

EFFECTO DE LA ORIENTACIÓN EN LA RESPUESTA DE TALUDES ANTE ACCIONES CLIMÁTICAS: EXPERIMENTO DE CAMPO Y MODELACIÓN

C. Villarraga (1), V. Guazichaca (2), R. Oorthuis (3), J. Vaunat (4), A. Lloret (4), M. Hürlimann (3)

(1) INTEINSA, Medellín, Colombia
claudia.juliana.villarraga@gmail.com

(2) Diconsgeotecnico Cia. Ltda, Loja, Ecuador
vfguachizaca@gmail.com

(3) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politècnica de Catalunya
raul.oorthuis@upc.edu
marcel.hurlimann@upc.edu

(4) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politècnica de Catalunya – Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería
jean.vaunat@upc.edu
antonio.lloret@upc.edu

RESUMEN

En este artículo, se presenta un experimento de campo diseñado para estudiar los fenómenos de interacción termo-hidráulicos suelo-atmosfera en taludes de dos orientaciones distintas: norte y sur. El experimento consiste en un terraplén instrumentado sometido a condiciones meteorológicas naturales (radiación solar, atmosférica y del suelo, infiltración, escorrentía, evaporación, evapotranspiración y viento.). Se han obtenido series de datos de larga duración y alta frecuencia (medidas cada 5 mins durante 4 años) incluyendo variables atmosféricas, temperatura, contenido de agua, potencial del agua y flujo de calor a distintas profundidades en el suelo, Los datos se han interpretado numéricamente mediante el código Elementos Finitos (Code_Bright) que resuelve problemas acoplados termo-hidro-mecánicos e incluye una condición de contorno específica para modelar acciones atmosféricas. Los resultados del modelo numérico se pueden comparar favorablemente con las mediciones y proporcionan valiosas informaciones sobre el efecto de la orientación de la ladera para su respuesta frente a acciones climáticas presentes y futuras.

1. INTRODUCCIÓN

Las acciones climáticas inducen variaciones importantes en el estado hídrico y térmico de la zona más superficial de taludes naturales o antrópicos. Estas variaciones pueden inducir inestabilidades superficiales (deslizamientos por placa, coladas y otros procesos erosivos) o bien afectar las presiones de agua en más profundidad, a su vez relacionadas con la posibilidad de una rotura del talud.

Las interacciones entre el suelo y la atmósfera incluyen flujos de masa y de calor: radiación solar, atmosférica y del suelo, infiltración, escorrentía, evaporación, evapotranspiración y efecto del viento (Blight, 1997). Además, la vegetación juega a menudo un papel adicional no despreciable al interceptar parte de la lluvia, limitar la escorrentía, liberar vapor a la atmósfera y proporcionar al suelo un refuerzo de raíces, cuando no crea asentamientos o aumenta la permeabilidad del suelo por agrietamiento (Noilhan y Planton, 1989).

Para evaluar la importancia de estos fenómenos, se ha desarrollado un experimento de campo. Consiste en un terraplén instrumentado con dos caras orientadas respectivamente norte y sur y sometido a las condiciones meteorológicas naturales. En ese artículo, se presenta y discute los resultados experimentales correspondientes a los dos primeros años del experimento, con énfasis sobre el efecto de la orientación del talud para su estado hidráulico.

Para evaluar mejor los fenómenos de interacción suelo-atmósfera, los datos obtenidos del campo experimental se interpretan mediante un modelo numérico que considera las ecuaciones hidrotermales acopladas de intercambio. Con este fin, se ha utilizado el código Elementos Finitos Code_Bright (Olivella et al, 1994) dónde se ha incluido un módulo de interacciones atmosféricas. Los resultados del modelo numérico se pueden comparar favorablemente con las mediciones, lo que valida la necesidad de considerar un acoplamiento termohidráulico para evaluar los cambios de contenido de agua en el talud. Adicionalmente, el modelo numérico permite indagar en los procesos diferenciados ocurriendo en las caras norte y sur del terraplén.

2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO A GRAN ESCALA

El terraplén estudiado se construyó a principios de 2017 en el Parc UPC Agròpolis, situado en la llanura deltaica del río Llobregat. Mide 18 m de largo, 12 m de ancho y 2,4 m de altura. Para considerar la máxima y mínima radiación solar posible, se orientó su eje mayor en dirección este-oeste y las laderas instrumentadas en dirección sur y norte. (Oorthuis, 2016).

La estructura del terraplén consiste en un núcleo granular de más o menos 2 m de altura, recubierto por una geomembrana impermeable de polietileno, que tiene como objetivo proteger el núcleo central de las infiltraciones del agua. Sobre la membrana se colocó una capa de suelo de 50 a 70 cm de espesor. Las pendientes corresponden a una relación 3H:2V.

Los dos aspectos principales que afectan la respuesta de un terraplén sometido a sollicitaciones atmosféricas son la radiación solar y la vegetación. Para estudiar sus respectivos efectos, se consideraron 4 áreas monitoreadas: orientación norte sin vegetación (NnV), orientación norte con vegetación (NV), orientación sur sin vegetación (SnV) y orientación sur con vegetación (SV) (ver Figura 1).

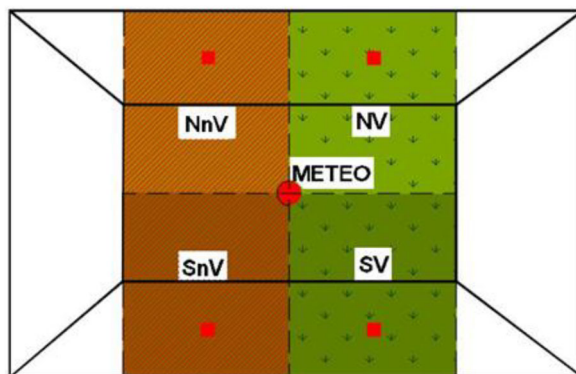


Figura 1 Descripción del experimento a gran escala dividido en cuatro particiones evidenciado las 4 áreas monitorizadas SV, SnV, NV y NnV. Se indica la posición relativa de los cuatro perfiles verticales de monitorización (cuadrados rojos) y la posición de la estación meteorológica (V. Guachizaca, et al, 2018).

Cada área monitoreada tiene un perfil vertical instrumentado (cuadrados rojos en la figura 1) que se extiende hasta los primeros 60 cm por debajo de la superficie del terraplén, en la capa colocada sobre la geomembrana. Cada perfil está equipado con medidas de temperatura, succión o presión de líquido y contenido de agua a diferentes profundidades.

Además, en la parte superior del terraplén se sitúa una estación meteorológica con medidas de temperatura, radiación solar, precipitación pluvial y velocidad del viento. La información obtenida de esta estación meteorológica se puede complementar con la información obtenida de la estación meteorológica situada en el municipio de Viladecans, situada a 1,3 km de distancia del lugar. En las dos caras no vegetadas se ha además instalado dos medidores de velocidad de viento y de radiación solar.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA

Con el objetivo de interpretar y tener un mayor conocimiento de los procesos involucrados en la respuesta del terraplén ante la acción climática, se ha desarrollado en paralelo un modelo numérico hidrotérmico utilizando el código Elementos Finitos Code_Bright (Olivella et al, 1994).

Las interacciones suelo-atmósfera abarcan procesos acoplados hidrotérmicos que incluyen flujos advectivos, convectivos y difusivos, laminares y turbulentos, que cruzan la interfaz entre el suelo y el aire. En el enfoque simplificado considerado en este trabajo, estos diferentes flujos se simulan mediante una condición de contorno no lineal (Vaunat et al, 2017). Así mismo, se analiza solo las zonas sin vegetación del terraplén (NnV y SnV), dejando la modelación del efecto de la vegetación para análisis futuras.

Para simplificar el cálculo, la geometría propuesta representa solo la parte superior del terraplén, es decir, la zona instrumentada sobre el geotextil. La Figura 2 presenta la geometría considerada para el modelo numérico. La malla considerada consta de 500 elementos. Se ha refinado cerca de la interfase suelo-atmósfera, donde los gradientes y los flujos son más importantes.

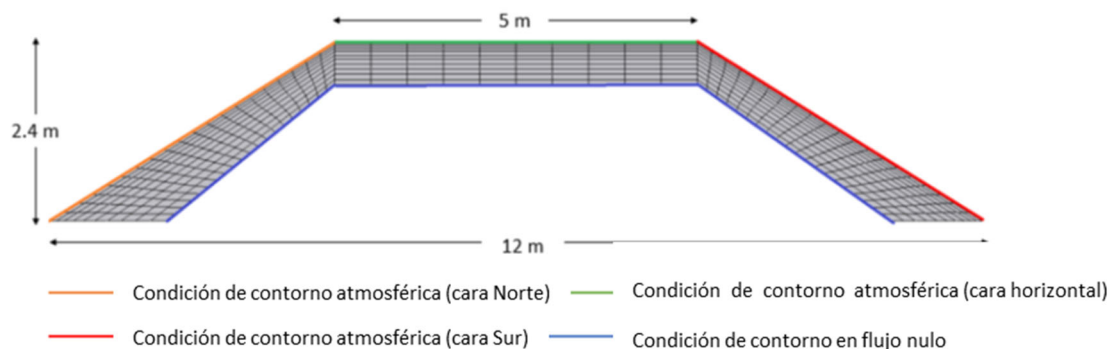


Figura 2 Geometría, malla y condiciones de contorno consideradas para el modelo numérico.

La condición de contorno de interacción suelo-atmósfera (ISV) se alimenta por registros meteorológicos. Para este propósito, los datos meteorológicos monitoreados en el sitio se comparan en la Figura. 3 con las proporcionadas por el servicio meteorológico de la estación del pueblo más cercano de Viladecans. Por su similitud y por el mayor plazo de registro disponible en la estación de Viladecans, esta última es la que se ha introducido en la modelación.

Por otra parte, las medidas meteorológicas proporcionan la radiación solar incidente atravesando una superficie horizontal y se debe aplicar una corrección en función de la inclinación (DIP) y la dirección (DIP direction) del talud para las superficies inclinadas correspondientes a los taludes del terraplén. La condición de contorno atmosférico considerada en CODE_BRIGHT incluye una corrección automática del flujo de calor normal debido a la radiación solar controlada por el ángulo y la dirección de la pendiente dada como parámetro de entrada de la condición.

En consecuencia, se han prescrito en el modelo tres tipos de condiciones de contorno ISV para las caras sur, superior (horizontal) y norte del terraplén (Figura 2). Además, en la parte inferior del talud, se ha prescrito una condición de contorno de flujo de agua nulo para modelar el efecto de la geomembrana impermeable, mientras que en este nivel se han impuesto las temperaturas registradas cerca de la geomembrana.

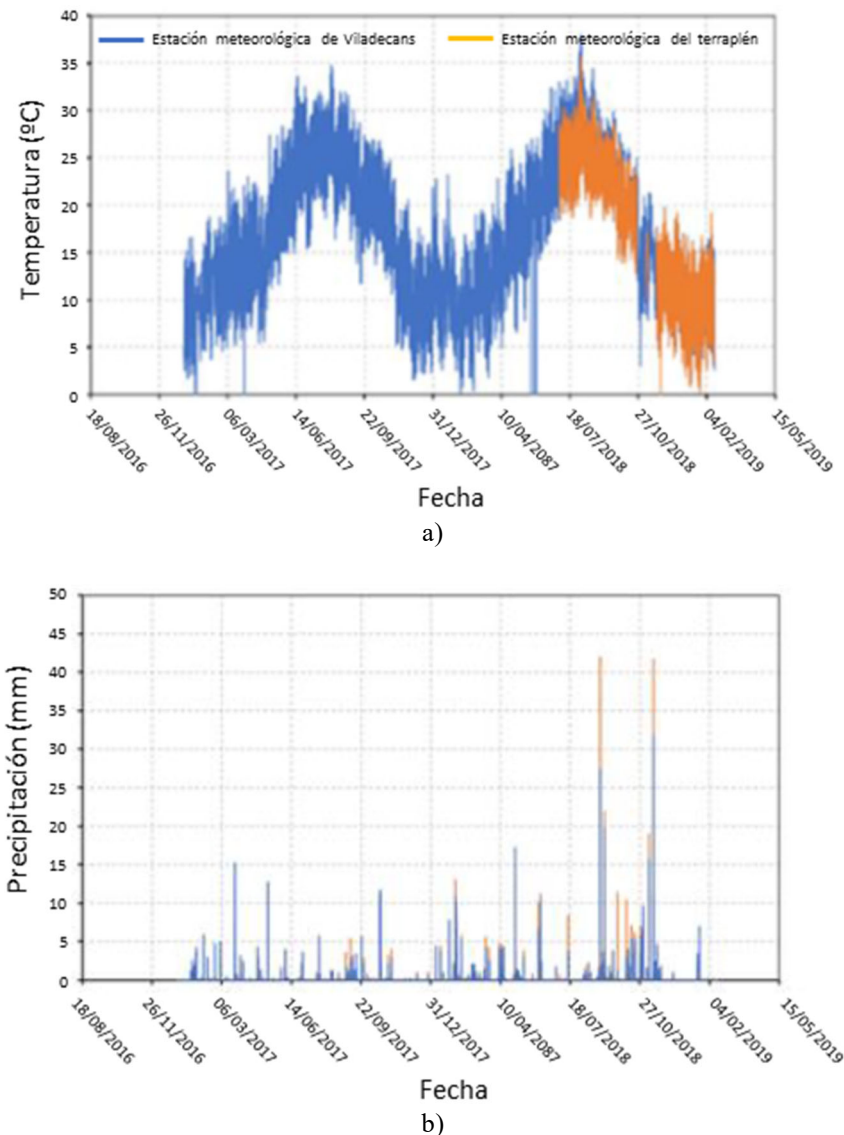


Figura 3 Comparación entre registros atmosféricos monitorizados in situ y en la estación de Viladecans: a) temperatura; b) lluvia.

Los parámetros del suelo se han definido con base en resultados experimentales obtenidos en pruebas de laboratorio o mediciones de campo (Guachizaca, 2018). Se resumen en la Tabla 1. En particular, la curva de retención, que es uno de las principales leyes de control para la evolución de la succión y del contenido de agua bajo sollicitación climática, se ha determinado directamente a partir de medidas campo de contenido de agua y de succión medidos en puntos cercanos dentro del terraplén (Figura 4). La gran dispersión observada en la figura para la relación contenido de agua-succión se atribuye al retardo existente entre la respuesta de las medidas de succión y contenido de agua. Como los períodos de secado son mucho más largos que los períodos de humedecimiento debido a las lluvias, se espera que, para un contenido de agua fijo, el equilibrio de succión se alcance en los puntos de mayor succión. Como tal, la curva de retención del modelo se ha definido como la envolvente superior de todas los puntos relacionado succión con contenido de agua. Para un mejor ajuste de las medidas en el rango bajo de succión (entre 10 y 100 kPa) se

ha utilizado la ecuación propuesta por Casini et al. (2012) para materiales de doble porosidad.

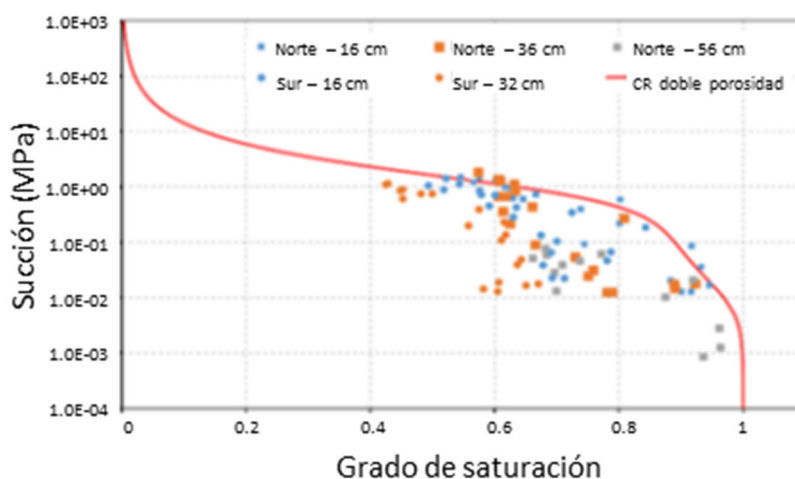


Figura 4 Curva de retención de agua considerada en el modelo.

Parameter	Label (unit)	Valor
Constitutive law		
Porosity	ϕ (-)	0.3
Intrinsic permeability	K (m^2)	$8.5e-16$
<i>Darcy's law</i>		
Liq. phase rel. permeability	λ (-)	0.26
<i>Van Genuchten model</i>		
	P_{0M} (MPa)	0.01
	λ_M (-)	0.01
	P_{0m} (MPa)	0.01
<i>Water retention curve</i>		
<i>Double porosity WRC</i>		
	λ_μ (-)	0.01
	w	0.01
	S_{rl} (-)	0.
	S_{ls} (-)	1.0
<i>Diffusive flux of vapour</i>		
<i>Fick's law</i>		
	D ($m^2.s^{-1}.K^{-n}.Pa$)	$5.90e-6$
	τ (-)	1.0
	n (-)	2.3
<i>Conductive flux of heat</i>		
<i>Fourier's law</i>		
	λ_{sat} ($W.m.K^{-1}$)	2.5
	λ_{dry} ($W.m.K^{-1}$)	3.0

Tabla 1 Propiedades del material.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una problemática general en la modelación de las interacciones suelo-atmósfera es la definición del estado inicial termo-hidráulico porque viene determinado por las interacciones ocurriendo en un periodo anterior al inicio del cálculo y de duración desconocida. Sin embargo, en este caso particular, dónde la fecha de construcción del terraplén (11 de enero de 2017) y el contenido de agua de compactación es conocida, se ha podido modelar la evolución previa a la instalación de los perfiles de monitoreo, usando el registro meteorológico de Viladecans como referencia para la condición ISV. De esta forma, se obtiene un estado inicial en el momento del inicio de la medidas equilibrado con la sollicitación atmosférica.

La Figura 5 presenta la comparación entre la evolución temporal de las temperaturas calculadas

y medidas para la vertiente norte a dos profundidades diferentes: cerca de la superficie (1 cm de profundidad) y en el medio de la capa del suelo (36 cm de profundidad). Se puede observar que el modelo numérico reproduce generalmente bien la evolución de la temperatura bajo la carga climática. Sin embargo, las temperaturas de verano parecen estar sobreestimadas en aproximadamente 3 grados centígrados.

La Figura 6 presenta los resultados para la vertiente sur. El modelo vuelve a reproducir bien la variación de temperatura durante el año, aunque las sobreestima ligeramente durante el período estival a 36 cm de profundidad. Además, en ese caso, las temperaturas superficiales también se subestiman en algunos grados durante el invierno.

Es interesante señalar la diferencia entre la temperatura alcanzada en la superficie en la vertiente norte y sur. Debido a los diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar, se han alcanzado temperaturas de hasta 50 °C durante el día en verano en la cara sur mientras que en la cara norte se mantienen temperaturas por debajo de los 40 °C. El modelo numérico reproduce bien este efecto.

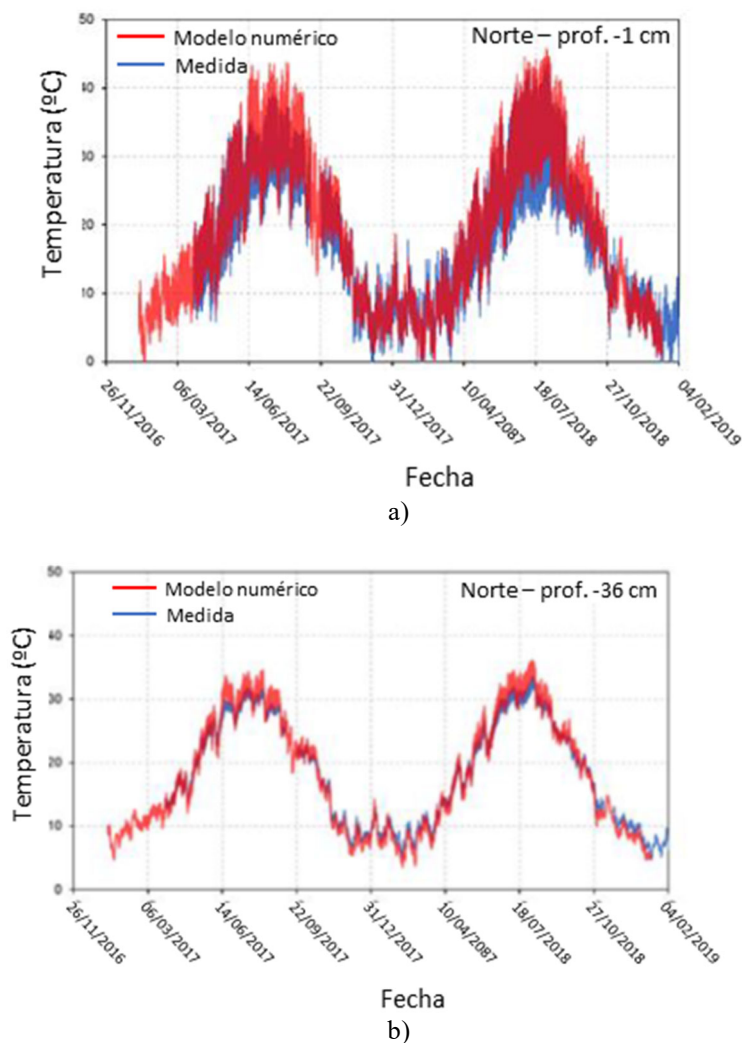


Figura 5 Evolución temporal de la temperatura para la vertiente norte: a) 1 cm de profundidad; b) 36 cm de profundidad.

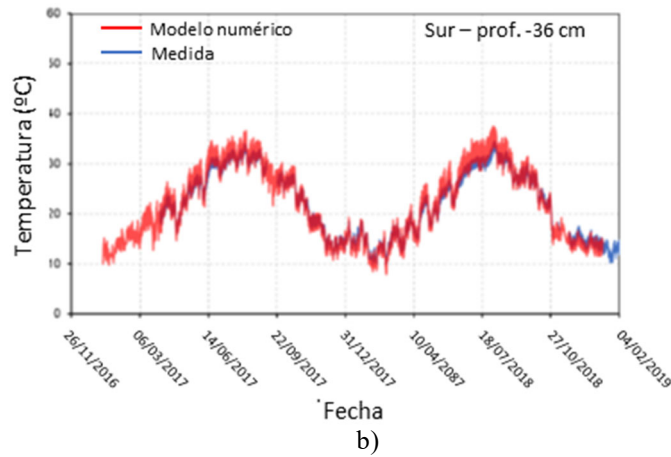
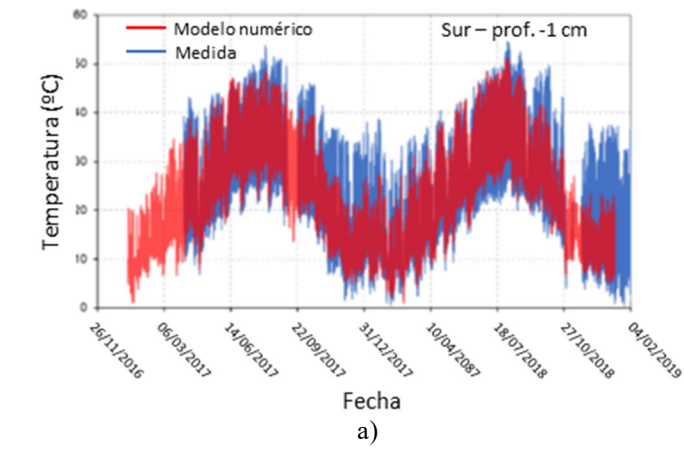


Figura 6 Evolución de la temperatura para la vertiente sur: a) 1 cm de profundidad; b) 36 cm de profundidad.

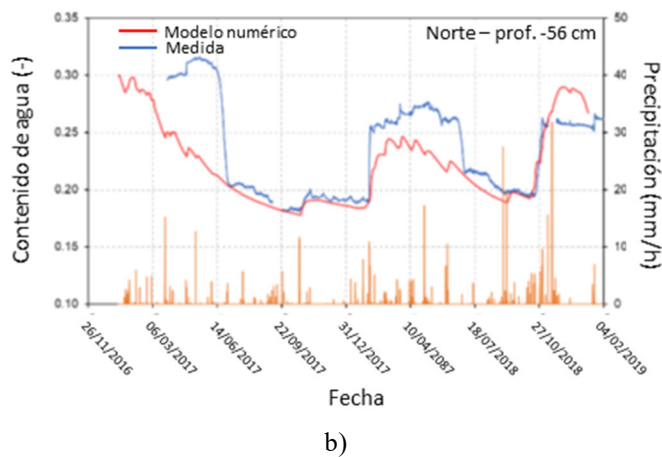
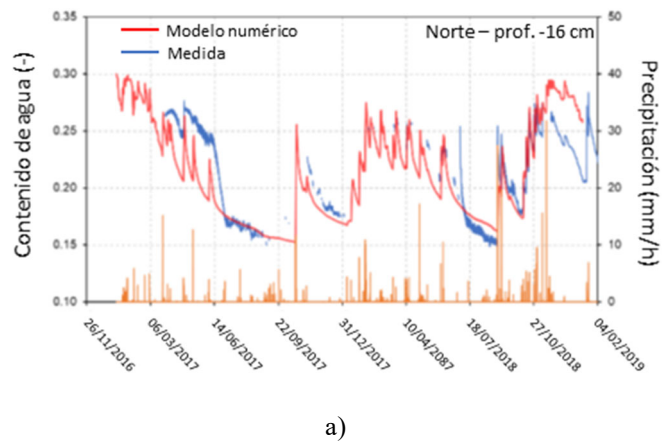


Figura 7 Evolución del contenido de agua para la vertiente norte a) 16 cm de profundidad b) 56 cm de

profundidad.

La Figura 7 y la Figura 8 muestran la evolución temporal del contenido de agua a diferentes profundidades (16 cm y 56 cm) para las laderas norte y sur, respectivamente. Se puede observar que el modelo numérico es capaz de reproducir relativamente bien la evolución medida del contenido de agua para ambos taludes, aunque el secado parece ser más rápido en el modelo que en el campo. Un aspecto interesante es el retraso y la atenuación con la profundidad del cambio en el contenido de agua durante las precipitaciones: a 16 cm, los cambios en el contenido de agua ocurren rápidamente en respuesta a los eventos de lluvia, incluso cuando son cortos, mientras que los cambios a 56/57 cm solo son causados por fuertes lluvias o largos periodos de precipitación.

El experimento y el modelo evidencian además de forma consistente que los valores del contenido de agua son más bajos en el lado sur que en el lado norte. Este efecto está directamente relacionado con las temperaturas más altas y la consiguiente mayor evaporación para la vertiente sur. Esto indica que, desde un punto de vista general, perfiles hídricos simétricos son poco esperables en terraplenes operativos. Esto puede tener consecuencias en términos de deformaciones inducidas por el clima en las infraestructuras terrestres.

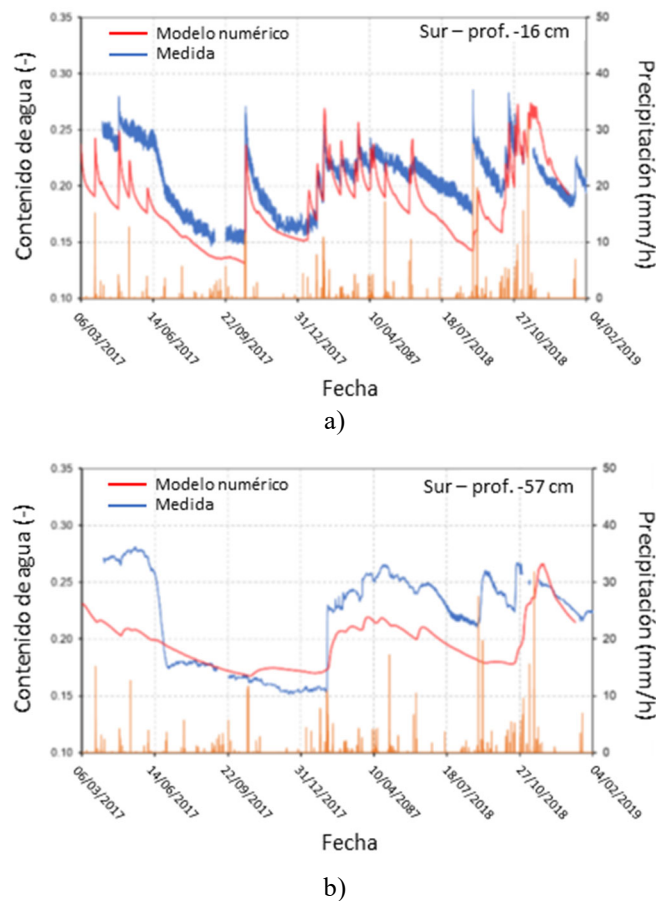


Figura 8 Evolución del contenido de agua para la pendiente norte: a) 16 cm de profundidad; b) 57 cm de profundidad.

Finalmente, la evolución temporal de las presiones de los líquidos se muestra en la Figura 9 y la Figura 10 para las pendientes norte y sur, respectivamente. Aunque el modelo reproduce bastante razonablemente la evolución general de la succión a las distintas profundidades del terraplén, la concordancia no es tan estrecha en cuanto a contenidos de agua. Actualmente es difícil analizar en detalle el motivo de las discrepancias, ya que se ha detectado que la respuesta de campo de los sensores de presión intersticial se retrasa en el tiempo con respecto a los sensores de contenido de agua. Se necesita más procesamiento de datos para obtener conclusiones preliminares. Sin

embargo, se espera que la histéresis en la curva de retención sea un fenómeno importante para explicar la evolución del tiempo de succión, ya que las succiones calculadas parecen ser más sensibles a las lluvias pequeñas que las mediciones (ver, por ejemplo, la evolución del tiempo durante el período comprendido entre diciembre de 2017 y julio de 2017). 2018), lo que sugiere que la tasa de cambios hídricos es diferente durante los procesos de secado y humidificación.

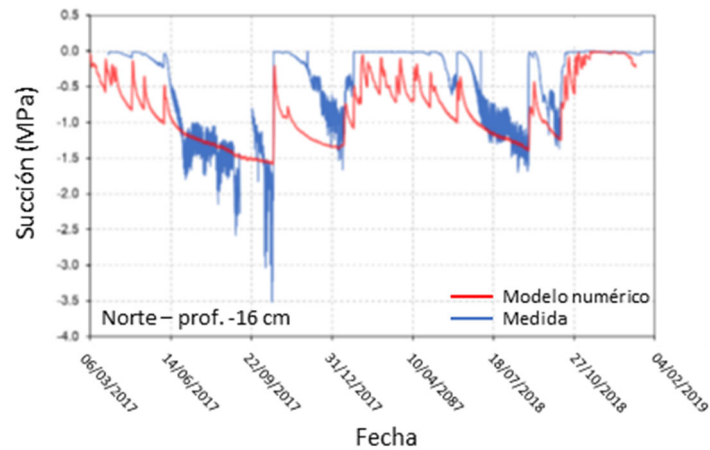


Figura 9 Evolución de la presión del líquido a 16 cm de profundidad en el talud sur.

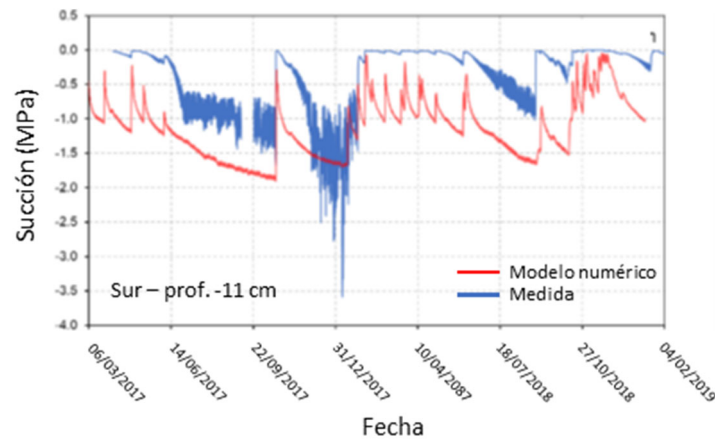


Figura 10 Evolución de la presión del líquido a 11 cm para talud norte.

5. CONCLUSIÓN

Comprender la respuesta de las laderas bajo las acciones atmosféricas es un aspecto clave para la evaluación y pronóstico de deslizamientos superficiales y pérdida de masa. Con el objetivo de tener más conocimientos sobre los mecanismos en la base de la interacción ISV, se ha procedido a la realización de un experimento de gran escala consistente en un terraplén instrumentado con taludes orientado norte y sur y sometido a sollicitaciones atmosféricas naturales.

Se ha propuesto un modelo numérico de elementos finitos para reproducir la respuesta observada en el terraplén experimental al cabo de dos años. El modelo numérico parece reproducir bien la evolución de la temperatura, el contenido de agua y la presión del líquido resultantes de las interacciones entre el terraplén y la atmósfera, y esto para diferentes orientaciones de taludes (norte y sur).

Este ejercicio permite, por un lado, validar el modelo numérico desarrollado. Por otro lado, proporciona una herramienta para interpretar los mecanismos en la base de la respuesta monitoreada durante el experimento a gran escala. En particular, ha puesto en evidencia el efecto del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la respuesta hidráulica del terraplén, la

asimetría introducida por este efecto en la distribución del contenido de agua dentro de la estructura de la tierra y la importancia de un procesamiento detallado de las mediciones de la presión del agua en presencia de efectos humectantes para tener en cuenta los retrasos en la respuesta instrumental.

AGRADECIMIENTOS

El estudio fue financiado por el proyecto de investigación nacional “Slope mass-wasting under climate change” (smucphy.upc.edu) otorgado por el Gobierno de España (número de referencia del proyecto BIA 2015-67500-R) y cofinanciado por AEI/FEDER, UE.

REFERENCIAS

- Blight, G. (2018) “Interactions between the atmosphere and the earth” *Géotechnique*, 47(4): 715–767, 1997.
- Casini, F., Vaunat, J., Romero, E. (2012) “Consequences on water retention properties of double porosity features in a compacted silt”, *Acta Geotechnica*, 7(2): 139-150.
- Guachizaca V, Villarraga C.J, Vaunat J., Lloret M., Saaltink M. "Water and heat fluxes in embankments under climatic". Workshop of Code_bright, CIMNE, Barcelona, Spain, 8 p; 2018.
- Guachizaca Contento V. F., “Análisis de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en un talud experimental,” Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain. 2018
- Noilhan J., Planton, S. “A simple parameterization of land surface processes for meteorological models” *Mon. Weather Rev.*, 17:536–549, 1989.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A. and Alonso, E. E. (1994) “Nonisothermal multiphase flow of brine and gas through saline media” *Transp. Porous Media*, 15(3): 271–293.
- Oorthuis, G. R. “Diseño de un experimento a gran escala para estudiar el efecto de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en laderas”, Master thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain. 2016
- Vaunat, J., Ruiz, D., Samat, S., Saaltink, M., Virely, D. (2017). “Soil-atmosphere interactions. Comprehensive modelling and practical rules”, JTC1 Workshop on Advances in Landslide Understanding, May 24 – 26, Barcelona, Spain.