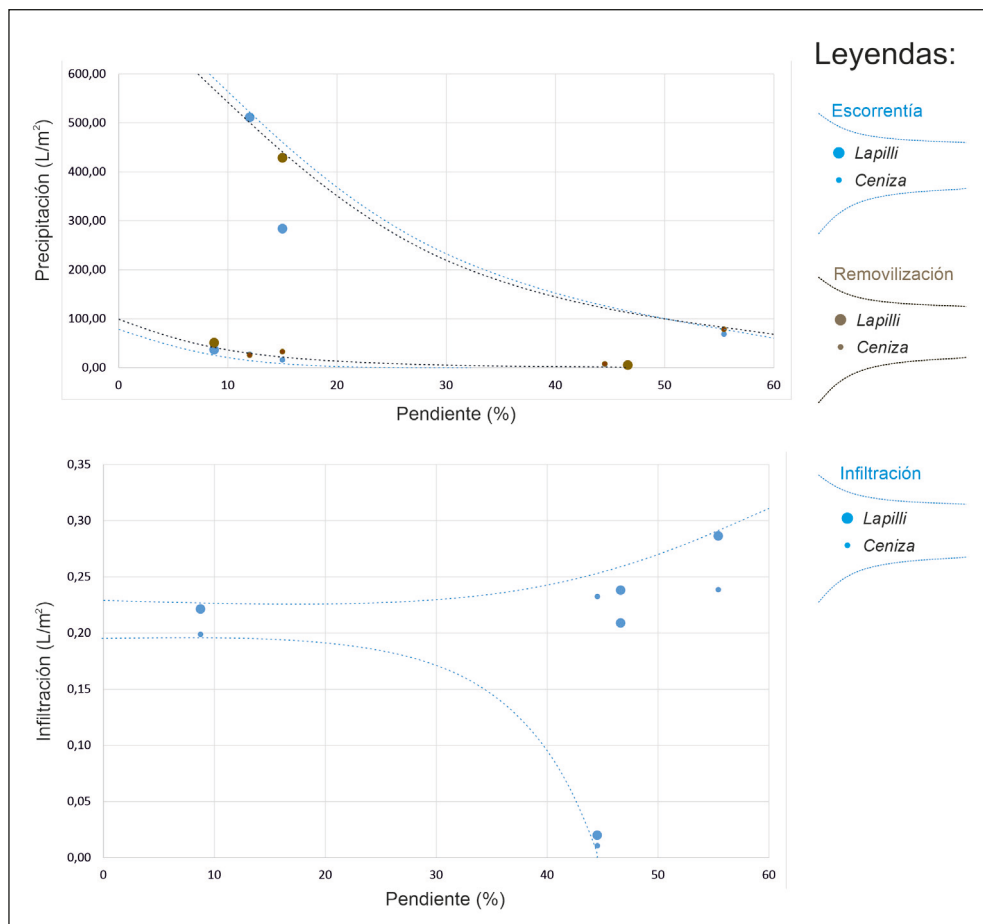
También se puede observar la alta variabilidad en la intensidad de la infiltración areal entre 0,1 y 0,3 l/m²·s, reflejo de que la infiltración es un fenómeno altamente no lineal en este tipo de sustratos o suelos, como da a entender la ecuación de Richards para transporte de agua en un medio poroso no saturado (Richards, 1931) y sus soluciones analíticas (Timlin et al., 1999).

Entre todas las variables físicas que pueden ayudar a entender esta variabilidad espacial de los valores se encuentran las morfométricas (pendiente y orientación de la superficie de ensayo) y las características granulométricas del material piroclástico en superficie (lapilli o ceniza). Por ello se han representado la cantidad total de precipitación areal desencadenante de la escorrentía (umbral de escorrentía, P_0), la removilización de piroclastos (P_r) y las tasas de infiltración frente a la pendiente de la superficie (S), diferenciando entre mantos de lapilli y ceniza (figura 6).

Si bien no parece existir un patrón claro de control de la pendiente o la granulometría de la superficie del ensayo en la precipitación para generar escorrentía, sí que parece observarse una cierta tendencia a que con menores pendientes (5-15 %) son precisas mayores cantidades de precipitación (400-500 l/m²) para iniciarse la escorrentía en las microparcels, mientras que con mayores pendientes (45-55 %) se necesitan menores cantidades de precipitación (inferiores a 100 l/m²). Algo parecido ocurre con la removilización de piroclastos, que requiere variables cantidades altas, de hasta más de 400 l/m² para bajas pendientes (8-15 %), frente a las menores precipitaciones areales (también inferiores a 100 l/m²) para pendientes elevadas de removilización (45-55 %). Aunque no se observa un control granulométrico significativo, sí que se requieren mayores cantidades de precipitación para la generación de escorrentía y removilización en el lapilli respecto a la ceniza del mismo depósito de tefra.

Todo lo contrario parece ocurrir con las tasas de infiltración, que son mayores (del orden de 0,20 a 0,30 l/m²·s) para las mayores pendientes (45 al 55 %), aunque con enorme dispersión de valores y tasas de infiltración ligeramente menores (0,20 a 0,25 l/m²·s) para pendientes suaves (5-10 %). Sí que se observa un cierto control granulométrico, con menores tasas de infiltración en cenizas que en lapilli.

Figura 6. Precipitación (L/m^2) para la generación de escorrentía (P_0) e inicio de la removilización (P_r), y tasas de infiltración ($\text{L}/\text{m}^2\cdot\text{s}$) resultantes de los ensayos en microparcelas de piroclastos en superficie con granulometrías de lapilli o ceniza



Resultados de los ensayos en sectores de laderas y lecho del barranco de Tamanca

Resultados de los ensayos en parcelas de laderas del barranco de Tamanca en diciembre de 2021

En la campaña de diciembre de 2021, aun en situación de emergencia de nivel 2 por la erupción volcánica, se realizaron los 10 primeros ensayos en las vertientes del barranco de Tamanca con objeto de asesorar técnicamente al Comité Científico del PEVOLCA en la previsión de removilizaciones masivas de piroclastos asociadas a eventos de precipitación que agravasen la peligrosidad y generasen riesgos adicionales para la población, sus bienes o los servicios. Se contó con la colaboración de la Unidad

Militar de Emergencias (UME), que aportó dos camiones autobomba de bomberos con su dotación de equipo humano.

Se realizaron en la ladera derecha del barranco de Tamanca, aguas arriba del puente sobre la carretera LP-2, tanto en superficie de piroclastos desnudos como con vegetación arbustiva, con un rango de pendientes (S) del 4 al 37 %, y con caudales de 50, 150, 380 y 600 l/min. Los resultados de esos 10 ensayos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de control de los ensayos de lluvia artificial en los sectores de la ladera del barranco de Tamanca en diciembre de 2021 y su duración

Ensayo n.º	Pendiente (°)	Cobertera del suelo	Caudal (l/min)	Precipitación (l/m ²) inicio	
				Escorrentía	Removilización
1	4	Desnudo	600	42,2	75,6
2	6	Desnudo	380	58,4	81,6
3	6	Desnudo	150	32,8	73,3
4	10	Desnudo	50	22,2	22,2
5	37	Arbustos	50	27,8	27,8
6	37	Arbustos	150	33,3	33,3
7	37	Arbustos	380	9,1	9,1
8	37	Arbustos	600	33,3	33,3
9	35	Desnudo	600	94,4	94,4
10	35	Desnudo	150	166,7	166,7

Los valores resultantes de precipitación para que se produzca la escorrentía (P_0) y removilización (P_r) muestran igualmente una enorme dispersión, nuevamente de un orden de magnitud, entre poco más de 10 l/m² y cerca de 100 l/m²; e incluso hubo un ensayo con más de 160 l/m² que no produjo escorrentía superficial y, por supuesto, tampoco removilización.

Para explicar esta enorme variabilidad en función de los factores condicionantes se ha cruzado la precipitación para generar escorrentía y removilización con la pendiente de la superficie de ensayo y los caudales del ensayo, para observar la posible incidencia de la intensidad de precipitación, y separando la naturaleza de la superficie del ensayo, según sean piroclastos desnudos, cubiertos por vegetación arbustiva o superficies parcialmente rocosas consolidadas (figuras 7 y 8).

Se observa una muy ligera influencia de la pendiente de la superficie de ensayo en la cantidad de precipitación necesaria para la generación de la escorrentía, que solo oscila entre 20 y 60 l/m² para pendientes bajas (menores de 10°), y algo menos de 100 l/m² para pendientes altas (30-35°). Sí que se observa una influencia significativa de los caudales de precipitación, que prácticamente duplican la cantidad de precipitación total con caudales altos (unos 100 l/m² para 600 l/min) respecto a los menores caudales ensayados (unos 40 l/m² para 150 l/min).

La variable que resulta claramente discriminante de los valores de precipitación necesarios para inicio de la escorrentía es la naturaleza de la superficie del ensayo, con mayores valores de precipitación necesaria en el caso de superficie de piroclastos desnudos respecto a zonas cubiertas por vegetación arbustiva, aunque sea dispersa.

Figura 7. Precipitación total (L/m^2) necesaria para inicio de la escorrentía (P_0) en sectores de ladera no acotados con piroclastos desnudos, vegetación arbustiva o ensayos en los que no se llegó a generar escorrentía, para los ensayos de diciembre de 2021, respecto a la pendiente (S , en grados) y al caudal (Q , en L/min)

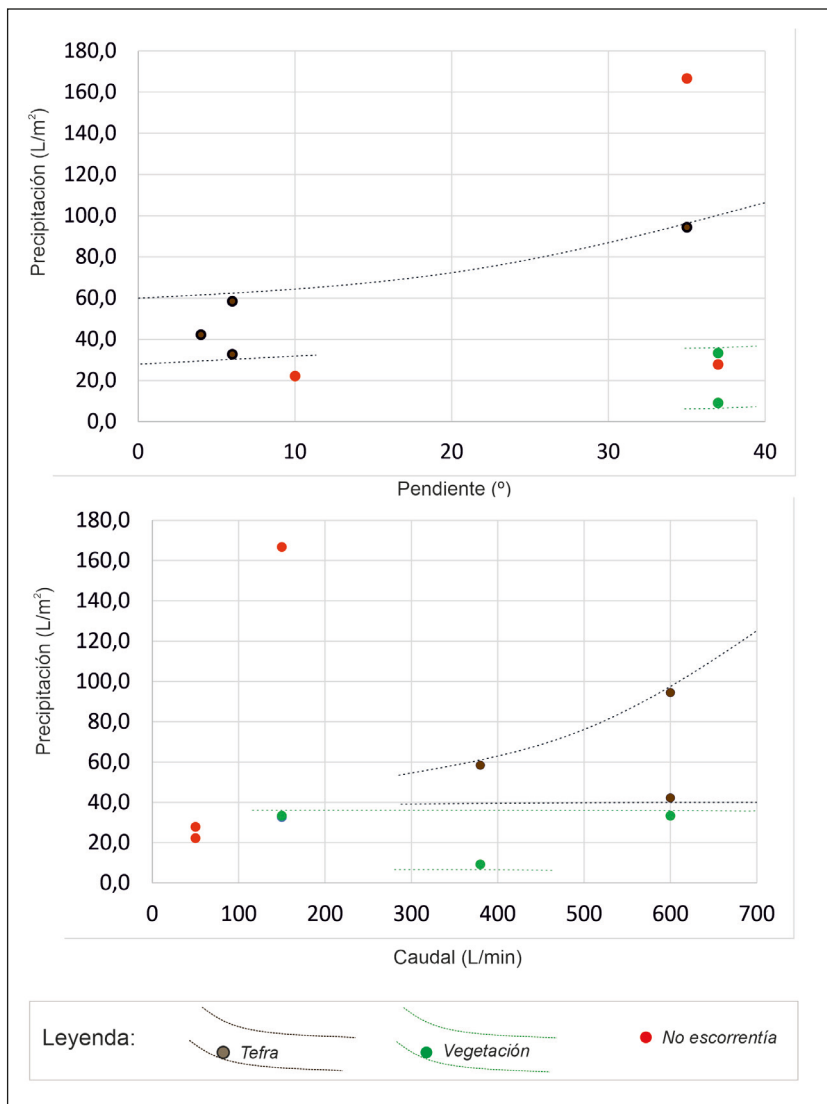
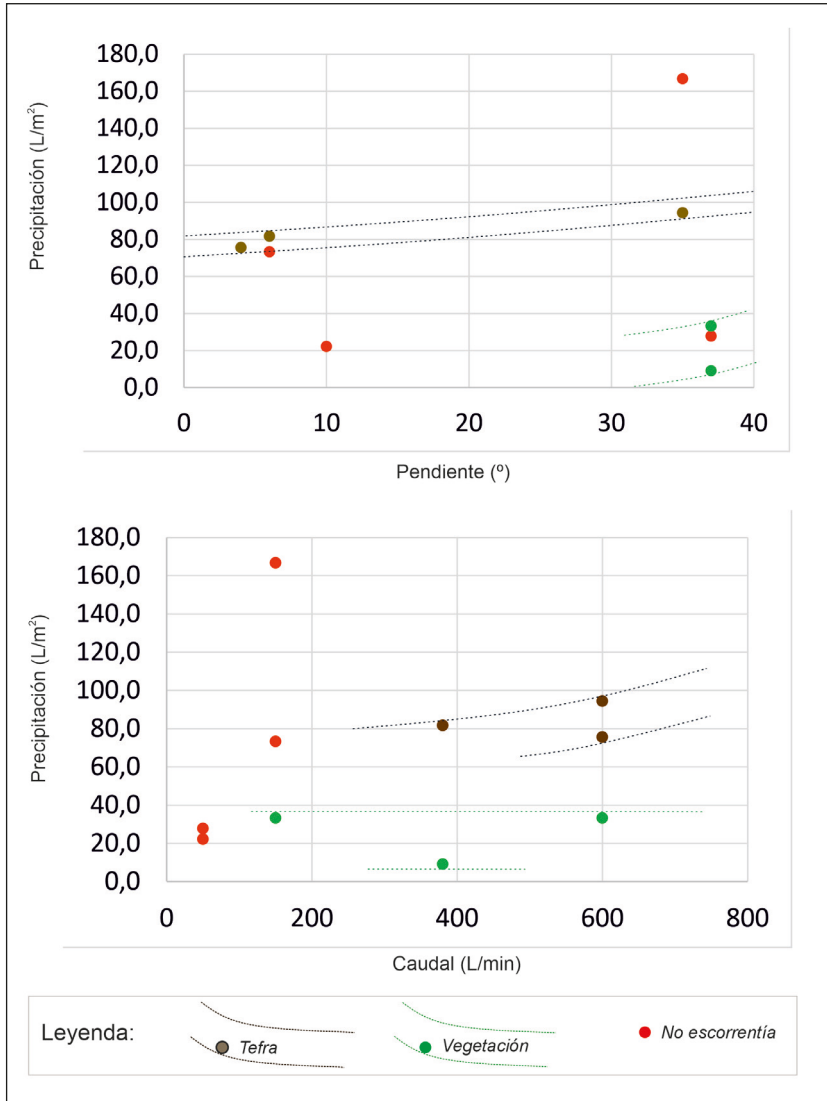


Figura 8. Precipitación total (l/m²) necesaria para inicio de la removilización de tefra (P_i) en sectores de ladera no acotados con piroclastos desnudos, vegetación arbustiva o ensayos en los que no se llegó a producir removilización, para los ensayos de diciembre de 2021, respecto a la pendiente (S, en porcentaje) y al caudal (Q, en l/min).



En el caso de la removilización de los depósitos de tefra, la pendiente de la superficie de ensayo para un mismo tipo de cobertera apenas parece tener influencia en la precipitación total necesaria para su inicio, oscilando tan solo entre 70 y 100 l/m² para piroclastos desnudos y pendientes de 5 y 35°,

respectivamente. Tampoco es demasiado significativa la influencia de los caudales de ensayo y, por lo tanto, de la intensidad de la precipitación, aunque se ven precipitaciones totales mayores necesarias para mayores caudales; sí se observa que con caudales menores (bajas intensidades de precipitación) en varios ensayos no se produjo escorrentía, lo que indicaría que el depósito de tefra es capaz de absorber bajas intensidades de precipitación durante periodos significativos de tiempo sin generar una escorrentía capaz de remobilizar las partículas más superficiales.

Nuevamente, el factor condicionante de esta cantidad de precipitación para la remobilización vuelve a ser la naturaleza de la superficie, cobertera o sustrato del ensayo: las superficies de piroclastos desnudos precisan una cantidad de precipitación que duplica o triplica la necesaria para producir la remobilización en zonas cubiertas por vegetación arbustiva.

Resultados de los ensayos en parcelas de laderas, lecho y rellanos del barranco de Tamanca en abril de 2024

En la campaña de ensayos desarrollada en abril de 2024, ya en fase de emergencia nivel 1, y con más tiempo y medios humanos y materiales para la coordinación logística de estos, se pudieron realizar 7 nuevos ensayos, alguno de ellos replicando los realizados en diciembre de 2021 y otros con nuevos diseños experimentales (lecho y rellanos de las márgenes del barranco de Tamanca). Sus características y los resultados en precipitaciones y caudales se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de precipitación (l/m^2), caudal (l/s) o volumen vertido (L) para el inicio de la escorrentía (E1), las sucesivas remobilizaciones de piroclastos (R1...R5) y la formación de lóbulos de depósito (L1, L2) de los ensayos de lluvia artificial en los sectores de la ladera, lecho y rellanos de las márgenes del barranco de Tamanca (BT-) en abril de 2024

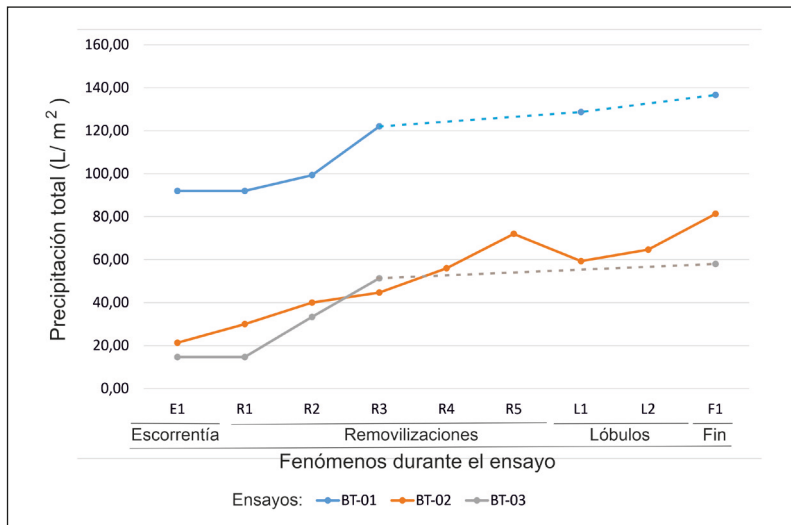
Ensayo n.º	S (°)	Caudal (l/min)	Precipitación de fenomenología (l/m^2)							
			Escorrentía	Remobilización					Lóbulos	
				E1	R1	R2	R3	R4	R5	L1
BT-01	32	360	92,00	92,00	99,33	122,00			128,67	
BT-02	31	360	21,33	30,00	40,00	44,67	56,00	72,00	59,33	64,67
BT-03	34	360	14,67	14,67	33,33	51,33				
BT-02b	32	360	126,00	126,00	180,00					
BT-04a	11	23,29		10,48					2,33	6,21
BT-04b	11	89,58							10,45	17,92
BT-05	15	360							30,00	102,00

Los resultados recogidos en la tabla 4 muestran nuevamente una enorme dispersión de valores de precipitaciones, caudales y volúmenes de agua necesarios para el inicio de la escorrentía, remobiliza-

ciones y formación de lóbulos, que oscilan entre 21,33 y 126,00 l/m² (escorrentía), 10,48 y 126,00 l/m² (primeras removilizaciones), y 2,33 l/s y 128,67 l/m² (formación de lóbulos). Todo ello dependiendo del tipo de ensayo (lluvia artificial o vertido de arroyada), la naturaleza de la superficie de ensayo (piroclastos desnudos, vegetación arbustiva o roca consolidada) y su pendiente.

Nuevamente, dentro de un mismo tipo de ensayos (lluvia artificial en las vertientes del barranco), el factor determinante es, más que la pendiente, la naturaleza de la superficie de ensayo. Existe una diferencia sustancial entre la precipitación artificial necesaria para producir escorrentía, removilizaciones y lóbulos cuando los ensayos se realizan sobre piroclastos desnudos (92,00 l/m²) respecto a los realizados en zonas parcialmente cubiertas por vegetación arbustiva (21,33 l/m²) o sobre superficies de roca consolidada o cementada (14,67 l/m²). Es más, se observa un incremento creciente en estos tres ensayos desde la generación de escorrentía, las sucesivas removilizaciones y formación de lóbulos (figura 9).

Figura 9. Precipitación total (l/m²) necesaria para inicio de la escorrentía (E) removilización de tefra (R) y formación de lóbulos de depósito (L) en sectores de ladera no acotados con piroclastos desnudos (BT-01), vegetación arbustiva (BT-02) o afloramientos de rocas consolidadas en cabecera (BT-03)



Resultados de los análisis granulométricos de los piroclastos y sus removilizaciones en el barranco de Tamanca en abril de 2024

Se muestrearon y analizaron en torre de tamices los depósitos piroclásticos de las laderas y lecho del barranco de Tamanca, tanto para la tefra sin movilizar previa a los ensayos como para el material de los lóbulos de depósito del material removilizado. Los resultados de los análisis granulométricos de las ocho muestras se exponen en la tabla 5.

Tabla 5. Resultados de los análisis granulométricos con torre de tamices para las ocho muestras de los piroclastos de las laderas y lecho de las removilizaciones del barranco de Tamanca

Tamices a.s.t.m.		Muestra							
		BT-01-R	BT-01-L	BT-02-R	BT-02-L	BT-04-R	BT-04-L	BT-05-R	BT-05-L
n.º	Abertura (mm)	Porcentaje de la muestra que pasa por el tamiz (%)							
4	5	100	100	100	100	100	100	100	100
10	2	94,45	98,62	96,90	99,23	89,43	88,91	94,57	96,29
16	1,2	91,85	94,57	95,57	98,71	85,75	86,39	71,67	89,42
30	0,6	62,85	65,98	70,80	78,96	58,47	54,44	24,21	57,56
50	0,3	30,37	33,63	41,14	32,69	34,17	27,91	8,24	25,05
100	0,15	14,48	14,90	17,42	8,88	19,83	16,10	6,61	10,40
200	0,075	8,52	6,38	7,26	2,49	14,48	12,42	6,01	5,93

En color verde, las fracciones de muestra que experimentan un incremento del porcentaje de muestra retenida entre la situación previa al ensayo de removilización (R) y el depósito en los lóbulos (L); en color rojo, las que experimentan un decrecimiento o descenso del porcentaje entre antes y después del ensayo.

De cara a conocer si en las removilizaciones se produce una erosión, transporte y removilización selectivas de los piroclastos según las granulometrías, o un efecto tamizado, gradación o sesgo de tamaños, se puede deducir de los resultados (tabla 6):

- En los ensayos de precipitación en vertiente o talud de tefra (BT-01), se produjo una ligera granoselección, con removilización de la fracción fina de la referencia a los lóbulos.
- En los ensayos en vertiente o talud de tefra sobre tabla (BT-02), se produjo una ligera granoselección, con removilización de la fracción gruesa de la referencia a los lóbulos.
- En el ensayo en escorrentía concentrada en llano sobre tabla (BT-04), se produjo una severa granoselección, con removilización de la fracción gruesa de la referencia a los lóbulos.
- En el ensayo en escorrentía concentrada en reguero (BT-05) se produjo una severa granoselección con removilización de la fracción media de la referencia a los lóbulos.

DISCUSIÓN

Como se puede observar en los resultados preliminares y su amplia variabilidad y dispersión espaciotemporal, los valores obtenidos tienen limitaciones, fuentes de error e incertidumbres que tener en cuenta en su interpretación, y que derivan de:

- Un número limitado de ensayos, algunos sin las réplicas necesarias, lo que hace que los resultados cuantitativos no sean estadísticamente significativos, tan solo válidos cualitativamente para ser comparados entre sí.
- Los problemas logísticos surgidos durante el desarrollo de los ensayos, como: disponibilidad limitada de los medios humanos y recursos materiales, especialmente durante la emergencia por erupción volcánica; la falta de control de caudales exactos vertidos por los camiones autobomba; los vientos racheados durante los ensayos, que desviaban la columna de precipitación haciendo que la caída no fuera uniforme en toda la superficie ensayada; la altura y velocidad de caída de las gotas de lluvia, que no pudo garantizarse que fuera uniforme; así como la superficie de aplicación, que fue variable en los ensayos y difícilmente cuantificable con precisión.
- La componente de subjetividad de los observadores en la detección y anotación de la fenomenología (escorrentía, removilización, formación de lóbulos), a pesar de que se trató de mantener a las mismas personas y criterios homogéneos.

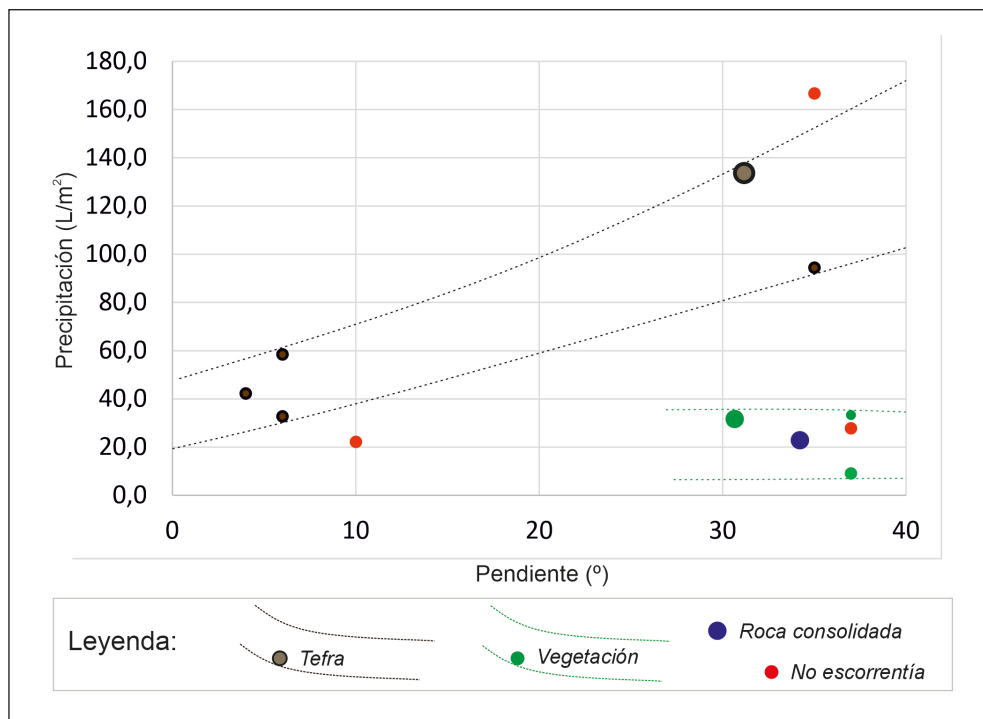
A pesar de ello, cuando se correlacionan los resultados de las diferentes campañas de ensayos, especialmente aquellos que han sido replicados, como los de las vertientes de las márgenes del barranco de Tamanca, se observa una lógica y coherencia, pudiendo establecerse ciertos umbrales o límites superiores para los valores de inicio de la escorrentía y removilización en función de las diferentes variables (figuras 10 y 11).

Como ya se observaba en los resultados parciales de los distintos ensayos, también en las gráficas totales de los ensayos de generación de la escorrentía e inicio de la removilización (figuras 10 y 11) se comprueba que la pendiente de la superficie tiene cierta incidencia en la precipitación total necesaria, pero la variable discriminante que mayor influencia tiene en los resultados es el tipo de superficie donde se realizaron los ensayos.

Efectivamente, pueden definirse varios sectores en la figura 11, con líneas que separan los valores de precipitación necesaria para removilizar los piroclastos cuando la superficie tiene tefra desnuda (valores entre 70 y 140 l/m²), de los de cubierta con vegetación arbustiva (entre 10 y 45 l/m²) o los de roca consolidada (sobre 20 l/m²).

La granulometría de los piroclastos y la pendiente, aunque a pequeña escala (microparcelas experimentales), pueden tener cierta incidencia; en las vertientes de los barrancos y en mesoescala y macroescala únicamente matizan esos intervalos de valores. Además, la pendiente parece condicionar la génesis de la escorrentía y el inicio de la removilización de piroclastos en sentido inverso a lo que podría pensarse, al menos en las superficies de tefra desnuda: a mayores valores de pendiente de las vertientes, mayor es la precipitación necesaria para iniciar ambos fenómenos. La influencia de la infiltración diferencial (Jones et al., 2017) y del flujo subsuperficial (con saturación del flujo en superficie en la base de la ladera) en estos medios porosos, pero tan anisótropos, podría explicar esta aparente contradicción.

Figura 10. Precipitación total (l/m^2 , en ordenadas) frente a la pendiente (% en abscisas) necesarias para el inicio de la escorrentía en sectores de ladera no acotados con piroclastos desnudos, vegetación arbustiva o ensayos en los que no se llegó a generar escorrentía, para todos los ensayos realizados (diciembre de 2021, puntos pequeños; y abril de 2024, puntos grandes)

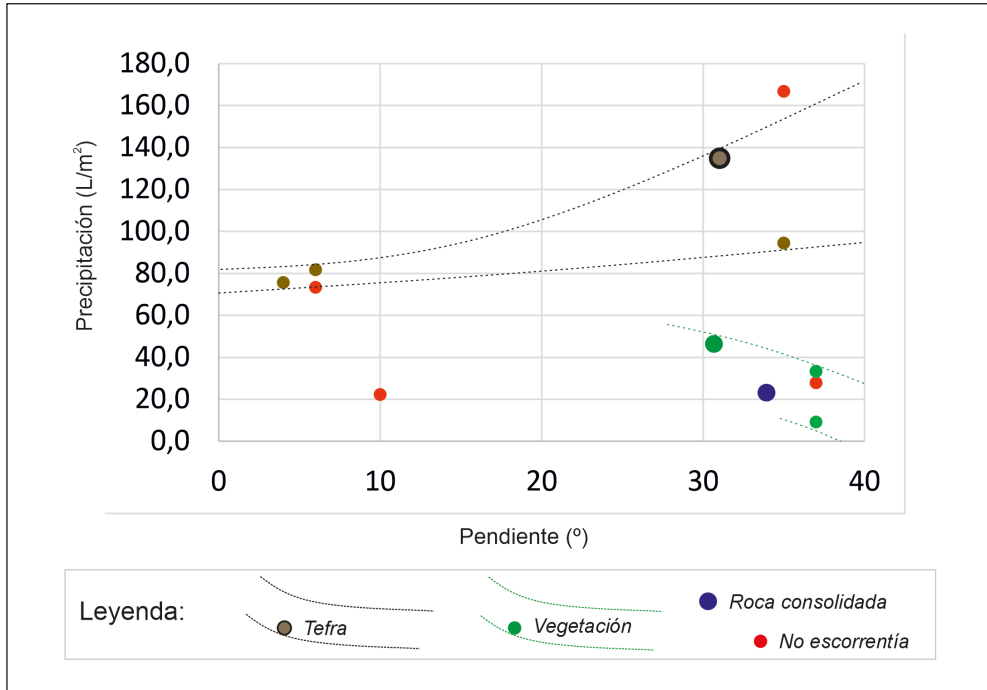


Estos resultados son básicos y fundamentales en su aplicación práctica para alimentar modelos numéricos de simulación de removilizaciones de piroclastos que podrían dar lugar a flujos no newtonianos (comúnmente agrupados como flujos de derrubios, flujos hiperconcentrados o lahares). Esperamos que permitan obtener escenarios y cartografías de susceptibilidad de desencadenamiento y desplazamiento de los flujos, y realizar mapas de peligrosidad y riesgo por lahares (Iverson et al., 1998).

Las aproximaciones metodológicas habituales de estos modelos y sus aplicaciones (Pierson et al., 2014) suelen fundamentarse en formulaciones de estabilidad de laderas y taludes (Baumann et al., 2018), en las que las variables discriminantes suelen ser la pendiente y las propiedades geomecánicas de los materiales (granulometría, cohesión; Fairchild, 1987).

Pero, precisamente por la importancia demostrada en nuestros ensayos de otras variables distintas a la pendiente de la superficie del terreno, en las aproximaciones metodológicas y modelos numéricos de simulación de flujos y cartografía de peligrosidad y riesgo deberían primarse, al menos en este caso, no solo la estabilidad de laderas (Miranda-Hardisson et al., 2023) y los movimientos del terreno (flujos granulares gravitacionales en seco), sino también la transformación de la precipitación en escorrentía

Figura 11. Precipitación total (l/m², en ordenadas) frente a la pendiente (% en abscisas) necesarias para inicio de la removilización de piroclastos en sectores de ladera no acotados con piroclastos desnudos, vegetación arbustiva o ensayos en los que no se llegó a generar escorrentía, para todos los ensayos realizados (diciembre de 2021, puntos pequeños; y abril de 2024, puntos grandes)



(superficial y subsuperficial; Jones et al., 2015), incluyendo la precipitación antecedente (Jones et al., 2017), con módulos hidrológicos en modelos hidrodinámicos que permitan incorporar la reología de flujos no newtonianos, como se está ensayando para el caso de aludes de nieve o roturas de balsas de lodos, entre otros fenómenos análogos.

En definitiva, como principal aportación de estos ensayos a la prevención futura de eventos extremos de removilización de piroclastos (lahares) y reducción de los daños asociados, se podría proponer que, en las metodologías de análisis y simulación, se tomen en consideración otras variables además de la pendiente y la geotecnia, como es la génesis de la escorrentía y su concentración en determinadas superficies y coberteras, que pueden ser fácilmente integradas mediante reclasificaciones y álgebra de mapas mediante sistemas de información geográfica.

CONCLUSIONES

Aunque se trata de un número de ensayos muy pequeño, con las limitaciones metodológicas y logísticas anteriormente expuestas, a modo de resumen se han obtenido las siguientes conclusiones provisionales:

- En las microparcels experimentales de los interfluvios existe una tenue relación directa del inicio de la escorrentía con las pendientes e intensidades de precipitación, e inversa con la granulometría de los piroclastos.
- En las vertientes de los barrancos, los umbrales de escorrentía (P_0) y de removilización (P_r) sobre tefra desprovista de vegetación, oscila entre valores de 70 y 90 l/m², según la pendiente; mientras que P_0 y P_r toman un valor cuatro veces inferior a dichos umbrales cuando la precipitación se produce sobre vegetación arbustiva (20 l/m²) o roca consolidada (15 l/m²).
- La pendiente de la ladera parece tener poca incidencia y, además, tiene una relación directa con los umbrales (a mayor pendiente, mayores umbrales), en contra de lo que parece lógico para movimientos gravitacionales y escorrentía hortoniana clásica.
- La concentración de la precipitación, por superficies impermeables o vegetadas, formando escorrentía, parece ser la principal acción que produce la removilización de la tefra, muy por encima de su granulometría o la pendiente.
- La vegetación arbórea y arbustiva tiene un papel clave en la concentración de la precipitación por escurrimiento cortical, lo que altera localmente el balance entre infiltración y escorrentía, facilitando el inicio de los flujos de removilización hídrica no newtonianos.

Por lo tanto, y a modo de conclusión global, el principal control del desencadenamiento de las removilizaciones hídricas en depósitos de tefra tras erupciones estrombolianas no es la pendiente ni la granulometría, sino la disponibilidad hídrica de escorrentía concentrada por efecto de superficies impermeables o de concentración al pie de afloramientos rocosos, ejemplares arbóreos y arbustivos o fondo de vaguadas con flujo subsuperficial. Esta cuestión debería ser tenida en consideración en los análisis de peligrosidad volcánica para su inclusión en los modelos de simulación de lahares, que deberían incorporarse a la cartografía de peligrosidad y riesgo volcánico. Especialmente necesarios son estos estudios en contextos de erupciones de tipo hawaiano o estromboliano, con bajos índices de explosividad, donde la emisión de lavas y piroclastos son menos peligrosos, aunque sí que lo pueden ser fenómenos secundarios o indirectos como lahares y flujos no newtonianos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer su inestimable colaboración y ayuda en la realización de los ensayos e investigaciones a los responsables (director y directora adjunta), agentes medioambientales, conductores y el resto del personal del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente; responsables y técnicos de emergencias

(CECOPIN), Protección Civil, bomberos y Servicio de Medioambiente del Cabildo Insular de La Palma; responsables y técnicos de la red de carreteras del Gobierno de Canarias; Unidad Militar de Emergencias (UME; Ministerio de Defensa) y su dotación de recursos humanos y medios técnicos.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Las investigaciones científicas en las que se enmarcan los ensayos presentados están financiadas por: Proyecto Intramural Especial (PIE) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) titulado “Investigación geológica de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja” (referencia 20223PAL002), que incluye el Objetivo 3 ‘Estudio de flujos hiperconcentrados’; proyecto “Investigación Geológica dirigida a la recuperación de la Isla de la Palma tras la erupción del volcán 2021” (GEOPALMA; referencias BDC CSIC 20223TE006 y Gobierno de Canarias 227G0165), financiado por el Gobierno de Canarias, dentro del Plan de Recuperación de la Isla de La Palma; y la subvención 2023-2026 firmada entre la Dirección General del Agua (DGA, MITERD) y el CSIC, en la que se incluye la actuación “Morfodinámica sedimentaria” (referencia BDC CSIC 20233TE012), proyecto Tarquín 2 (referencia 3157 del IGME-CSIC). Igualmente, una de las autoras (K.P. Sandoval) disfruta de una ayuda para la contratación de personal investigador predoctoral en formación PIPF-2022/ECO-24879, financiada por la Comunidad de Madrid.

REFERENCIAS

- Baumann, V., Bonadonna, C., Cuomo, S., Moscariello, M., & Manzella, I. (2018). Slope stability models for rainfall-induced lahars during long-lasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 359, 78-94.
- Bautista, L. (2022): Despliegue “sin precedentes” para retirar más de 10.000 toneladas de ceniza en La Palma. *ABC Canarias*, 10-01-2022. https://www.abc.es/espana/canarias/abci-desplieguesin-precedentes-para-retirar-mas-10000-toneladasceniza-palma-202201101820_noticia.html (acceso junio 2022).
- Benito, E., De Blas, E., Santiago, J. L., & Varela, M. E. (2001). Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*, 26, 211-220.
- Bonadonna, C., Pistolesi M., Domínguez, L., Freret-Lorgeril, V., Rossi, E., Fries, A., Biass, S., Voloschina, M., Lemus, J., Romero J. E., Zanon, V., Pastore, C., Reyes Hardy, M.-P., Di Maio, L. S., Gabellini, P., Martín-Lorenzo, A., Rodríguez, F., & Pérez, N. M. (2023). Tephra sedimentation and grain size associated with pulsatory activity: the 2021 Tajogaite eruption of Cumbre Vieja (La Palma, Canary Islands, Spain). *Front. Earth Sci.*, 11, 1166073. doi: 10.3389/feart.2023.1166073
- Cerdà, A. & Jordán, A. (2010). Métodos para la cuantificación de la pérdida de suelo y aguas tras incendios forestales, con especial referencia a las parcelas experimentales. En: *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales* (capítulo 2.5, pp. 187-241). Cátedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València, FUEGORED.

- Chhoden, T., Kumara Karunarathana, A., Kawamoto, K., Komatsu, T., & Moldrup, P. (2009). Water Repellency Effects on Water Retention in Heat Pre-treated Volcanic Ash Soil. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2009*, abstract id. H11E-0864.
- Day, J. M. D., Geiger, H., Troll, V. R., Pérez-Torrado, F. J., Aulinas, M., Gisbert, G., & Carracedo J. C. (2022). Bouncing Spallation Bombs During the 2021 La Palma Eruption, Canary Islands, Spain. *Earth Science, Systems and Society*. 2:10063. DOI: 10.3389/ess.2022.10063
- Díez Herrero, A., Hernández Ruiz, M., López Gutiérrez, J., Vegas, J., Martínez-Martínez, J., Mediato, J. F., Perucha, M. A., Garrote, J., Lorenzo, J. H., Sánchez, N., & Galindo, I. (2023). Génesis de la escorrentía superficial y removilización por flujos no newtonianos de los depósitos piroclásticos de la erupción volcánica de 2021 en La Palma. En Desir, G., Nadal, E., & Regués, D. (eds.). *Libro actas de la XVI Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 76-77). Sociedad Española de Geomorfología.
- Díez-Herrero, A., Hernández Ruiz, M., López Gutiérrez, J., Martínez-Martínez, J., Mediato, J. F., Perucha, M. A., Garrote, J., Sánchez, N., Galindo, I., & Lorenzo, J. H. (2024). Caracterización morfodinámica de las removilizaciones de tefra por flujos hídricos no newtonianos post-eruptivos en el Volcán de Tajogaite. *Geo-Temas*, 20, 989.
- Fairchild, L. H. (1987). The importance of lahar initiation processes. *Reviews in Engineering Geology*, 7, 51-62.
- Galárraga, R. (2005). *SABO in Ecuador*. November 20-26, 2005. Water Sciences Unit, Department of Civil and Environmental Engineering, Lima-Perú. Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador.
- Iverson, R. M., Schilling, S. P., & Vallance, J. W. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 110(8), 972-984.
- Jones, R., Manville, V., & Andrade, D. (2015). Probabilistic analysis of rain-triggered lahar initiation at Tungurahua volcano. *Bulletin of Volcanology*, 77, 1-19.
- Jones, R., Thomas, R. E., Peakall, J., & Manville, V. (2017). Rainfall-runoff properties of tephra: Simulated effects of grain-size and antecedent rainfall. *Geomorphology*, 282, 39-51.
- Larrasoña, J. C., Mata, M. P., Pérez-Landazábal, J. I., Gómez-Polo, C., Garayo, E., Espeso, J. I., López-Ortega, A., Rodríguez-Pascua, M. A., Perucha, M. A., Martínez-Martínez, J., Pérez-López, R., López-Gutiérrez, J., Mediato, J. F., Vegas, J., Galindo, I., & Sánchez, N. (2024). Propiedades magnéticas de los depósitos piroclásticos del volcán Tajogaite (La Palma, Islas Canarias) y su aportación al conocimiento sobre la evolución de la erupción de 2021. *Geotemas*, 20, 997.
- Mata, M. P., Ordóñez-Casado, B., del Moral, B., Mediato Arribas, J. F., Bellido Martín, E., Castillo, M., Vegas, J., Martínez Martínez, J., Sánchez-España, J., Pérez, R., Sánchez, N., & Galindo, I. (2022). Composición del material piroclástico de la erupción de 2021 en Cumbre Vieja (Isla de La Palma). *Macla*, 26, 116-117.
- Mediato, J. F., Martínez-Martínez, J., Montoya, I., Lozano, G., Perucha, M. S., Vegas, J., Rodríguez Pascua, M. A., Pérez López, R., Díez Herrero, A., Sanz Mangas, D., López Gutiérrez, J., Mateos, R. M., Sánchez, N., & Galindo, I. (2023). Wind influence on volcanoclastic deposits of 2021 eruption in La Palma (Canary Islands). Theme 9. Volcaniclastic deposits, Special Session 9.1. Volcanism and

- sedimentology. Poster presentation. *36th International Meeting of Sedimentology*, June 12-16, 2023, Dubrovnik, Croatia, *Abstracts Book*, p. 306. Croatian Geological Society (HGD).
- Miranda-Hardisson, A., González de Vallejo, L., Rodríguez-Losada, J. A., Hernández-Gutiérrez, L., De Villepreux, E., Álvarez-Hernández, A., Cervigón Tomico, G., De los Ríos Díaz, H., Afonso-Falcón, D., & Pérez, N. M. (2023). Stability analysis of the Tajogaite volcano slopes and lahar hazards for reconstruction and land planning in the affected areas, La Palma, Canary Islands. *EGU General Assembly 2023*. Viena, Austria, 24-28 Apr 2023, EGU23-6926. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-6926>
- Mongil Manso, J. (2010). Adaptación de las tablas del Número de Curva para las formaciones vegetales del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente (isla de La Palma, España). *Boletín Geológico y Minero*, 121(2), 179-188.
- Montoya, I., Vegas, J., Mediato, J. F., Rodríguez-Pascua, M. A., Pérez-López, R., Martínez-Martínez, J., López-Gutiérrez, J., Perucha, M. A., Galindo, I., Díaz-Muñoz, J. A., Lozano, G., Díez-Herrero, A., Mateos, R., López, J. M., Galindo, E., & Sánchez, N. (2024). Evolución espacial y temporal de la dispersión de tefra en la erupción de 2021 en la isla de La Palma. *Geo-Temas*, 20, 1014.
- Ontiveros-Ortega, A., Moleón-Baca, J. A., Mesa, R. H., Abad, I., & Sánchez-Gómez, M. (2023). Heterogeneities in the Cohesion of the Deposits of the 2021 Tajogaite Eruption of La Palma (Canary Islands, Spain). *Geosciences*, 13, 346. <https://doi.org/10.3390/geosciences13110346>
- Pérez-López, R., Silva, P. G., Sanz-Mangas, D., Ezquerro, P., Bru, G., Rodríguez-Pascua, M. A., Élez, J., Giner-Robles, J. L., & Galindo, I. (2024). Evolución morfométrica del cono monogenético de Tajogaite durante la erupción de La Palma (2021). *Geotemas*, 20, 1025.
- PEVOLCA (2021). *Resumen de datos del proceso eruptivo*. Comité Científico del Plan de Emergencia Volcánica de Canarias, 2 pp. <https://www.gobiernodecanarias.org/emergencias/planes-de-emergencias/pevolca.html> (acceso junio 2022).
- Pierson, T. C., Wood, N. J., & Driedger, C. L. (2014). Reducing risk from lahar hazards: concepts, case studies, and roles for scientists. *Journal of Applied Volcanology*, 3, 1-25.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333. Doi: 10.1063/1.1745010.
- Rodríguez-Pascua, M. A., Pérez-López, R., Perucha, M. A., Sánchez, N., López-Gutiérrez, J., Mediato, J. F., Sanz-Mangas, D., Lozano, G., Galindo, I., García-Davalillo, J. C., Lorenzo, C., & Béjar, M. (2024). Las fallas activas responsables de la erupción del Tajogaite 2021 (La Palma, Islas Canarias, España). *Geotemas*, 20, 1028.
- Romero, J. E., Burton, M., Cáceres, F., Taddeucci, J., Civico, R., Ricci, T., Pankhurst, M. J., Hernández, P. A., Bonadonna, C., Llewellyn, E. W., Pistolesi, M., Polacci, M., Solana, C., D'Auria, L., Arzilli, F., Andronico, D., Rodríguez, F., Asensio-Ramos, M., Martín-Lorenzo, A., Hayer, C., Scarlato, P., & Pérez, N. M. (2022). The initial phase of the 2021 Cumbre Vieja ridge eruption (Canary Islands): Products and dynamics controlling edifice growth and collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 431, 107642. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107642>

- Sáez-Gabarrón, L., Galindo, I., Sanz-Mangas, D., Vegas, J., García-Davalillo, J. C., Hernández, M., Pérez-López, R., Camuñas, C., Lorenzo Carnicero, C., Rodríguez-Pascua, M. A., Perucha, M. A., López Gutiérrez, J., Lozano, G., & Sánchez, N. (2024). Evolución de los deltas de lava durante la actividad volcánica de 2021 en La Palma (Islas Canarias). *Geotemas*, 20, 1031.
- Sala, M. & Gallart, F. (eds.) (1988). *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*. Monografía n.º 1. Barcelona: Sociedad Española de Geomorfología.
- Sanz-Mangas, D., Lozano, G., Galindo, I., Vegas, J., Pérez-López, R., López-Gutiérrez, J., García-Davalillo, J. C., Hernández, M., Camuñas, C., Lorenzo, C., Rodríguez-Pascua, M. A., Perucha, M. A., Sáez-Gabarrón, L., & Sánchez, N. (2024). Cartografía geológica del campo de lavas del Volcán de Tajogaite (2021), La Palma. *Geotemas*, 20, 1039.
- Timlin, D. J., Ahuja, L. R., Pachepsky, Y., Williams, R. D., Giménez, D., & Rawls, W. (1999). Use of Brooks Corey parameters to improve estimates of saturated conductivity from effective porosity. *Soil Sci.*, 63(5), 1086-1092. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351086x>
- Vegas, J., Baeza, E., Cabrera, A., Díez-Herrero, A., Galindo, I., Sánchez, N., Mediato, J. F., Martínez-Martínez, J., López-Gutiérrez, J., Rodríguez-Pascua, M. A., Perucha, M. A., Moreno, X., Pérez-López, R., Lozano, G., & Baeza, E. (2022). Geoconservación *ex situ* de patrimonio geológico efímero durante una emergencia volcánica: la erupción de La Palma 2021. *Geo-Temas*, 19, 91-94.
- Voight, B. (1990). The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 42(1-2), 151-188.
- Williams, G. T., Jenkins, S. F., Lee, D. W. J., & Wee, S. J. (2021). How rainfall influences tephra fall loading - an experimental approach. *Bulletin of Volcanology*, 83, 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01465-0>
- Zehetner, F. & Miller, W. (2006). Erodibility and runoff-infiltration characteristics of volcanic ash soils along an altitudinal climosequence in the Ecuadorian Andes. *Catena*, 65(3), 201-213. DOI: 10.1016/j.catena.2005.10.003

Cómo citar este artículo:

Díez-Herrero, A., Hernández Ruiz, M., López Gutiérrez, J., Martínez-Martínez, J., Mediato, J. F., Vegas, J.; Perucha, M. Á., Vázquez-Tarrió, D., Sandoval-Rincón, K. P., Garrote, J., Heriberto Lorenzo, J., Bladé i Castellet, E., Sanz-Ramos, M., Sánchez, N., & Galindo, I. (2024). Ensayos en campo de removilización hídrica de piroclastos del volcán de Tajogaite de 2021 (La Palma, Islas Canarias). *Cuadernos de Geografía*, 112, 231-260. <https://doi.org/10.7203/CGUV.112.29566>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.