

Navarro Almendros, G.; Martín Banda, R.; Fernández Merodo, J.; Serrano Reina, J.; Sarro Trigueros, R.; Fernández Naranjo, F.; García Davalillo, J.; Galindo Jiménez, I. Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)

Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)

Navarro Almendros, Gabriel ¹ Martín Banda, Raquel ² Fernández Merodo, Jose Antonio ² Serrano Reina, Jose Antonio ² Sarro Trigueros, Roberto ² Fernández Naranjo, Francisco Javier ² García Davalillo, Juan Carlos ² Galindo Jiménez, Inés ²

¹ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

² Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, España

ORCID: Navarro Almendros 0000-0002-8919-0060 Martín Banda 0000-0002-2078-9921 Fernández Merodo 0000-0003-0642-5803 Serrano Reina 0009-0000-8369-0796 Sarro Trigueros 0000-0002-2083-1931 Fernández Naranjo 0000-0001-9005-3250 García Davalillo 0000-0002-0516-1626 Galindo Jiménez 0000-0002-2545-5234

Correspondencia: gabriel.navarro@csic.es r.martin@igme.es jose.fernandez@igme.es ja.serrano@igme.es r.sarro@igme.es fj.fernandez@igme.es jc.garcia@igme.es ines.galindo@csic.es

RESUMEN

En febrero de 2026, durante la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía, el Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE-CSIC) fue activado por la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde aparecieron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras lluvias excepcionales de hasta 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel, está formada por margas y areniscas del Mioceno superior y colinda con zonas habitadas, lo que motivó el desalojo preventivo de 25 familias. Para evaluar y hacer un seguimiento, se combinó el reconocimiento geológico de campo con vuelos repetidos de dron equipado con sensores LiDAR y cámara RGB. El trabajo de campo distinguió un sector norte más estable de un sector sur margoso con deslizamientos rotacionales activos de tipo cuchara ligados a la saturación de las margas en zonas de cambio de pendiente. Cuatro campañas de vuelo (8, 12, 15 y 21 de febrero) proporcionaron ortofotos de 2,7 cm/píxel y Modelos Digitales de Elevación que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron medir deformaciones de 20-50 cm en la fase inicial y confirmar una progresiva estabilización. Esta integración de cartografía geológica y teledetección de proximidad aportó datos objetivos sobre la magnitud y evolución de los procesos, respaldando las decisiones de protección civil.


Palabras clave: Deslizamientos, dron, fotogrametría, emergencias, monitorización.

Fecha de recepción: 16 marzo 2026 · Fecha de aceptación: 17 marzo 2026

Integración de cartografía geológica de campo y seguimiento con drones para el asesoramiento en emergencias: deslizamientos activos en Alcalá del Valle (Cádiz)



Navarro Almendros, Gabriel ⁽¹⁾, Martín Banda, Raquel ⁽²⁾, Fernández Merodo, Jose Antonio ⁽²⁾, Serrano Reina, Jose Antonio ⁽²⁾, Sarro Trigueros, Roberto ⁽²⁾, Fernández Naranjo, Francisco Javier ⁽²⁾, García Davalillo, Juan Carlos ⁽²⁾, Galindo Jiménez, Inés ⁽²⁾



⁽¹⁾ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España.


 0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es

⁽²⁾ Centro Nacional Instituto Geológico y Minero de España, IGME-CSIC, España.

 0000-0002-2078-9921, r.martin@igme.es ;  0000-0003-0642-5803, jose.fernandez@igme.es

 0009-0000-8369-0796, ja.serrano@igme.es ;  0000-0002-2083-1931, r.sarro@igme.es

 0000-0001-9005-3250, fj.fernandez@igme.es ;  0000-0002-0516-1626, jc.garcia@igme.es

 0000-0002-2545-5234, ines.galindo@csic.es

Resumen: En febrero de 2026, durante la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía, el Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias (GADE-CSIC) fue activado por la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde aparecieron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras lluvias excepcionales de hasta 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel, está formada por margas y areniscas del Mioceno superior y colinda con zonas habitadas, lo que motivó el desalojo preventivo de 25 familias. Para evaluar y hacer un seguimiento, se combinó el reconocimiento geológico de campo con vuelos repetidos de dron equipado con sensores LiDAR y cámara RGB. El trabajo de campo distinguió un sector norte más estable de un sector sur margoso con deslizamientos rotacionales activos de tipo cuchara ligados a la saturación de las margas en zonas de cambio de pendiente. Cuatro campañas de vuelo (8, 12, 15 y 21 de febrero) proporcionaron ortofotos de 2,7 cm/píxel y Modelos Digitales de Elevación que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron medir deformaciones de 20-50 cm en la fase inicial y confirmar una progresiva estabilización. Esta integración de cartografía geológica y teledetección de proximidad aportó datos objetivos sobre la magnitud y evolución de los procesos, respaldando las decisiones de protección civil.

Palabras clave: Deslizamientos, dron, fotogrametría, emergencias, monitorización.

Integration of geological field mapping and UAV-based monitoring for emergency advisory: active landslides in Alcalá del Valle (Cádiz, Spain)

Abstract: In February 2026, during the extreme weather emergency caused by a succession of storm systems affecting Andalusia, the Disaster and Emergency Advisory Group (GADE-CSIC) was activated by the Regional Government of Andalusia to assess the stability of the west-southwestern hillslope of Alcalá del Valle (Cádiz), where cracks, fractures and shallow landslides developed following exceptional rainfall of up to 160 mm/day. The hillslope, approximately 1 km long with 50 m of relief, is composed of Upper Miocene marls and sandstones and directly borders residential areas, which led to the preventive evacuation of 25 families. To evaluate and monitor the situation, geological field reconnaissance was combined with repeated UAV flights equipped with LiDAR sensors and an RGB camera. Fieldwork distinguished a more stable northern sector from a predominantly marly southern sector, where active rotational slump landslides were concentrated, linked to prolonged saturation of the marls at slope-break zones. Four flight campaigns (8, 12, 15 and 21 February) yielded orthophotos at 2.7 cm/pixel resolution and Digital Elevation Models that, through DEM of Difference (DoD) analysis, allowed deformations of 20–50 cm to be measured during the initial phase and confirmed a progressive stabilisation. This integration of geological mapping and close-range remote sensing provided emergency managers with objective data on the magnitude and evolution of the processes, supporting the civil protection decisions adopted.

Keywords: Landslides, geological mapping, UAV, photogrammetry, emergency management.

1. INTRODUCCIÓN

El Grupo de Asesoramiento en Desastres y Emergencias del CSIC (GADE) tiene como misión proporcionar asesoramiento científico-técnico a las autoridades de Protección Civil y gestores de emergencias durante desastres naturales en España. Activado mediante un protocolo formal (PADE), el GADE moviliza equipos multidisciplinares de investigadores que se despliegan sobre el terreno para generar información objetiva, cuantificable y oportuna que permita tomar decisiones informadas. Esta aproximación, basada en la integración de la observación de campo con técnicas instrumentales avanzadas, sitúa la gestión de emergencias en un marco científico riguroso que aporta criterios técnicos sólidos para la protección de personas y bienes.

En el marco de la emergencia por el tren de borrascas que afectó a Andalucía en 2026, el GADE fue activado a solicitud de la Junta de Andalucía para evaluar la estabilidad de la ladera oeste-sur de Alcalá del Valle (Cádiz), donde a partir del 4 de febrero se identificaron grietas, fracturas y deslizamientos superficiales tras un período prolongado de precipitaciones que incluyó un episodio excepcional de 160 mm/día. La ladera, de aproximadamente 1 km de longitud y 50 m de desnivel (Figura 1), constituida por margas y areniscas del Mioceno superior de la Cuenca de Ronda, limita directamente con zonas habitadas, incluyendo viviendas, un colegio infantil y un cuartel de la Guardia Civil, lo que motivó el desalojo preventivo de unas 25 familias. Ante procesos activos y cercanía a población vulnerable, resultaba imprescindible no solo diagnosticar el fenómeno, sino cuantificar su evolución temporal para fundamentar las decisiones sobre el mantenimiento o levantamiento de las medidas de protección civil adoptadas.

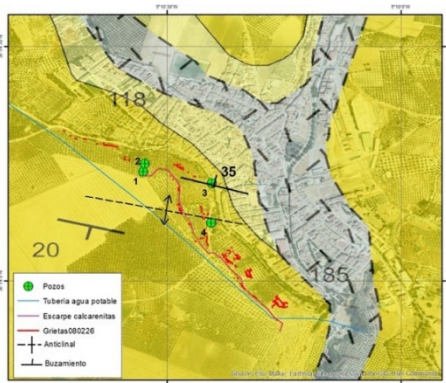


Figura 1. Ortofoto con cartografía geológica (GEODE), grietas identificadas en el vuelo dron LiDAR del 08/02/2026, pozos vaciados por la UME y estructura de la serie miocena. Legenda de recintos: en gris, depósitos holocenos de fondo de valle; en amarillo, unidades del Mioceno superior de la Cuenca de Ronda (amarillo claro: margas, conglomerados y areniscas calcáreas bioclásticas; amarillo oscuro: areniscas calcáreas bioclásticas, conglomerados, margas y ocasionalmente brechas yesíferas).

En este trabajo se presenta la metodología desplegada por el equipo multidisciplinar de GADE-CSIC, que combina el reconocimiento geológico in situ con la monitorización repetida mediante vuelos LiDAR y fotogramétricos con aeronaves no tripuladas (UAV, drones). El reconocimiento de campo permitió caracterizar la litología, estructura y geomorfología de la ladera, diferenciar sectores con distinto comportamiento geomecánico e interpretar los mecanismos desencadenantes de los deslizamientos. Por su parte, los vuelos sucesivos con dron realizados a lo largo de varias semanas proporcionaron ortofotos de alta resolución (2,7 cm/píxel) y Modelos Digitales de Elevación (DEM) que, mediante análisis de diferencias (DoD), permitieron cuantificar deformaciones de escala centimétrica a decimétrica y evaluar objetivamente la tendencia evolutiva de los procesos que se estaban desarrollando en la ladera (Chen et al., 2025). Esta integración de observación directa y teledetección de proximidad constituye un enfoque que aporta certeza cuantitativa a los gestores de la emergencia, permitiéndoles disponer de datos objetivos sobre la magnitud, localización y evolución temporal de los movimientos para sustentar sus decisiones en evidencias científicas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Reconocimiento geológico de campo

Un equipo de expertos en peligros geológicos del CN. IGME, integrado en el GADE-CSIC, realizó tres jornadas de inspección in situ los días 7, 10 y 11 de febrero de 2026. El reconocimiento se orientó a la caracterización litológica y estructural de la ladera, la identificación y cartografía de los procesos de inestabilidad activos y la evaluación de su posible afectación a las zonas habitadas colindantes.

Durante la primera visita (7 de febrero) se llevó a cabo un reconocimiento general de toda la ladera, diferenciando dos sectores (Figura 2) con comportamiento geomecánico distinto: un sector norte, con alternancia de areniscas y margas, mayor cobertura vegetal y presencia de cuatro pozos artesanos; y un sector sur, esencialmente margoso, ocupado por olivar joven y con múltiples focos de deslizamiento activo. Se cartografiaron grietas de cabecera con progresión lateral circular, abombamientos del terreno y desplazamientos de olivos, así como desprendimientos puntuales en las zonas de mayor pendiente. La medida de la estratificación a lo largo de la ladera puso de manifiesto la existencia de un suave anticlinal entre ambos sectores.

En las visitas posteriores (10 y 11 de febrero) se verificó la evolución de los procesos, constatándose un aumento decimétrico en salto vertical y métrico en extensión lateral de las grietas, especialmente en el sector sur. Se identificaron tres deslizamientos principales de tipo rotacional, con acumulación de sedimentos finos en forma de conos que en algunos puntos alcanzaban ya la calle situada al pie de la ladera. Se evaluó la relación entre las zonas de deslizamiento y los cambios de pendiente de la ladera (bandas del 17-22%), interpretándose que la pérdida de pendiente favorece la

infiltración y saturación de las margas, reduciendo su cohesión aparente y desencadenando los movimientos. Asimismo, se recomendó a la UME el vaciado de los pozos artesanos de la zona norte para reducir la carga hídrica sobre el sector más próximo a las viviendas.

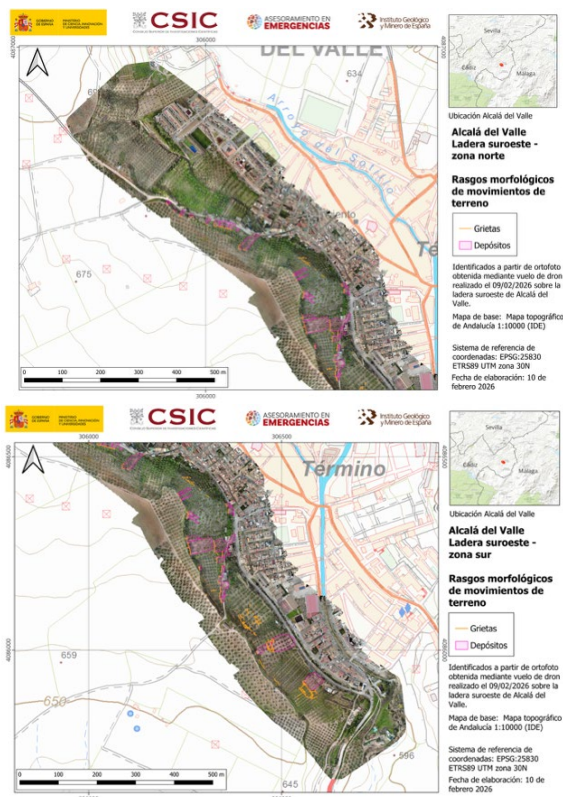


Figura 2. Ortofotografía obtenida con el dron, localización de grietas y zonas movilizadas a fecha de 10 de febrero.

2.2. Adquisición y procesamiento de datos con drones

La monitorización remota fue realizada por el equipo de drones del ICMAN del GADE-CSIC en cuatro campañas de campo (8, 12, 15 y 21 de febrero de 2026), aprovechando ventanas de buen tiempo entre los episodios de precipitación. Se empleó un dron DJI Matrice M300 equipado con dos sensores complementarios: el LiDAR DJI Zenmuse L2, para la generación de nubes de puntos 3D de alta densidad, y la cámara DJI Zenmuse H20T en modo RGB (Sestras et al., 2025), para la adquisición de imágenes fotogramétricas. Los vuelos se ejecutaron a 60 m sobre el punto de despegue con posicionamiento centimétrico mediante correcciones GNSS en modo RTK, lo que permitió prescindir de puntos de control en tierra y garantizar la coherencia geométrica entre campañas sucesivas.

Los datos LiDAR se procesaron con DJI Terra para generar nubes de puntos georreferenciadas y, tras la clasificación de retornos del terreno, los DEM de cada campaña. Las imágenes RGB se procesaron mediante Pix4Dmapper siguiendo un flujo fotogramétrico estándar, obteniéndose ortofotos georreferenciadas con un tamaño de píxel de 2,7 cm. A partir de los DEM sucesivos se calcularon DoD (Wheaton et al., 2010) mediante resta directa, aplicando un análisis focalizado

sobre las áreas previamente cartografiadas como activas, con un buffer de 10 m, para cuantificar las variaciones altimétricas asociadas a los movimientos del terreno y evaluar su tendencia temporal (Chen et al., 2025).

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización geológica y procesos de inestabilidad observados

El reconocimiento de campo permitió diferenciar dos sectores con comportamiento claramente distinto. El sector norte, con una secuencia de niveles de areniscas con matriz margosa y margas que culmina en un paquete de calcarenitas de unos 4 m de espesor (estratificación N100E/35N), presenta mayor estabilidad, favorecida por una densa cobertura vegetal derivada del abandono agrícola de las últimas décadas y por la presencia de cuatro pozos artesanos que contribuyen al drenaje natural de los niveles arenosos. En este sector solo se identificaron deformaciones menores como grietas incipientes y abultamiento del suelo, junto con desprendimientos puntuales localizados en las zonas de mayor pendiente, sin gran desplazamiento de material.

Por el contrario, el sector sur, caracterizado por una serie esencialmente margosa con buzamiento de unos 20° hacia el sur y ocupado por parcelas de olivar joven tratadas con herbicidas, concentró toda la actividad relevante. Se identificaron tres deslizamientos principales de tipo rotacional, con grietas de cabecera de progresión lateral circular, desplazamientos verticales decimétricos a métricos, arranque y desplazamiento de olivos, y acumulación de sedimentos finos en forma de conos en la calle al pie de la ladera. Estos deslizamientos se localizan preferentemente en bandas de cambio de pendiente (17-22%), donde la reducción del gradiente frena la escorrentía superficial y favorece la infiltración, produciendo la saturación prolongada de las margas, la pérdida de succión y cohesión aparente, y su consiguiente comportamiento plástico (Figura 2) (Maquaire et al., 2003). La ausencia de vegetación arbustiva en las parcelas de olivar joven, agravada por el uso de herbicidas, reduce adicionalmente la cohesión radicular del suelo, lo que explica que las parcelas con olivos más antiguos y mayor cobertura vegetal permanezcan más estables.

3.2. Seguimiento temporal mediante drones

El análisis multitemporal con dron permitió cuantificar la evolución de los deslizamientos en varios intervalos (Figura 3).

El análisis del DoD en la zona sur (Figura 3 B, C y D) revela una progresión clara de la deformación acumulada. En el intervalo 08-12 de febrero, se concentran los cambios más significativos, con erosión severa (>0.5 m) en la cabecera del deslizamiento y depósitos de +30 a +50 cm en el sector central y pie del talud, coherentes con un mecanismo rotacional en su fase de mayor actividad post-precipitación. El mapa acumulado 08-15 de febrero muestra un incremento moderado de las zonas afectadas, con variaciones centimétricas adicionales atribuibles a la redistribución del material previamente movilizado. Finalmente, el

acumulado 08-21 de febrero apenas difiere del anterior, con diferencias puntuales próximas al umbral de detección (± 10 cm), lo que evidencia que el grueso de la deformación se produjo en la primera semana y el proceso prácticamente cesó a partir del 15 de febrero.

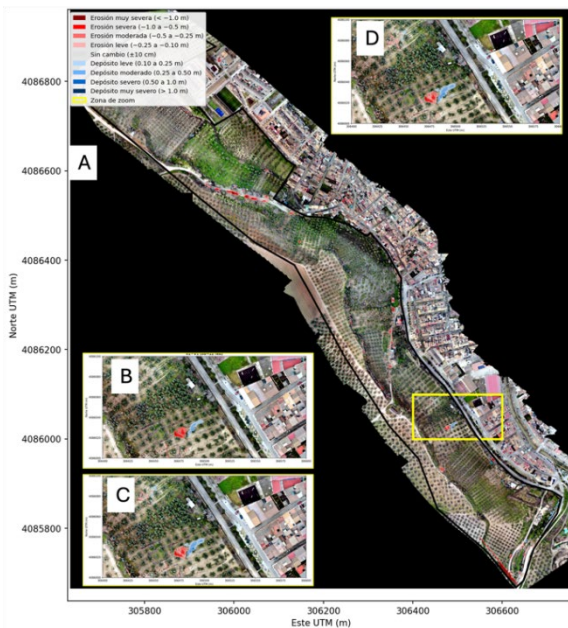


Figura 3. A) Clasificación de cambios de elevación (DoD) entre el 8 y el 15 de febrero de 2026 a partir de DEM LiDAR sobre ortofoto RGB. Las categorías de erosión (tonos rojos) y depósito (tonos azules) se definen con un umbral mínimo de detección de ± 10 cm. El recuadro amarillo indica la zona de detalle ampliada para el DoD entre B)8-12, C)8-15 y D)8-21 de febrero.

4. DISCUSIÓN

La tendencia decreciente de las deformaciones a lo largo de las cuatro campañas evidencia una progresiva estabilización de la ladera tras el episodio desencadenante. Esta evolución es coherente con el modelo interpretativo derivado del reconocimiento de campo: los deslizamientos responden a un mecanismo de rotura superficial controlado por la saturación de las margas, de modo que, una vez pasado el pico de precipitación y al reducirse el aporte hídrico, los materiales recuperan gradualmente consistencia y los movimientos se atenúan.

La integración de ambas fuentes de información, como son la observación geológica directa y la monitorización cuantitativa con dron, resultó determinante para el asesoramiento en la emergencia. El reconocimiento de campo proporcionó el marco interpretativo imprescindible para comprender los mecanismos y condicionar las zonas de análisis, mientras que los datos de dron aportaron la dimensión cuantitativa y temporal que el trabajo de campo por sí solo no puede ofrecer. En particular, la capacidad de generar DoD con precisión centimétrica en intervalos de pocos días permitió confirmar objetivamente la desaceleración de los procesos, dato clave para que los gestores de la emergencia pudieran evaluar el levantamiento progresivo de las medidas de desalojo.

Cabe destacar que la resolución de las ortofotos (2,7 cm/píxel) permitió además verificar la ausencia de nuevas grietas en el sector norte entre los vuelos del 12 y el 21 de febrero, proporcionando un criterio adicional de seguridad para las viviendas más próximas a la ladera. La complementariedad entre los sensores LiDAR y RGB se demostró especialmente útil: el LiDAR ofrece modelos de elevación robustos incluso en zonas con vegetación, mientras que las ortofotos RGB facilitan la identificación visual de grietas y la comunicación de resultados a los responsables no técnicos de la emergencia (Sestras et al., 2025).

5. CONCLUSIONES

La actuación del GADE-CSIC en Alcalá del Valle durante la emergencia causada por el tren de borrascas de enero y febrero en Andalucía en 2026 muestra que integrar geología de campo y monitorización con drones permite evaluar en tiempo real la evolución de deslizamientos activos. El trabajo in situ identificó tres deslizamientos de tipo rotacional en el sector sur, donde hubo saturación de margas miocenas en zonas de cambio de pendiente, frente a un sector norte más estable, mientras que los cuatro vuelos realizados entre el 8 y el 21 de febrero cuantificaron deformaciones de 20–50 cm en la fase inicial y confirmaron una estabilización progresiva que respaldó las decisiones de protección civil.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado en el marco de las actividades del Grupo de Asesoramiento Desastres y Emergencias del CSIC (GADE-CSIC, España) y proyecto PIE LEONARDO. Los autores agradecen el trabajo realizado por los Técnicos y Dirección de la Emergencia, UME y Ayuntamiento.

REFERENCIAS

- Chen, B., et al. (2025). Applications of UAV in Landslide Research: A Review. *Landslides*, 22, 3029-30348. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02547-2>
- Maquaire, O., Malet, J.-P., Rémaitre, A., Locat, J., Klotz, S. & Guillon, J. (2003). Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullyng? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology*, 70(1–2), 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00086-3)
- Sestras, P., Badea, G., Badea, A.C., Salagean, T., Oniga, V.-E., Roșca, S., Bilașco, Ș., Bruma, S., Spalević, V., Kader, S., Billi, P. & Nedevschi, S. (2025). A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature. *Engineering Geology*, 346, 107890. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107890>
- Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. & Sear, D.A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(3), 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>