

# ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD MEDIANTE DESCARGA EN CABEZA

**Alessandra DI MARIANO (1), Antonio GENS (1), Xavier GOST (2) y Eugenia ÁLVAREZ (3)**

(1) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Escuela Técnica Superior De Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) / Centre Internacional de Mètodes Numèrics a l'Enginyeria  
(CIMNE)  
alessandra.dimariano@upc.edu, antonio.gens@upc.edu

(2) Técnica y Proyectos, S.A.  
Departamento de Geotecnia de Cataluña  
Barcelona  
xgost@typsa.es

(3) Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat  
Subdirecció de Explotación Viaria  
Barcelona  
eugenia.alvarez@gencat.cat

## RESUMEN

*Entre los años 2006 y 2018, una autovía de titularidad autonómica situada al norte de la ciudad de Barcelona ha presentado diversas patologías asociadas tanto a su firme como a la ladera que la rodea. El movimiento de la zona objeto de estudio se ha auscultado mediante un extenso sistema de monitorización que ha permitido identificar la inestabilidad de la ladera como la causa de las patologías de la autovía. Con la finalidad de reducir la velocidad del movimiento observado y aumentar el factor de seguridad del talud, se decidió realizar la descarga de la cabeza del mismo. La actuación llevada a cabo está siendo beneficiosa, relativamente rápida y de coste limitado. La evolución del movimiento observado en función de la descarga pone de manifiesto la eficacia de la medida adoptada.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La red viaria de un país juega un papel fundamental en su desarrollo económico y por tanto una de las tareas más importantes, y quizás más complejas, con la que tienen que lidiar las Administraciones es asegurar la funcionalidad y seguridad de dicha red a lo largo del tiempo (Ferlisi et al. 2021). Debido a su configuración y desarrollo lineal, las carreteras a menudo discurren en diferentes contextos geológicos rodeando laderas que pueden ser propensas a deslizamientos con posibles riesgos para los usuarios de las mismas e impactos socioeconómicos a veces significativos (Ferlisi et al. 2021, Argyroudís et al. 2019; Hackl et al. 2018). Una correcta gestión de estos riesgos implica llevar a cabo actividades de predicción y, en la medida de lo posible, prevención de los posibles fenómenos de inestabilidad, teniendo en cuenta las limitaciones operativas y económicas (Ferlisi et al. 2021, Fell et al. 2005; Winter 2019).

En general, los procesos involucrados en deslizamientos o en otros fenómenos de inestabilidad del

terreno comprenden una serie de eventos con relación de causa-efecto. Son raras las ocasiones, si es que existen, en que un deslizamiento pueda atribuirse a una sola causa y, a menudo, existen varios factores que contribuyen al fenómeno de inestabilidad, induciendo incrementos en las tensiones de corte de los materiales implicados (Varnes, 1978, Alonso et al. 1993, Leroueil, 2001, Corominas 2006, Urciuoli y Picarelli, 2008, Alonso et al. 2010, Pinyol et al. 2012 entre otros).

El presente trabajo se refiere a un caso de estudio en el Nord-Este de España, relativo a un tramo de carretera construido mediante desmontes al pie de una ladera en las proximidades de un río. La funcionalidad y seguridad de este tramo de carretera se han visto afectadas por la inestabilidad del talud que la rodea. En la parte alta del talud se encuentra una antigua cantera convertida en el tiempo en depósito controlado de residuos. Para reducir la velocidad del talud y aumentar su estabilidad se ha decidido excavar los residuos, descargando así la cabeza del talud. El extenso sistema de monitorización instalado ha permitido seguir la evolución del fenómeno y comprobar la eficacia de la medida de estabilización adoptada.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Una autovía autonómica catalana, construida en el 1989, ha presentado diversas patologías a partir del año 2004. Dichas patologías interesan exclusivamente un tramo de la carretera de unos 500 m de longitud (Fig. 1), en el que la autovía se ejecutó mediante desmontes realizados al pie de la ladera que la rodea.

Los estudios para determinar el origen de los desperfectos observados empezaron a partir del año 2008 y se centraron inicialmente solo en el ámbito de la plataforma de la carretera donde en 2010, en una zona del tramo en cuestión, se construyó un muro de gaviones al pie del talud adyacente, como elemento de protección de la misma autovía (Fig. 1). En el año 2015, se redacta el Proyecto Constructivo de mejora local de la carretera para recuperar su seguridad y funcionalidad. El proyecto incluía, por un lado, la definición a nivel constructivo de las medidas correctoras de las patologías observadas y por el otro, la ejecución de las obras de reparación del firme de la autovía, así como de unos anclajes y drenes californianos en la parte del talud próxima a la carretera (Fig. 1). A partir del año 2017, durante la ejecución del proyecto, se comprueba que el tramo de autovía objeto de estudio sufre movimientos en dirección transversal, producidos por el desplazamiento del talud contiguo.

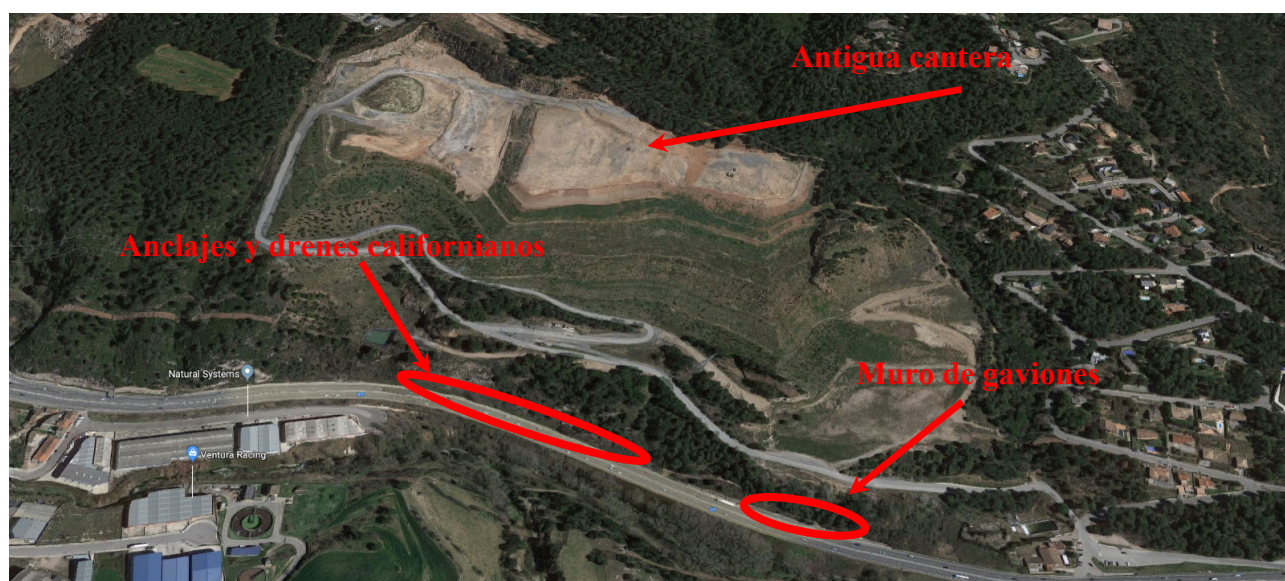


Figura 1. Tramo de la autovía objeto de estudio y de la antigua pedrera. La foto muestra la ubicación aproximada del muro de gaviones, anclajes y drenes californianos presentes al pie del talud que rodea la autovía.

En la coronación de la ladera, se encuentra una antigua cantera cuya actividad extractiva se desarrolló entre los años 1960 y 2004 (Fig. 1). A partir del 2004, empieza la restauración ambiental de la ladera mediante la conversión de la cantera en depósito controlado de residuos. Durante el periodo de ejecución de los trabajos de mejora local de la carretera, los técnicos responsables del proyecto hallan una relación causa-efecto entre la finalización de la explotación de la cantera y la aparición de las patologías en la autovía.

Entre los años 2017 y 2018, se lleva a cabo la segunda fase del proyecto constructivo de mejora de la carretera que incluye la ejecución de un nuevo estudio geotécnico y la realización de un análisis de estabilidad de la ladera. Los resultados de estos trabajos concluyen que las patologías observadas en la autovía son en realidad consecuencia de un fenómeno de inestabilidad del talud que moviliza un volumen de terreno de unos 4.000.000 m<sup>3</sup>, según los datos de auscultación más recientes. Con el objetivo de limitar los riesgos asociados a dicho fenómeno de inestabilidad, en el año 2018 los técnicos de la Administración toman la decisión de interrumpir el vertido de residuos en la antigua cantera y, al mismo tiempo, instrumentar tanto el talud como la zona del depósito controlado, para así definir los límites de la masa inestable.

### 3. GEOLOGÍA DE LA ZONA

La secuencia litológica de la ladera en la zona de estudio comprende los siguientes materiales del más reciente al más antiguo (Fig. 2):

- Rellenos antrópicos (R) y rellenos de restauración de la cantera (RC)
- Arcillas arenosas con gravas de origen coluvial de la Era Cuaternaria (Q)
- Limolitas y arenas del Eoceno (E)
- Alternancia de dolomías y calizas del Triásico medio (M1), en bancos decimétricos a centimétricos (materiales explotados en la antigua cantera)
- Lutitas, argilitas y areniscas laminadas versicolores con vetas milimétricas de yeso fibroso pertenecientes al Triásico inferior (B).

Según los últimos datos disponibles, la superficie de rotura que caracteriza el fenómeno de inestabilidad del talud tiene una profundidad de unos 40 m y se localiza principalmente en el nivel litológico de las lutitas (unidad B en la Fig. 2). El volumen de terreno inestable afecta de manera directa la autovía autonómica, así como prácticamente a todo el recinto de la antigua cantera y, de forma indirecta, el lecho de un río ubicado ladera abajo de la autovía, un polígono industrial situado entre la carretera y el río, además de algunas líneas de telecomunicaciones y suministro eléctrico (Fig. 2).

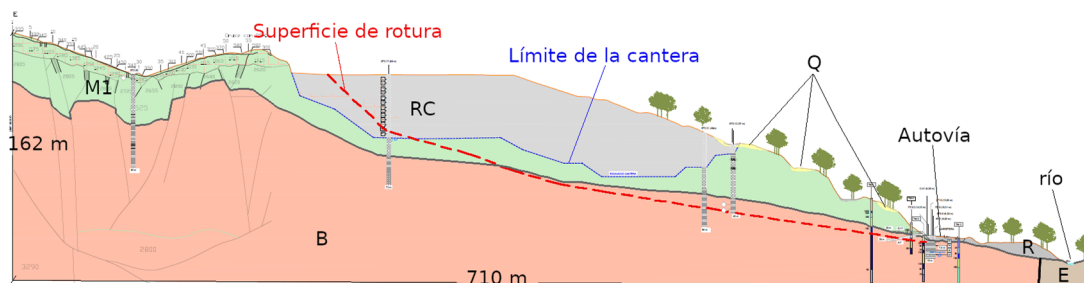


Figura 2. Perfil geológico correspondiente a una de las secciones transversales del talud. La figura muestra la ubicación de la superficie de rotura indicada por los inclinómetros.

La Figura 2 muestra una sección transversal de la zona con las diferentes litologías, las ubicaciones de la antigua cantera, la autovía y el río al pie de la ladera y, finalmente, la posición de la superficie de rotura identificada a partir de las lecturas inclinométricas.

En el ámbito de estudio, las lutitas del Triásico inferior (unidad B) presentan un aspecto alterado sobre todo a la profundidad de la superficie de deslizamiento. En fase de proyecto, el Contratista realizó algunos ensayos de laboratorio para caracterizar estos materiales (Tablas 1 y 2). Más tarde, en el laboratorio de Geotecnia del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña, se ejecutaron también unos ensayos de corte anular (usando el equipo de Bromhead) bajo condición residual, para determinar la resistencia drenada de la unidad B en correspondencia de la superficie de deslizamiento (Tabla 3).

	Identificación						
	Límites de Atterberg			Granulometría			w (%)
	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	IP (%)	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	
N.º ensayos	16	16	16	18	18	18	18
Valor máximo	29.3	18.0	13.0	42.1	61.7	67.2	18.7
Valor mínimo	19.3	14.4	4.8	0.0	19.5	28.1	7.0

Tabla 1. Resumen de los parámetros de identificación de la unidad B.

	Compresión simple		Corte Directo CD	
	q <sub>u</sub> (kPa)	E (MPa)	c (kPa)	φ (°)
N.º ensayos	11	11	15	15
Valor máximo	361.0	11.1	82.0	43.6
Valor mínimo	49.0	0.8	0.0	17.3

Tabla 2. Resumen de los parámetros geomecánicos de la unidad B.

Profundidad muestra (m)	Corte anular		Límites de Atterberg		
	c' (kPa)	φ <sub>res</sub> (°)	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	IP (%)
34.2-34.5	0	17.9	-	-	-
34.8-35.0	0	23.0	28.0	16.2	11.8
45.0-45.5	0	18.1	26.4	16.3	10.1

Tabla 3. Resumen de los parámetros relativos a tres muestras de la unidad B en correspondencia de la superficie de deslizamiento, en la que se realizaron ensayos de corte anular bajo condiciones residuales.

#### 4. INSTRUMENTACIÓN

En la zona objeto de estudio, a partir del mes de septiembre del 2017, se instaló un extenso sistema de monitorización que incluye inclinómetros, hitos topográficos, piezómetros abiertos y de cuerda vibrante, prismas automáticos y finalmente células de carga.

Para seguir la evolución del movimiento del talud en profundidad e identificar con detalle la superficie de deslizamiento, en 4 años se han instalado 37 inclinómetros biaxiales. Muchos se han roto a causa del movimiento acumulado y, en los periodos de máxima velocidad del movimiento (40 mm/mes), algún inclinómetro ha tenido una vida útil de apenas 4 meses. Actualmente, solo 15 de ellos están en funcionamiento.

El movimiento de la superficie del talud en las tres direcciones UTM (Universal Transversal de Mercator), se ha observado mediante la utilización de 58 hitos topográficos, distribuidos a lo largo de la zona de estudio. La lectura de dichos hitos se ha realizado mediante GPS (Global Positioning System), con una precisión inferior a los 5mm. Además, otros 18 hitos topográficos se han instalados en el depósito controlado, para determinar con precisión los límites del movimiento.

La evolución del nivel freático y de las presiones del agua intersticial a la profundidad de la superficie de rotura de la ladera se ha seguido mediante 7 piezómetros abiertos y 4 piezómetros de cuerda vibrante, respectivamente. De los 7 piezómetros abiertos, ranurados en toda su longitud, solo 6 están actualmente en funcionamiento.

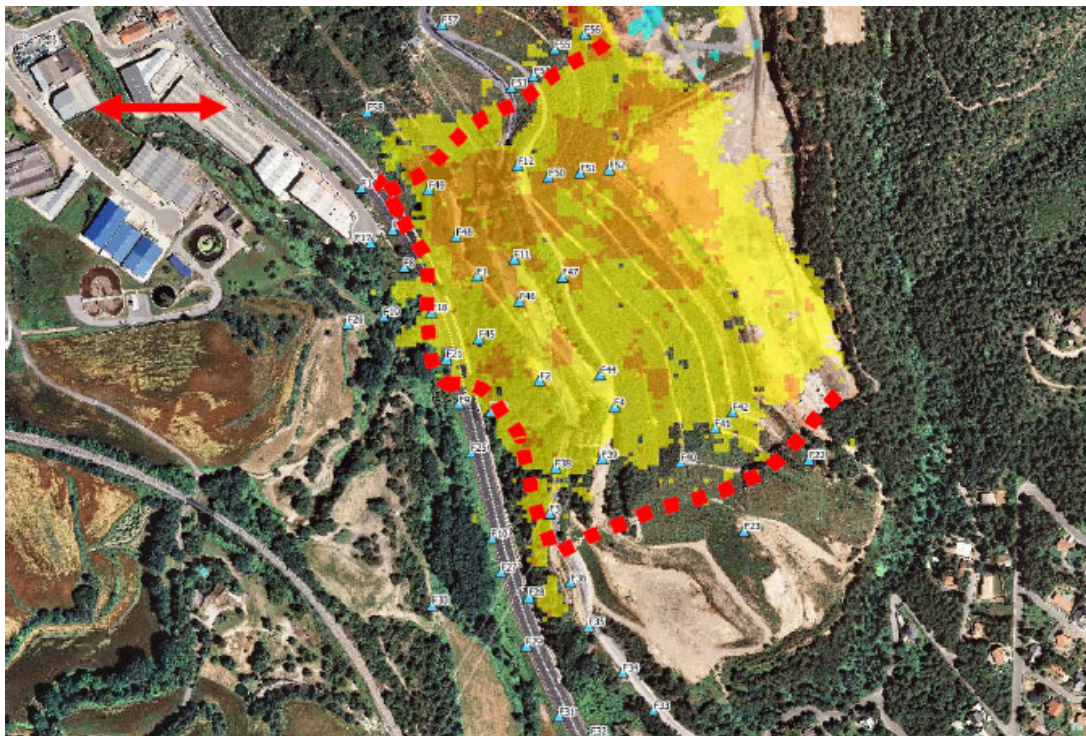


Figura 3. Superposición de los límites de movimiento en sentido Este-Oeste detectados mediante tecnología InSAR e hitos topográficos.

Para contrastar los datos de monitorización y definir con más precisión la extensión de la masa inestable, se ha recurrido también a un estudio de interferometría mediante tecnología InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar). Adquiriendo y comparando imágenes radar de la zona se han evaluado las deformaciones del terreno con precisión milimétrica. La Figura 3 muestra el área inestable, según los datos InSAR del mes de abril del 2018. La línea discontinua en la misma figura representa los límites del movimiento registrados por los hitos topográficos. Se observa una buena correlación entre las dos metodologías de auscultación (Fig. 3).

Asimismo, para seguir el movimiento de diversos elementos estructurales ubicados en la zona inestable se han utilizado 35 prismas automáticos. Las lecturas se han realizado cada hora durante las 24 horas del día mediante teodolitos automáticos. Finalmente, para observar la evolución de las fuerzas de trabajo de los anclajes presentes al pie del talud (Fig. 1), se han colocado 10 células de carga.

Con el objetivo de fijar un sistema de alerta temprana, en el plan de auscultación se han definido también umbrales de aviso, alerta y alarma para cada instrumento instalado, en función de las estimaciones de movimiento realizadas en fase de proyecto.

## 5. MEDIDA DE ESTABILIZACIÓN

Habiendo establecido que los desperfectos de la carretera derivaban integralmente del movimiento del talud que la rodea, los técnicos a cargo del proyecto analizaron diferentes medidas

de estabilización, con el objetivo de aplicar al menos una de las siguientes acciones:

- Reducción del peso en la coronación del talud, mediante la excavación de los residuos y el bombeo del agua acumulada en la antigua cantera
- Aumento del peso en correspondencia del pie del talud, a través de un cambio del trazado de la carretera
- Incorporación de elementos estructurales aptos a resistir el movimiento observado, mediante la construcción de muros pantallas anclados a diferentes niveles en la ladera.

La valoración de las diferentes alternativas se realizó en términos tanto de aumento del Factor de Seguridad (FS) del talud como de coste económico de ejecución. Además, para cada alternativa se consideraron aspectos relativos a las posibles afectaciones medioambientales, grado de fiabilidad y vida útil de las medidas, afectación a los usuarios de la autovía (más de 30.000 vehículos diarios) y afectación a terceros en general.

Una vez analizadas las alternativas planteadas, la Administración en calidad de propiedad de la carretera tomó la decisión de estabilizar el talud mediante la retirada del vertido en el depósito controlado y el bombeo de las aguas allí presentes. En comparación con las otras medidas de estabilización, ésta tiene la ventaja de ser una actuación flexible, con posibilidad de realizarse en diferentes etapas sin afectar el trazado de la autovía o la configuración de su entorno y adaptable a la respuesta del talud, según la evolución de los datos de auscultación.

Las actividades de excavación y descarga de la parte alta del talud empezaron a finales del 2018, interrumpiéndose por problemas logísticos, entre los meses de enero y agosto del año 2020. Se reanudaron posteriormente en el mes de setiembre del mismo año y han seguido de forma continuada hasta finales de febrero del 2022.

## **6. EVOLUCIÓN DEL MOVIMIENTO**

La primera estimación de la velocidad del movimiento de la ladera se hizo en el año 2016 en base a datos taquimétricos disponibles desde el año 2006. Debido a algunas incertidumbres sobre la precisión de dichos datos, la estimación es aproximada y da exclusivamente valores medios de la velocidad de movimiento, sin ofrecer ningún dato sobre la evolución del fenómeno. Con esta primera estimación se obtiene una velocidad media de 8 mm/mes durante un período de 10 años (2006-2016), sin tener en cuenta las posibles variaciones puntuales de velocidad, asociadas por ejemplo a alteraciones de las condiciones hidráulicas del terreno.

A partir de finales del 2017, con los numerosos datos de monitorización disponibles, se tienen registros fiables de la evolución del fenómeno de inestabilidad. Los datos indican que la velocidad con que se mueve el talud no es constante y su variación depende de cambios en el estado tensional del terreno, asociados por ejemplo a fluctuaciones de las presiones del agua intersticial por efecto de eventos de lluvia (Fig. 4). Al principio del periodo de auscultación, la aceleración del movimiento se producía con cierto desfase respecto a cada evento lluvioso (Fig. 4). Con el tiempo, ese desfase se fue reduciendo y el movimiento del talud se hacía siempre más sensible a cualquier variación tensional (Fig. 4).

En los últimos días del 2018, empieza la descarga de la parte alta del talud. Al aumentar el volumen excavado, la velocidad del movimiento se reduce progresivamente y el fenómeno de inestabilidad se hace más independiente de los cambios tensionales del terreno (Figs. 4 y 5). A finales de enero del 2020, a causa de una violenta borrasca (153 l/m<sup>2</sup> en 3 días aproximadamente), el movimiento se acelera nuevamente, llegando a velocidades máximas de unos 20 mm en 5 días. En apenas cuatro días desde el inicio de la borrasca, en correspondencia de la superficie de deslizamiento, se produce un aumento de la presión intersticial de unos 4 metros de columna de agua en algo más de 24 horas. El rápido incremento de la presión intersticial indica un aumento de la permeabilidad de las formaciones litológicas ubicadas encima de la superficie de rotura,

debido posiblemente a la evolución de sus procesos de alteración. En el mismo período de tiempo, los prismas topográficos registran velocidades punta de hasta 90 mm/mes. La borrasca coincide con el inicio de un período en que, por temas logísticos, se suspenden temporalmente los trabajos de descarga de la cabeza del talud y, al acabar las precipitaciones, el movimiento progresa con velocidades medias de unos 14 mm/mes.

Al retomarse las actividades de excavación, el movimiento y su velocidad se van reduciendo gradualmente, hasta llegar a los valores actuales de unos 0.3 mm/mes. Desde finales de febrero del 2022 y hasta la actualidad, la descarga de la parte alta de la ladera se ha interrumpido por temas de gestión administrativa.

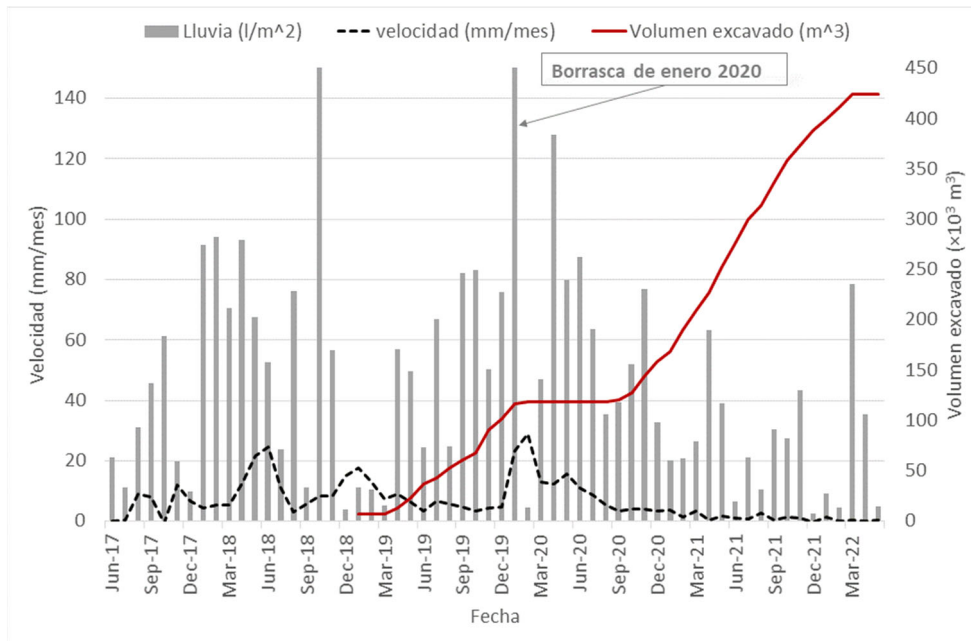


Figura 4. Evolución de la velocidad del movimiento del talud en milímetros al mes y del volumen de residuos excavados. En gris se muestra el histograma de los eventos de lluvia en litros al metro cuadrado. Período de observación junio 2017-marzo 2022.

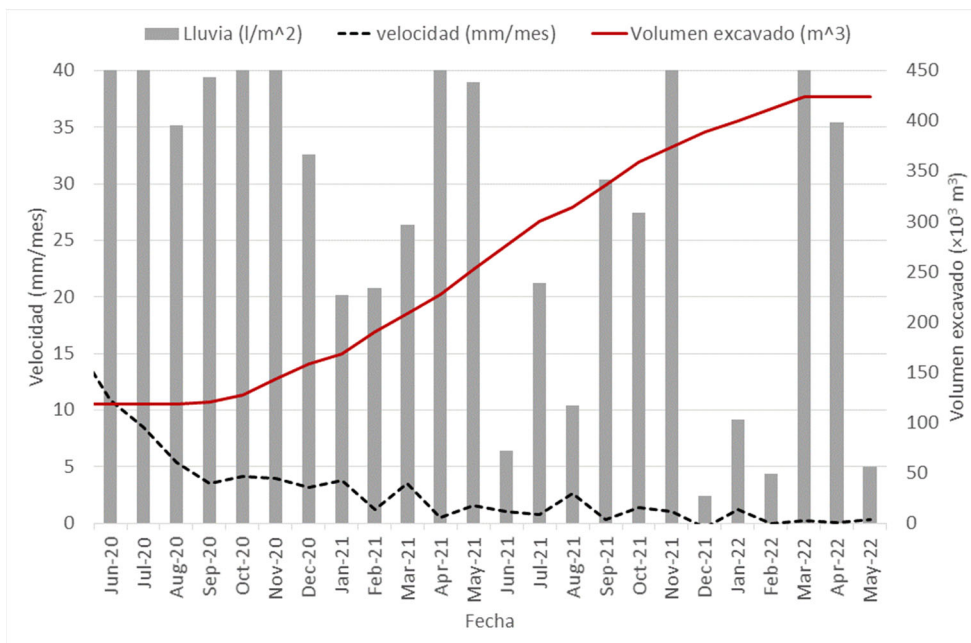


Figura 5. Evolución de la velocidad del movimiento del talud en milímetros al mes y del volumen de residuos excavados. En gris se muestra el histograma de los eventos de lluvia en litros al metro cuadrado. Período de observación junio 2020-mayo 2022.

Las gráficas de las figuras 4-6 muestran claramente que la medida de estabilización del talud mediante la descarga en cabeza es adecuada y eficaz. A pesar de la disminución progresiva del movimiento, los datos de auscultación indican que todavía no se ha llegado a la estabilización definitiva del talud. De hecho, los residuos presentes en la antigua cantera no han sido excavados aún en su totalidad.

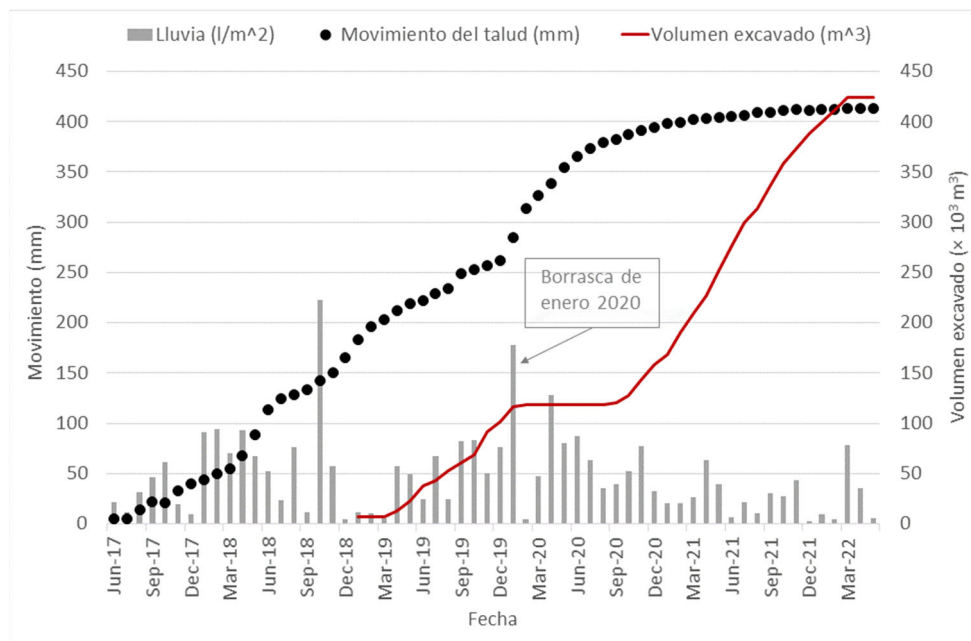


Figura 6. Evolución del movimiento del talud y del volumen de residuos excavados, en el tiempo. En gris se muestra el histograma de los eventos de lluvia en litros al metro cuadrado.

## 7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El talud adyacente a una autovía principal del norte de Barcelona, en España, se mueve lentamente en dirección perpendicular al eje de la carretera. La secuencia litológica de la zona, de más moderna a más antigua, comprende rellenos antrópicos, materiales coluviales del Cuaternario caracterizados por arcillas arenosas con gravas, alternancia de dolomías y rocas calcáreas del Triásico medio y finalmente lutitas, arcillitas y areniscas del Triásico inferior.

Un extenso sistema de monitorización ha permitido seguir la evolución del movimiento desde el año 2017. Las lecturas inclinométricas indican la presencia de una superficie de deslizamiento che, en general, atraviesa las lutitas del Triásico inferior, llegando a una profundidad máxima de unos 40 m. El fenómeno de inestabilidad pone en riesgo la seguridad y funcionalidad de la autovía, involucrando unos 4.000.000 m<sup>3</sup> de terreno, según los datos de monitorización más recientes.

Para reducir la velocidad del movimiento e incrementar el factor de seguridad del talud, se ha optado por intervenir mediante la actuación de descarga en cabeza. El presente trabajo describe los detalles del caso de estudio y muestra la eficacia de la medida de estabilización adoptada, a partir de la evolución de los datos de auscultación.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a Infraestructuras de la Generalitat de Catalunya, S.A.U. por el apoyo dado a la elaboración del presente trabajo.



Se agradece también la ayuda CEX2018-000797-S relativa a los centros de excelencia “Severo Ochoa” (2019-2023) financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

## REFERENCIAS

- Alonso, E.E., Gens, A. and Lloret, A., 1993. The landslide of Cortes de Pallas, Spain. *Géotechnique* 43, No. 4, 507-521.
- Alonso, E.E., Pinyol, N.M. and Puzrin, A.M., 2010. Geomechanics of failures. Advanced Topics. Springer Science + Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3538-7>.
- Argyroudis, S.A., Mitoulis, S.A., Winter, M.G. and Kaynia, A.M., 2019. Fragility of transport assets exposed to multiple hazards: state-of-the-art review toward infrastructural resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106567>.
- Corominas, J., 2006. El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España. *Rev. C & G.*, 20 (3-4), 89-113.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. and Leroi, E., 2005. A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) *Landslide risk management*. Taylor and Francis, London, pp. 3–26.
- Ferlisi, S., Marchese, A. and Peduto D., 2021. Quantitative analysis of the risk to road networks exposed to slow-moving landslides: a case study in the Campania region (southern Italy). *Landslides*, 18: 303-319.
- Hackl, J., Lam, J.C., Heitzler, M., Adey, B.T. and Hurni, L., 2018. Estimating network related risks: A methodology and an application in the transport sector. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 18(8): 2273–2293. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2273-2018>.
- Leroueil, S., 2001. Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms. *Géotechnique* 51, No. 3, 197-243.
- Pinyol, N.M., Alonso, E.E., Corominas, J. and Moya, J., 2012. Canelles landslide: modelling rapid drawdown and fast potential sliding. *Landslides*, 9: 33–51. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0264-x>.
- Urciuoli, G. and Picarelli, L., 2008. Interaction between landslides and man-made works. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Int. Symp. on Landslides and Engineered Slopes*, Xi'an (China), CRC Press, 2, 1301–1307.
- Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and control (Eds: Schuster, R.L and Krizek, R.J), *Transportation and Road research board*, National Academy of Science, Washington D.C., 11-33.
- Winter, M.G., 2019. Landslide hazards and risks to road users, road infrastructure and socio-economic activity. Invited lecture. In: Sigursteinsson H, Erlingsson S, Bessason B (eds), *Proc. of the XVII ECSMGE-2019*, Reykjavik Iceland, 1–6 September 2019, 33 pp. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-1118>.