

## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN TALUD A ESCALA REDUCIDA DURANTE MOJADO MEDIANTE IMÁGENES

Gerardo Morales (1), Núria M. Pinyol (1,2) y Antonio Lloret (1)

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universidad Politècnica de Catalunya (UPC)  
gerardo.morales@upc.edu  
nuria.pinyol@upc.edu  
antonio.lloret@upc.edu

<sup>(2)</sup> Centre Internacional de Metodes Numerics en Enginyeria (CIMNE)

### RESUMEN

*El avance del conocimiento del comportamiento de taludes parcialmente saturados no solo requiere de la aplicación de modelos analíticos y numéricos, también requiere de modelos físicos. En esta área, el uso de modelos en escala reducida permite la visualización de aspectos clave como la rotura, desplazamientos y deformaciones. Para ello, existen diversos métodos de medición de los parámetros de interés. Adicionalmente al uso de sensores convencionales, las técnicas basadas en el análisis de imágenes digitales permiten medir velocidades y desplazamientos con ciertas ventajas. Recientemente se ha propuesto una metodología innovadora para medir el grado de saturación en muestras de suelo mediante el análisis de imágenes infrarrojas. El presente trabajo utiliza técnicas basadas en imágenes para evaluar el comportamiento de un talud a escala reducida durante el mojado. El artículo describe la metodología paso a paso incluyendo el sistema de cámaras e iluminación, la elaboración de la muestra, la adquisición de imágenes y el análisis de las mismas. Las técnicas utilizadas permiten observar los desplazamientos acumulados, velocidades y cambios en el grado de saturación asociados al proceso de mojado. Los resultados obtenidos mediante análisis de imágenes muestran concordancia con los parámetros obtenidos en mediciones puntuales con sensores convencionales.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la mecánica de suelos, los deslizamientos son un campo ampliamente estudiado debido a sus consecuencias, entre las cuales usualmente se pueden observar afectaciones a infraestructura, pérdidas económicas y en algunos casos pérdidas de vidas humanas. La estabilidad de un talud, usualmente descrita mediante la determinación de un factor de seguridad, se relaciona directamente con la resistencia del terreno que es altamente dependiente del nivel de succión (Bishop & Blight, 1963; Bishop & Morgenstern, 1960; Fredlund *et al.*, 1978). Por este motivo resulta crítico comprender los procesos de mojado y secado del suelo. Esto es especialmente relevante cuando se estudian deslizamientos inducidos por lluvia, en los cuales la infiltración disminuye las succiones en el terreno y a su vez reducen la resistencia del suelo.

En este sentido, los trabajos experimentales que involucran modelos físicos aportan un enfoque realista de lo que pasa en el terreno. Por ejemplo, el estudio de un talud natural realizado por Springman *et al.* (2013) demuestra la influencia climática y de la lluvia estacional en el factor de seguridad global de dicho talud, para ello se analiza la data de tensiómetros, sensores tipo TDR, piezómetros y demás aparatos instalados a profundidades previamente definidas. Otro ejemplo se puede encontrar en los ensayos realizados por Olivares *et al.* (2009) en el cual se investiga, mediante

un modelo ensayado en un canal de prueba, la mecánica de deslizamientos tipo flujo inducidos por lluvia en un material granular no saturado, en este caso se utilizaron tensiómetros, sensores tipo TDR y transductores de presión de poro para levantar los datos relevantes al mojado, mientras que para el análisis de deformaciones se utilizaron sensores laser y técnicas de correlación basadas en imágenes digitales, específicamente el *Particle Image Velocimetry*.

Evidentemente el levantamiento de datos es fundamental para el análisis de este tipo de problemas, en especial cuando su estudio se realiza desde un enfoque experimental. Para el levantamiento de datos es usual encontrar sistemas de instrumentación basados en el uso de sensores convencionales debido a la diversidad de mediciones que se pueden realizar (contenido de agua, succión, presión de poro, desplazamiento lineal, fuerza y otros), sin embargo presentan algunas limitaciones. Por ejemplo, la instalación y ubicación de los sensores no es trivial ya que depende de la respuesta esperada de un ensayo particular. Adicionalmente, en modelos físicos de pequeña escala, se pueden introducir alteraciones al ensayo debido a la relación de tamaños que existe entre el sensor y el modelo, que en algunos casos puede llegar a ser tal que la presencia del sensor representa la introducción de una “estructura” en el modelo a pequeña escala, alterando así la respuesta mecánica del modelo físico. Debido a las limitaciones anteriormente mencionadas y a la creciente complejidad en ensayos de laboratorio en escala reducida, los sistemas de instrumentación y adquisición de datos requieren de una continua mejora y modernización, en este aspecto, el uso de técnicas de correlación de imágenes digitales se ha extendido dentro de la comunidad científica para la medición de parámetros de manera continua y no invasiva. En la actualidad existen códigos que permiten la medición de deformaciones y desplazamientos en experimentos geotécnicos (Pinyol & Alvarado, 2017; Stanier *et al.*, 2016; Thielicke & Stamhuis, 2014) basados en el análisis de imágenes consecutivas. Más recientemente, Parera *et al.* (2021) proponen una metodología innovadora que permite la medición de grados de saturación en muestras de suelo mediante el uso de imágenes infrarrojas en el rango SWIR del espectro electromagnético.

El presente artículo expone el estudio de un ensayo de laboratorio a escala reducida 1g. El modelo físico desarrollado corresponde a una presa de tierra sometida al incremento de nivel freático aguas arriba. El comportamiento del modelo ha sido analizado mediante técnicas basadas en imágenes digitales. Imágenes en el rango visual son utilizadas para analizar las deformaciones y desplazamientos con la técnica PIV-NP, mientras que la variación en el grado de saturación se determina a partir de imágenes infrarrojas en el rango SWIR del espectro electromagnético. Adicionalmente, se colocan sensores de humedad en el modelo para validar los resultados obtenidos a partir de las imágenes infrarrojas.

## **2. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES**

### **2.1. TÉCNICAS PIV Y PIV-NP**

En el campo experimental se ha implementado y mejorado el uso de técnicas de medición basadas en imágenes debido a que, en comparación con los sensores convencionales, ofrecen la ventaja de medir datos de manera continua, no invasiva y en toda la superficie del experimento. Por ejemplo, el *Particle Image Velocimetry* (PIV) propuesto por Adrian (1991) en el área experimental de la mecánica de fluidos, ha sido implementado de manera satisfactoria para el cálculo de desplazamientos y deformaciones en experimentos geotécnicos a través de códigos abiertos como PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014) y GeoPIV-RG (Stanier *et al.*, 2016).

El método PIV calcula el desplazamiento a nivel de píxeles que se da entre imágenes subsecuentes. Para ello divide un fotograma inicial (imagen de referencia) en porciones denominadas *subsets* y detecta los píxeles que forman cada porción, posteriormente cada subset se localiza en el fotograma consecutivo (imagen objetivo) mediante algoritmos de búsqueda. Al aplicar una calibración definiendo referencias de distancia real e intervalos de tiempo entre fotogramas, se logra obtener vectores de velocidad, desplazamiento y deformaciones unitarias en puntos de referencia fijos ubicados en el centro de cada subset. Por otro lado, Pinyol & Alvarado (2017) han propuesto la técnica PIV-NP para capturar otros aspectos interesantes del movimiento como los desplazamientos acumulados, velocidades, aceleraciones y deformaciones en partículas numéricas (NP) que

representan porciones del material observado. El PIV-NP realiza un post proceso de los resultados del PIV obtenidos mediante un enfoque Euleriano con puntos de referencia fijos en el espacio e incorpora un enfoque Lagrangiano que permite realizar un seguimiento de las partículas numéricas en puntos de referencia que se desplazan con el material, lo cual resulta conveniente para el estudio de problemas de grandes deformaciones.

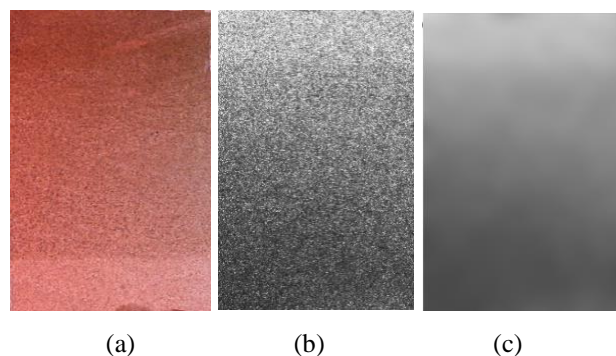
## 2.2. METODOLOGÍA SWIR-SR

Más recientemente, Parera *et al.* (2021) proponen una metodología para medir grados de saturación en muestras de suelo que se fundamenta en la interacción reflectancia/absorción de la luz con respecto a moléculas de agua. La metodología, denominada SWIR-SR en este artículo, tiene como objetivo la medición del grado de saturación a partir de imágenes tomadas en el rango infrarrojo SWIR.

Inicialmente, se requiere una curva de calibración que correlacione el grado de saturación de una muestra de suelo con su reflectancia, cuantificada mediante el valor de gris de las imágenes infrarrojas. Se debe considerar que la reflectancia es función de variables relacionadas al suelo (composición mineralógica, granulometría, porosidad, densidad), presencia de agua (grado de saturación, contenido de agua) y cantidad de luz incidente (intensidad de luz), por lo cual es importante que durante todo el proceso exista una intensidad de luz constante y uniforme.

Los trabajos de Knadel *et al.* (2014), Nolet *et al.* (2014), Parera (2019) y Parera *et al.* (2021) han demostrado que la absorción de luz en muestras de arena tiene mayor sensibilidad en el rango espectral de 1400-1550 nm y 1850-2050 nm. Por ello, para la aplicación de la metodología SWIR-SR se requiere de una fuente de iluminación que emita en ese rango y una cámara digital cuyo sensor funcione en el espectro infrarrojo. Idealmente se debe considerar un sensor que presente alta sensibilidad en el rango espectral mencionado.

El método SWIR-SR trabaja con información a nivel de pixel, por ello, la calidad de la imagen juega un rol de gran importancia para la aplicación del método. Por otro lado, en las imágenes infrarrojas puede existir contrastes importantes a nivel de pixel, generados por factores como la distribución granulométrica, la mineralogía o ruido de tipo sal-pimienta en el sensor de la cámara. Para corregir esto, Parera *et al.* (2021) proponen realizar un promedio pesado mediante la aplicación de un filtro de Gauss a la imagen, de modo que se pueda uniformizar el valor de gris para que sea representativo, no solamente de un píxel específico sino del área que rodea a dicho píxel (Fig. 1).



**Figura 1.** (a) Imagen en el rango visual, (b) en rango SWIR y (c) después de aplicar un filtro de Gauss en imágenes de una columna de arena de Castelldefels. (Parera *et al.*, 2021)

Para tomar en cuenta la variación en las condiciones de iluminación entre experimentos, la metodología plantea la normalización del valor de gris como se detalla en la Ec.1. Finalmente, se construye una curva de calibración *grado de saturación vs valor de gris normalizado*, aplicable a experimentos con distintas condiciones de iluminación, siempre que la iluminación sea uniforme durante cada ensayo.

$$GV_{norm} = \frac{GV - GV_{seco}}{GV_{sat} - GV_{seco}} \quad (1)$$

Por último, Parera *et al.* (2021) evaluaron el rol de la relación de vacíos en la reflectancia SWIR. Para esto se evaluaron muestras preparadas a un mismo contenido de agua, pero con diferente grado de saturación controlando el volumen de cada muestra. Sus resultados demuestran que la reflectancia no es controlada por el contenido de agua sino por el grado de saturación del suelo.

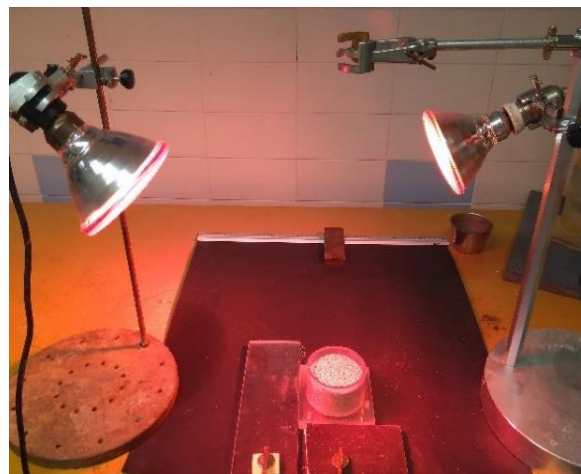
### 3. ENSAYO A ESCALA 1G

#### 3.1. SUELO UTILIZADO

El suelo seleccionado es una arena fina de playa (Castelldefels, Cataluña, España). La Tabla 1 indica las propiedades del material. La curva de calibración *grado de saturación vs valor de gris normalizado* para este material es definida por Parera *et al.* (2021). Para ello, se prepararon muestras cilíndricas de 3.6 cm de altura y 7.1 cm de diámetro a una densidad seca de  $1.390 \text{ g/cm}^3$  con diferentes grados de saturación. Para asegurar que las muestras fueran sometidas a la misma intensidad de luz, los cilindros se ubicaron e iluminaron desde una posición fija con bombillas infrarrojas de 175W (Fig. 2). Para la captura de las imágenes en infrarrojo se utilizó la cámara CamIR de Scintacor, que cuenta con un sensor (Sony ICX445 1/3") sometido a un tratamiento de fósforo capaz de ofrecer picos de sensibilidad espectral en longitudes de onda de 1512 nm y 1540 nm.

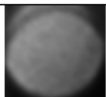
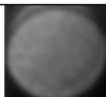
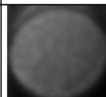
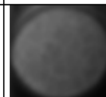
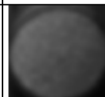
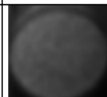
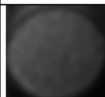
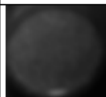

Densidad de las partículas	[g/cm <sup>3</sup> ]	2.665
Densidad seca (min – max)	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.442 – 1.795
Porosidad (max – min)	-	0.459 – 0.326
Granulometría		
D10		0.254
D30	[mm]	0.311
D60		0.372
Permeabilidad saturada a una porosidad de 0.4	[m/s]	$2 \cdot 10^{-4}$

**Tabla 1.** Propiedades de la arena ensayada.



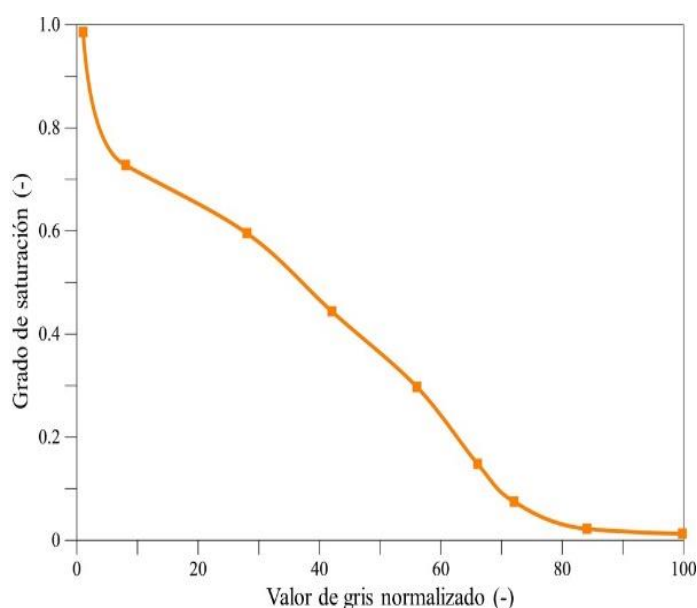
**Figura 2.** Muestra para la obtención de la curva de calibración. (Parera *et al.*, 2021)

Según Parera *et al.* (2021), las imágenes infrarrojas capturadas tendrán ruido debido a factores como la textura del suelo, los distintos colores de los granos y el tratamiento de fósforo aplicado al sensor de la cámara. Este ruido implica que el valor de gris de un pixel individual no sea representativo de la reflectancia general de un área de interés, y para corregirlo, se aplica un filtro de Gauss de modo que se obtenga un promedio pesado de los pixeles en el área de interés. La Tabla 2 presenta el contenido de agua, grado de saturación y el valor de gris una vez aplicado el filtro de Gauss a las muestras.

Contenido de agua (%)	0	0.73	2.63	5.26	10.53	15.79	21.05	26.35	30.00
Grado de saturación (%)	0	2	7	15	30	44	60	73	100
									
Intensidad de gris	104	92	86	83	78	71	64	54	52

**Tabla 2.** Valor de gris e imágenes infrarrojas filtradas de muestras analizadas con diferente contenido de agua y grado de saturación e igual densidad seca (Parera *et al.*, 2021).

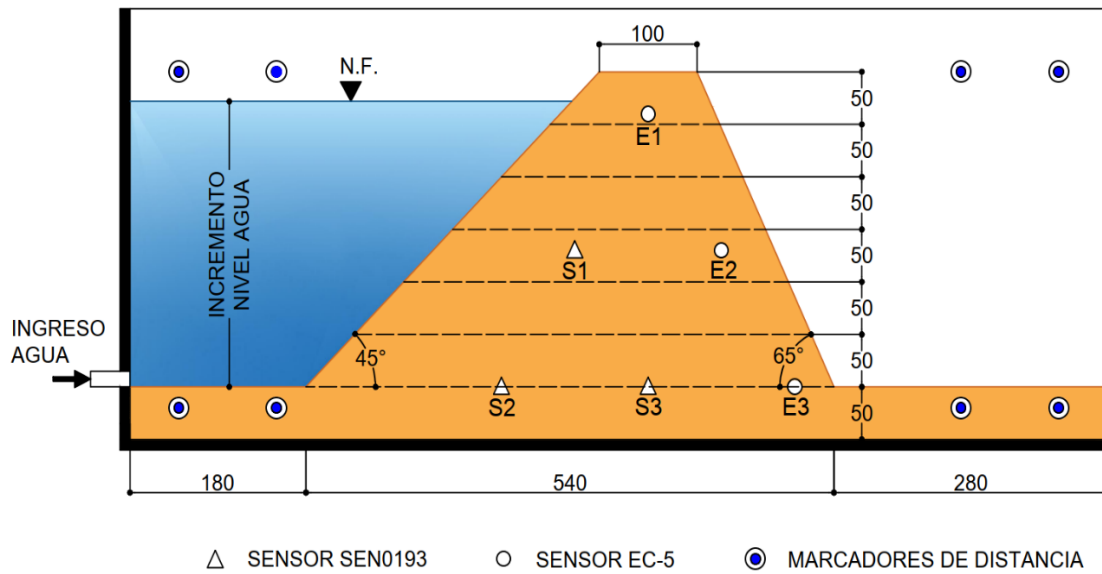
Para considerar factores ajenos al suelo que modifiquen las condiciones de iluminación (como puede ser la adición o sustracción de bombillas emisoras en el rango SWIR y variaciones de tensión eléctrica durante un experimento), se realiza una normalización del valor de gris con respecto a su valor máximo (seco) y mínimo (saturado). La Figura 3 muestra la curva de correlación entre grado de saturación y valor de gris normalizado para arena de Castelldefels.



**Figura 3.** Curva de calibración valor de gris normalizado vs grado de saturación. (Parera *et al.*, 2021)

### 3.2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

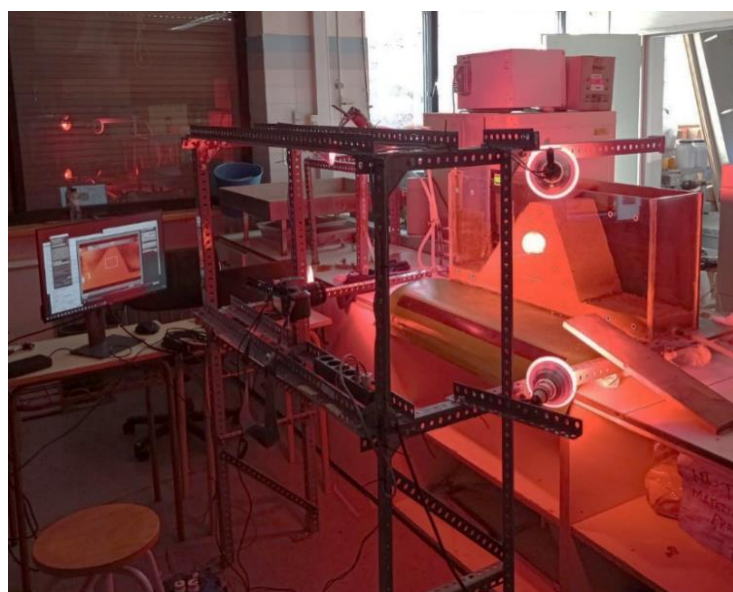
El caso estudiado consiste en la evaluación del proceso de mojado de una presa elaborada con la arena fina de playa de Castelldefels, descrita en el punto anterior, mediante imágenes en infrarrojo en el rango SWIR. El experimento fue llevado a cabo en un tanque transparente de 1000 mm de largo, 400 mm de altura y 200 mm de espesor. Todas las paredes del tanque son de metacrilato a excepción de la pared frontal que es de vidrio y en la cual se colocaron ocho marcadores de distancia para su uso como referencia. El proceso de mojado fue realizado mediante el ingreso de agua de manera lateral, para ello se colocó un tubo ranurado en la pared lateral del tanque transparente a la altura de la base de la presa y se controló la velocidad del flujo de modo que el nivel freático aumentase a una velocidad aproximada de 17 mm/min. El modelo de la presa tiene altura una de 300 mm, su base tiene un ancho de 540 mm y la corona 100 mm, el talud aguas arriba es de 45° mientras el talud aguas abajo tiene mayor pendiente con 65°. La Figura 4 muestra el esquema del modelo.



**Figura 4.** Esquema del modelo ensayado.

El modelo fue construido mediante apisonamiento húmedo en capas, para lo cual previamente se demarcó la geometría del modelo con cinta de enmascarar en la ventana frontal del tanque transparente. El material fue preparado con un contenido de agua de 5% y fue depositado y apisonado en 7 capas de 50 mm de. Durante la construcción del modelo se cuantificó la masa depositada en cada capa, la densidad promedio obtenida fue de  $1.42 \text{ g/cm}^3$ .

Para la captura de las imágenes en infrarrojo se utilizó la cámara CamIR de Scintacor descrita anteriormente. Las imágenes fueron tomadas en modo video con resolución de  $640 \times 480$  píxeles a una velocidad de 30 fps. La iluminación del experimento empleó cinco bombillas de luz infrarroja de 175W, colocadas en posiciones fijas que permitieron obtener una iluminación uniforme en la superficie de la muestra. Una alternativa a las bombillas infrarrojas para la emisión de rayos SWIR puede ser la luz solar, sin embargo, su uso no es recomendado debido a la falta de control en la intensidad de luz, especialmente en ensayos de larga duración. Durante el experimento también se utilizó una cámara Canon EOS 600D en modo video con una resolución de  $1280 \times 1024$  píxeles a una velocidad de 30 fps. Los fotogramas en el rango visual fueron empleados para analizar desplazamientos y velocidades de la muestra durante el ensayo. La Figura 5 muestra la configuración del experimento realizado.

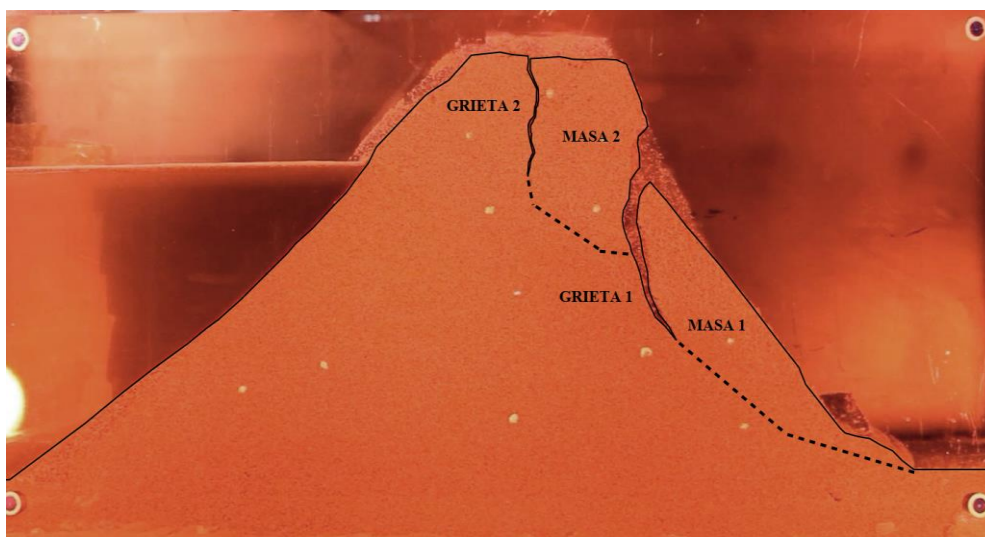


**Figura 5.** Configuración general del ensayo.

Los resultados de grado de saturación obtenidos mediante imágenes infrarrojas fueron comparados con mediciones obtenidas por seis sensores de humedad capacitivos (tres sensores SKU:SEN0193 de DFRobot y tres sensores EC-5 de Meter). La ubicación de los sensores se muestra en la Figura 4. Los sensores de humedad capacitivos no miden de manera directa el contenido de agua del suelo sino los cambios en su constante dieléctrica, la cual es afectada principalmente por la presencia de agua. Para su uso, los sensores fueron previamente calibrados tomando las lecturas correspondientes a muestras con distintos contenidos de agua.

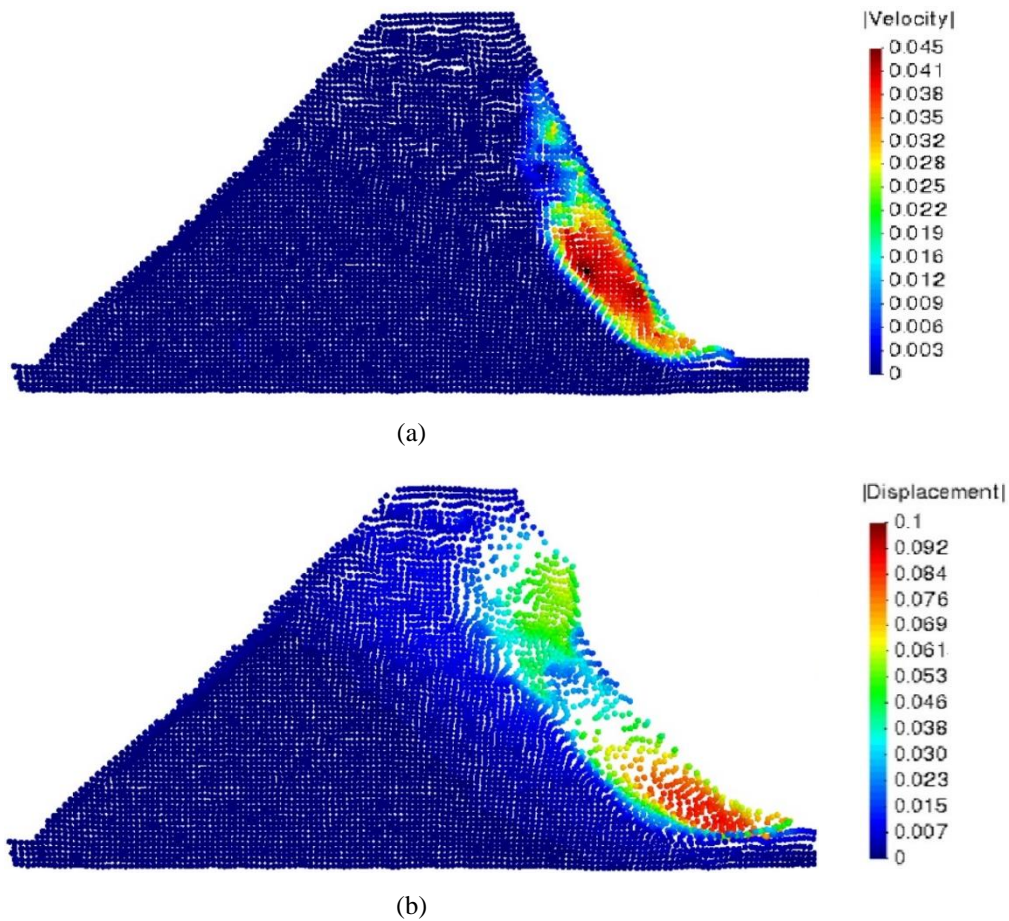
#### 4. DESPLAZAMIENTOS Y VELOCIDADES

Para el análisis de desplazamientos y velocidades se utilizó la técnica PIV-NP. Los fotogramas analizados fueron extraídos del video en el rango visual. El análisis utiliza un total de 897 fotogramas, para el análisis se determinó una velocidad de fotogramas de 1 Hz (1 fps), a excepción del inicio de la rotura para el cual se utilizó una velocidad de 30 Hz (30 fps) por ser un proceso más rápido. Inicialmente, las imágenes capturadas en el rango visual brindan información que ayuda a describir la rotura observada. Por ejemplo, se puede determinar que la rotura se activó cuando el nivel de agua alcanzó una altura de 205 mm medida desde la base de la presa. Durante el proceso se logra determinar la aparición dos grietas que coincidieron con la ubicación de los sensores E2 y E1, a los 723 y 768 segundos de ensayo respectivamente. Por otro lado, las grietas delimitaron dos masas que se desplazaron de manera independiente durante el proceso de rotura (Figura 6). La primera de ellas, determinada por la grieta 1, aceleró inmediatamente después de la aparición de la grieta. Por su parte, la segunda masa mostro una velocidad menor durante el ensayo. Al finalizar el ensayo se midió el desplazamiento horizontal del pie del talud de 87 mm.



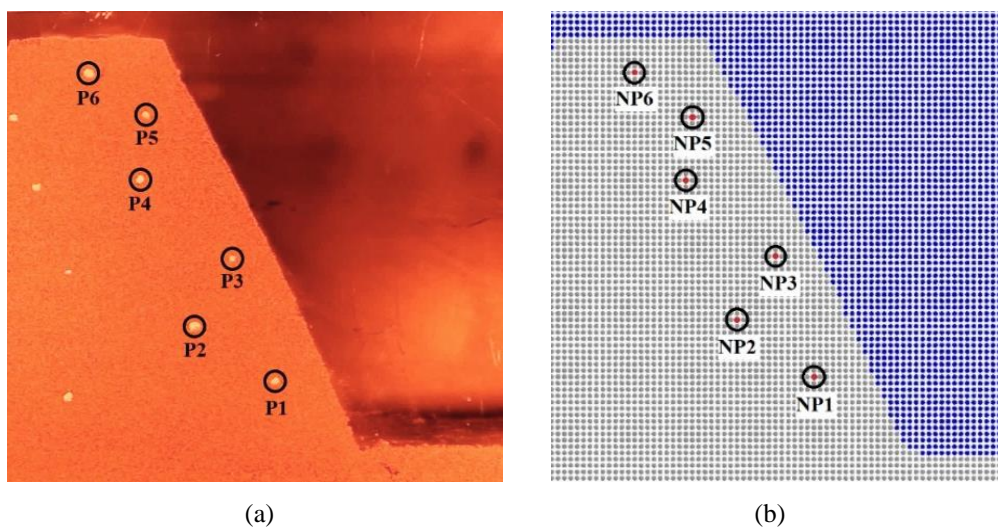
**Figura 6.** Geometría de la rotura de la muestra.

El análisis secuencial de imágenes mediante la técnica PIV-NP valida la mecánica de la rotura descrita anteriormente y permite profundizar en la interpretación de los resultados. La Figura 7(a) muestra resultados a los 723.167 segundos del ensayo, la posición deformada de las partículas numéricas en conjunto con el mapa de velocidades corrobora que la delimitación de primera de las masas inestables coincide con la aparición de la grieta 1. La velocidad máxima calculada fue de 45.3 mm/s, siendo la más alta registrada durante todo el ensayo. Por su lado, la Figura 7(b) muestra los resultados al finalizar el ensayo, se puede observar claramente las partículas numéricas que forman ambas masas inestables. El desplazamiento máximo acumulado es de 88.5 mm y se da en partículas de la primera masa inestable. Las partículas numéricas que se encuentran suspendidas se dan por errores de cálculo asociados a partículas reales de suelo que se adhieren a la ventana transparente durante el ensayo (Fig. 6).

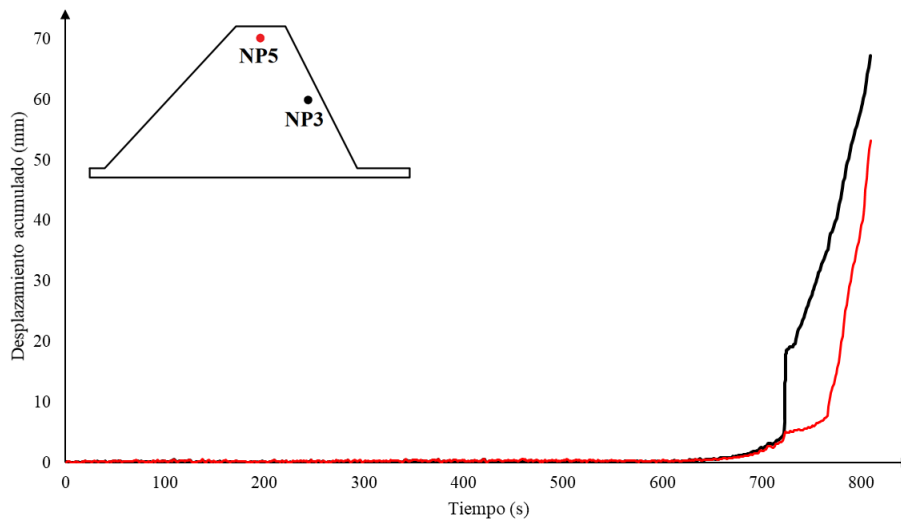


**Figura 7.** Resultados PIV-NP. (a) Mapa de velocidades en  $t = 723.167$  s, y (b) mapa de desplazamientos acumulados al final del ensayo.

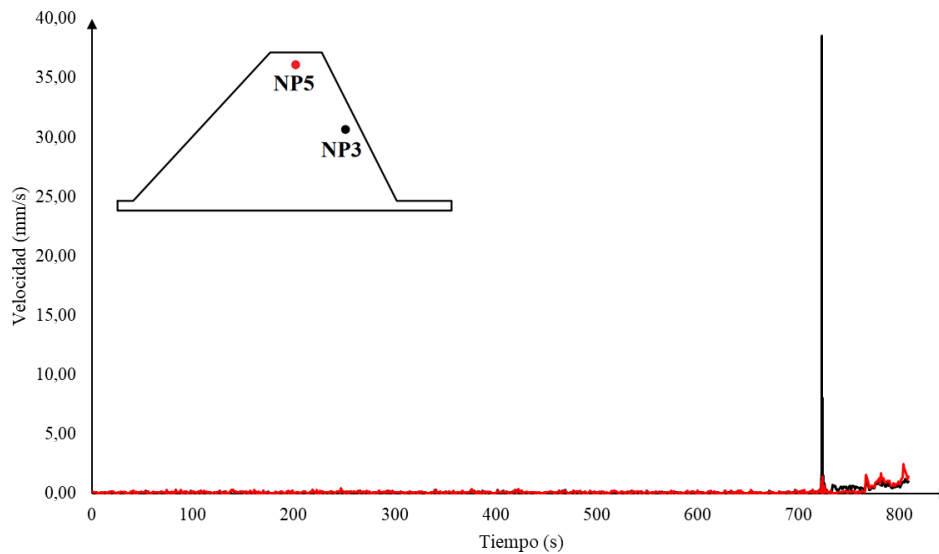
Dentro de la muestra fueron incluidos trazadores representados por partículas (P) de color blanco, los resultados del PIV-NP son evaluados seleccionando las partículas numéricas (NP) correspondientes a los trazadores colocados en la muestra (Fig. 8). La partícula NP3, localizada en la primera masa inestable, llega a una velocidad máxima de 38.6 mm/s a los 723.2 segundos, su desplazamiento acumulado es de 66.3 mm. Por otro lado, la partícula NP5 ubicada en la segunda masa inestable, tiene un desplazamiento acumulado de 53.3 mm y una velocidad máxima de 2.5 mm/s.







(c)



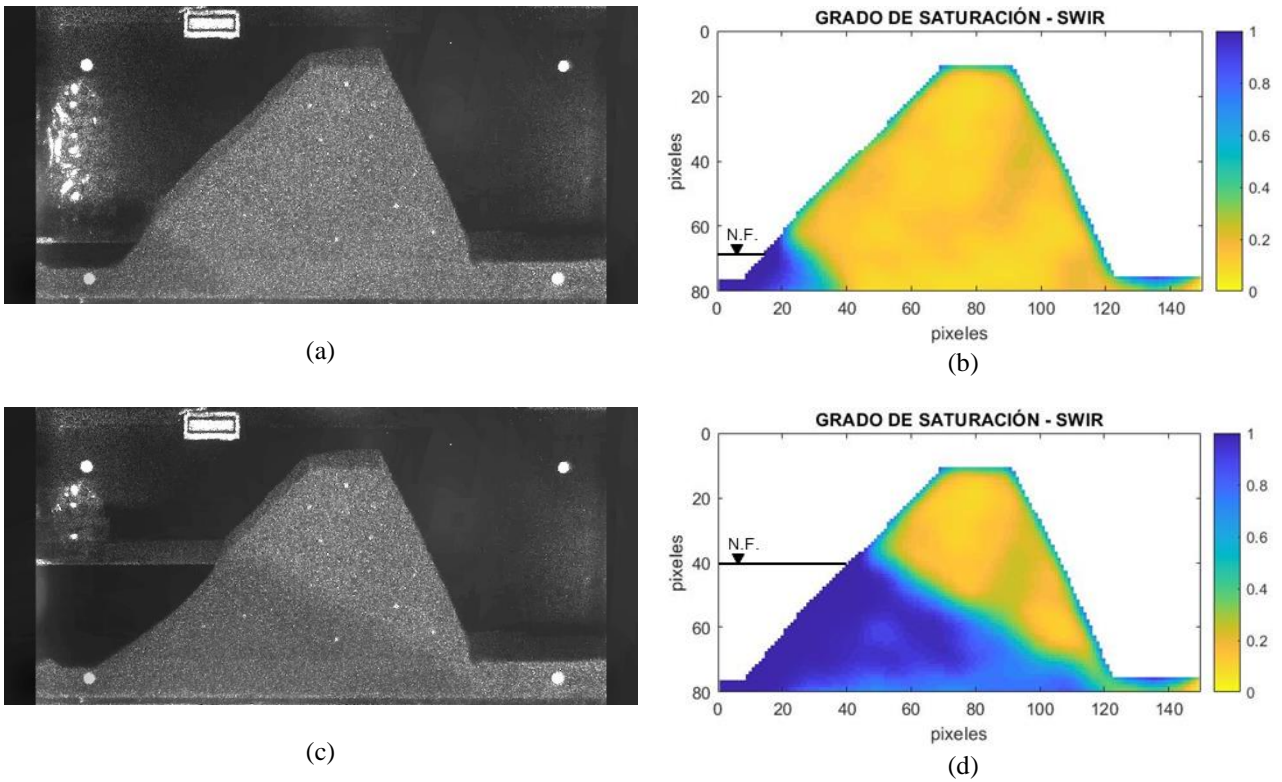
(d)

**Figura 8.** (a) Trazadores colocados en la muestra. (b) Partículas numéricas en el PIV-NP, localizadas en puntos correspondientes a los trazadores físicos. (c) Desplazamiento acumulado de las partículas numéricas NP3 y NP5 durante el ensayo. (d) Velocidad de las partículas numéricas NP3 y NP5 durante el ensayo.

## 5. GRADO DE SATURACIÓN

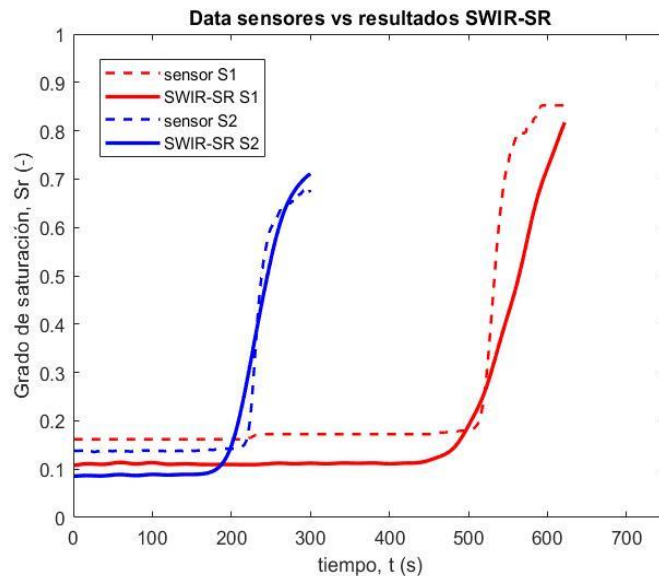
El proceso de mojado tuvo una duración de 723 segundos, posterior a esto se dio la rotura. Para el análisis SWIR-SR se utilizó 723 fotogramas a una frecuencia de 1 Hz (1 fps) extraídos del video tomado con la cámara infrarroja. La Figura 9 presenta una comparación gráfica entre las imágenes en infrarrojo y los resultados obtenidos mediante la metodología SWIR-SR para 180 y 540 segundos.

La metodología SWIR-SR permite calcular el grado de saturación en todo el dominio del experimento a través de una matriz de resultados en coordenadas pixel o en coordenadas reales, para lo cual se requiere incluir marcadores de referencia con distancia conocida en la ventana transparente del modelo. En la Figura 9 la matriz de resultados se muestra de manera gráfica para permitir una interpretación cualitativa y cuantitativa, se puede observar que los resultados gráficos del SWIR-SR hacen posible la interpretación del avance del frente de saturación y de la zona capilar, lo cual representa una ventaja para el estudio experimental de flujo en medios parcialmente saturados y procesos hidro-mecánicos como pueden ser roturas asociadas a la degradación de la resistencia por pérdidas de succión durante procesos de mojado.



**Figura 9.** (a) Imagen infrarroja en  $t = 180$  s. (b) Resultados SWIR-SR en  $t = 180$  s. (c) Imagen infrarroja en  $t = 540$  s. (d) Resultados SWIR-SR en  $t = 540$  s.

Para evaluar la validez de los resultados, se compara los valores de grado de saturación medidos en puntos fijos a partir de las imágenes infrarrojas, con el valor medido en los sensores de humedad capacitivos instalados en el modelo. Las lecturas de los sensores y los resultados obtenidos con imágenes se comparan para un intervalo de tiempo que comprende desde el inicio del experimento hasta la llegada del frente de saturación a la posición de cada sensor. La Figura 10 muestra la comparación para algunos de los sensores instalados. Durante el proceso de mojado, el frente de saturación solo alcanza la posición de los sensores S1, S2, S3 y E3. Las lecturas de los sensores concuerdan con los valores de grado de saturación obtenidos con imágenes. Se puede observar que los resultados se ajustan de manera adecuada a las medidas tomadas con los sensores.



**Figura 10.** Validación de método SWIR-SR. Comparación entre mediciones con imágenes infrarrojas y mediciones con sensores.

## 6. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

En este artículo se presenta el uso de imágenes para evaluar el comportamiento de un experimento a escala reducida en laboratorio de manera continua, no invasiva y en toda la superficie del ensayo. El análisis emplea la técnica PIV-NP (Pinyol & Alvarado, 2017) para calcular las velocidades y los desplazamientos acumulados mediante imágenes capturadas en el rango visual. Para determinar los cambios en el grado de saturación de la muestra se aplica la metodología SWIR-SR (Parera *et al.*, 2021) que emplea imágenes infrarrojas. El método es aplicado para la evaluación del proceso de mojado de una presa de arena fina de playa.

En el artículo se detalla la metodología experimental, incluyendo las propiedades del material ensayado y su calibración, el sistema de cámaras e iluminación, el proceso de construcción de la muestra y el uso de sensores de humedad para validar el grado de saturación obtenido mediante el SWIR-SR.

Los resultados obtenidos con la técnica PIV-NP aportan información de valor para describir la geometría de la rotura y permiten calcular las velocidades y desplazamientos acumulados a lo largo del ensayo. En el artículo se presenta la evolución de dos partículas numéricas (NP) a lo largo del ensayo. La partícula NP3 presenta un incremento súbito del desplazamiento a los 723.2 segundos del ensayo, en ese instante, su velocidad es de 38.6 mm/s siendo la máxima registrada para esa partícula a lo largo del ensayo. Por su parte, la metodología SWIR-SR ayuda a evaluar el proceso de mojado de la presa, ya que se logra la medición del grado de saturación en toda la superficie de la muestra y su evolución durante el mojado.

Para evaluar la validez de los resultados, se comparan mediciones puntuales de seis sensores de humedad con los resultados de grado de saturación obtenidos con la metodología SWIR-SR en puntos fijos correspondientes a la localización de cada sensor. Los resultados obtenidos con imágenes se ajustan a las mediciones de los sensores (Fig. 10).

El uso de imágenes digitales para la evaluación de experimentos a pequeña escala proporciona mediciones continuas, no invasivas y en toda la superficie del ensayo, lo que representa una ventaja con respecto al uso de sensores. A pesar de esto, durante su aplicación, pueden encontrarse algunas limitaciones que pueden llevar a resultados erróneos. Por ejemplo, en el ensayo presentado, las partículas de arena que se adhieren a la ventana transparente impiden el cálculo correcto de los desplazamientos a nivel de píxel en algunas zonas del experimento.

Por otra parte, en el ambiente de laboratorio se pueden esperar múltiples factores externos capaces de alterar el valor de gris de imágenes infrarrojas, algunos de ellos pueden ser la distribución no uniforme de la luz en la muestra debido al tipo de lámparas infrarrojas y los cambios en la intensidad de luz generadas por fluctuaciones de tensión eléctrica durante el ensayo. La presencia de materiales externos alrededor del experimento también puede influir en el valor de gris de las imágenes infrarrojas ya que puede alterar la reflectancia que percibe el sensor de la cámara. Estos factores deben ser considerados antes de la aplicación de la metodología SWIR-SR.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero a CIMNE proporcionada por el programa CERCA / Generalitat de Catalunya, la asistencia de la comunidad de investigación MPM y el equipo de desarrollo de software de Anura3D.

El segundo autor, como profesor Lector Serra Hünter, agradece la financiación del Departament de Recerca i Universitats de la Generalitat de Catalunya.

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i RTI2018-097365-B- financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, “FEDER Una manera de hacer Europa”.

## REFERENCIAS

- Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23(1), 261–304. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.001401>
- Bishop, A. W., & Blight, G. E. (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique*, 13(3), 177–197. <https://doi.org/10.1680/geot.1963.13.3.177>
- Bishop, A. W., & Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10(4), 129–153. <https://doi.org/10.1680/geot.1960.10.4.129>
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313–321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- Knadel, M., Deng, F., Alinejadian, A., Wollesen de Jonge, L., Moldrup, P., & Greve, M. H. (2014). The Effects of Moisture Conditions-From Wet to Hyper dry-On Visible Near-Infrared Spectra of Danish Reference Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 422–433. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0401>
- Nolet, C., Poortinga, A., Roosjen, P., Bartholomeus, H., & Ruessink, G. (2014). Measuring and modeling the effect of surface moisture on the spectral reflectance of coastal beach sand. *PLoS ONE*, 9(11), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112151>
- Olivares, L., Damiano, E., Greco, R., Zeni, L., Picarelli, L., Minardo, A., Guida, A., & Bernini, R. (2009). An instrumented flume to investigate the mechanics of rainfall-induced landslides in unsaturated granular soils. *Geotechnical Testing Journal*, 32(2), 108–118.
- Parera, F. (2019). Advanced image analysis techniques for laboratory experiments on soils. *Ph.D. Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya*. <https://futur.upc.edu/27839677>
- Parera, F., Pinyol, N. M., & Alonso, E. E. (2021). Massive, continuous, and non-invasive surface measurement of degree of saturation by shortwave infrared images. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(6), 749–762. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0051>
- Parera, F., Pinyol, N. M., & Alonso, E. E. (2021). Massive, continuous, and non-invasive surface measurement of degree of saturation by shortwave infrared images. *Canadian Geotechnical Journal*, 58(6), 749–762. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0051>
- Pinyol, N.M., & Alvarado, M. (2017). Novel analysis for large strains based on particle image velocimetry. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 933–944. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0327>
- Pinyol, N.M., & Alvarado, M. (2017). Novel analysis for large strains based on particle image velocimetry. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(7), 933–944. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0327>
- Springman, S. M., Thielen, A., Kienzler, P., & Friedel, S. (2013). A long-term field study for the investigation of rainfall-induced landslides. *Geotechnique*, 63(14), 1177–1193. <https://doi.org/10.1680/geot.11.P.142>
- Stanier, S. A., Blaber, J., Take, W. A., & White, D. J. (2016). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(5), 727–739. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0253>
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2. <https://doi.org/10.5334/jors.bl>