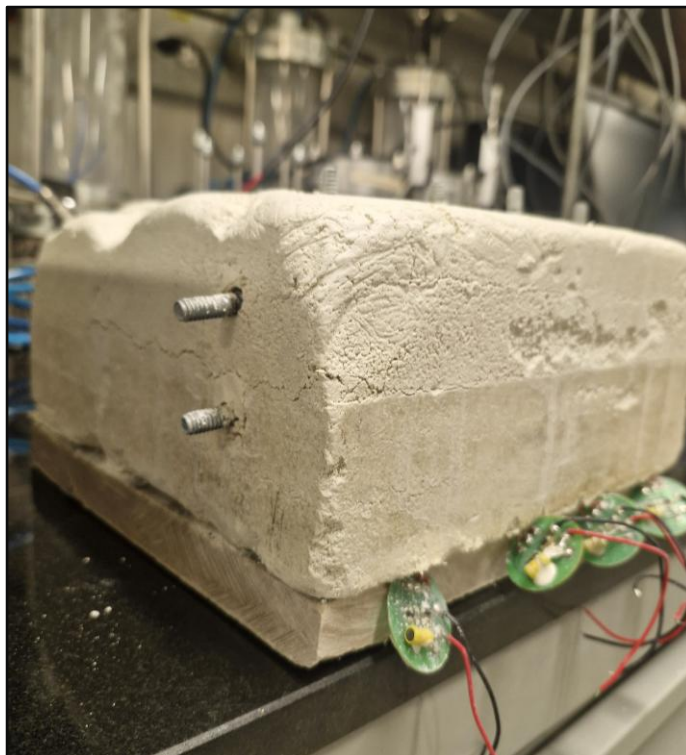




## **PROYECTO DE GRADO**

Asesor: Esteban  
Poveda  
Co-asesor:  
Bernardo Caicedo

# **INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE HUMEDAD EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS Y SU APLICACIÓN EN LA TOMOGRAFÍA DE TALUDES MEDIANTE EL MÉTODO DE MARCHA RÁPIDA (FMM)**

Rodrigo León Jaimes Madrid – 201716463  
Geociencias – Universidad de los Andes

**A quienes nutrieron mi mente con conocimiento  
y mi corazón con afecto: gracias.**

A mis maestros y equipo de laboratorio por enseñarme a pensar  
y a mis seres queridos por enseñarme a creer.

# Contenido

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introducción .....                                                  | 4  |
| 2. Fundamento teórico .....                                            | 5  |
| 2.1. Antecedentes .....                                                | 5  |
| 2.2. Tomografía sísmica en suelos parcialmente saturados .....         | 6  |
| 2.3. Ecuación de Eikonal y solución numérica .....                     | 7  |
| 2.4. Implementación del modelo con PyKonal .....                       | 8  |
| 2.5. Relación humedad–succión–resistencia en suelos finos .....        | 9  |
| 2.6. Validación numérica: la prueba checkerboard .....                 | 10 |
| 3. Metodología .....                                                   | 11 |
| 3.1. Modelo físico y preparación del material .....                    | 11 |
| 3.2. Configuración de sensores y fuentes sísmicas .....                | 12 |
| 3.3. Adquisición, inversión tomográfica y modelado numérico .....      | 13 |
| 3.4. Ensayos geotécnicos complementarios .....                         | 14 |
| 4. Resultados .....                                                    | 16 |
| 4.1. Cobertura del sistema de medición .....                           | 16 |
| 4.2. Registro y extracción de tiempos de llegada .....                 | 16 |
| 4.3. Modelos tomográficos de velocidad sísmica .....                   | 17 |
| 4.3.1. Reconstrucción de modelos por ensayo .....                      | 18 |
| 4.3.2. Modelos simulados en Pykonal .....                              | 20 |
| 4.4. Validación con checkerboard .....                                 | 22 |
| 4.5. Ensayos geotécnicos complementarios .....                         | 23 |
| 4.5.1. Humedad gravimétrica .....                                      | 23 |
| 4.5.2. Succión matricial .....                                         | 24 |
| 4.5.3. Resistencia no drenada (veleta) .....                           | 24 |
| 5. Análisis e interpretación de resultados .....                       | 25 |
| 5.1. Influencia del contenido de humedad en la velocidad de onda ..... | 25 |
| 5.2. Evaluación del modelo numérico y resolución espacial .....        | 26 |
| 5.3. Relación entre propiedades geotécnicas e imagen sísmica .....     | 27 |
| 5.3.1. Correlación entre humedad, succión y velocidad de onda .....    | 27 |

|        |                                                                        |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.3.2. | Relación entre resistencia al corte, succión y velocidad sísmica ..... | 29 |
| 5.3.3. | Interpretación en el marco de la mecánica de suelos no saturados ..... | 31 |
| 5.4.   | Aplicaciones prácticas y limitaciones del sistema experimental .....   | 32 |
| 5.5.   | Evaluación de la resolución mediante prueba tipo checkerboard .....    | 33 |
| 6.     | Conclusiones y alcances del estudio .....                              | 35 |
| 7.     | Referencias .....                                                      | 37 |
| 8.     | Anexos .....                                                           | 38 |

## Figuras

|            |                                                                                                                                                                           |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.  | Prueba preliminar de calibración de sensores sobre dummie de oasis floral .....                                                                                           | 11 |
| Figura 2.  | Disposición superficial de acelerómetros en el bloque experimental .....                                                                                                  | 12 |
| Figura 3.  | Equipos utilizados para la caracterización hidráulica y mecánica .....                                                                                                    | 15 |
| Figura 4.  | Mapa acumulado de cobertura de trayectorias sísmicas .....                                                                                                                | 16 |
| Figura 5.  | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 1. ....                                                                                                                  | 18 |
| Figura 6.  | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 2. ....                                                                                                                  | 18 |
| Figura 7.  | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 3. ....                                                                                                                  | 19 |
| Figura 8.  | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 4. ....                                                                                                                  | 19 |
| Figura 9.  | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 5. ....                                                                                                                  | 19 |
| Figura 10. | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 6. ....                                                                                                                  | 20 |
| Figura 11. | Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 7. ....                                                                                                                  | 20 |
| Figura 12. | Modelo teórico de velocidad – Ensayos 1 y 2. ....                                                                                                                         | 21 |
| Figura 13. | Modelo teórico de velocidad – Ensayos 3 y 4. ....                                                                                                                         | 21 |
| Figura 14. | Modelo teórico de velocidad – Ensayos 5 y 6. ....                                                                                                                         | 21 |
| Figura 15. | Modelo teórico de velocidad – Ensayo 7 .....                                                                                                                              | 22 |
| Figura 16. | Comparación entre el modelo checkerboard original (izquierda) y el modelo reconstruido (derecha) .....                                                                    | 23 |
| Figura 17. | Curva de retención de agua para un suelo residual con alta proporción de caolinita. ..                                                                                    | 29 |
| Figura 18. | Relación típica entre succión y resistencia no drenada ( $q_u$ ) en suelos parcialmente saturados. Fuente: Unsaturated Soils: Research and Applications 1. Springer. .... | 30 |

## Tablas

|          |                                                                             |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. | Porcentaje de humedad gravimétrica para los tres estados del material. .... | 24 |
| Tabla 2. | Valores de succión matricial para los distintos estados hídricos. ....      | 24 |
| Tabla 3. | Resistencia no drenada para cada estado hídrico. ....                       | 24 |

## 1. Introducción

La estabilidad de taludes es una preocupación central en geotecnia e ingeniería civil, especialmente en contextos donde la humedad del suelo varía. Estas variaciones alteran sus propiedades mecánicas y afectan la propagación de ondas sísmicas, lo que limita la precisión de los métodos geofísicos de diagnóstico. En particular, la humedad incrementa la velocidad de las ondas P al facilitar la transmisión de esfuerzos compresivos, pero reduce la de las ondas S al debilitar la rigidez al corte, generando firmas sísmicas que pueden usarse como indicadores indirectos del contenido de agua en el subsuelo.

La tomografía sísmica permite mapear estas variaciones, identificando zonas potencialmente inestables con base en anomalías en la velocidad sísmica. Para simular y analizar estos efectos, este estudio emplea el método de Marcha Rápida (FMM) resuelto mediante el paquete PyKonal, que permite estimar distribuciones de velocidad a partir de tiempos de viaje registrados en laboratorio. Las simulaciones numéricas se validan con ensayos experimentales controlados sobre un bloque de caolín compactado, bajo condiciones variables de humedad.

El sistema experimental incluye dos configuraciones complementarias de sensores (superior y lateral) para maximizar la cobertura angular. Los ensayos utilizan fuentes piezoeléctricas y acelerómetros, y cada medición se acompaña de pruebas gravimétricas para determinar la humedad exacta del bloque, cuya redistribución se estabiliza tras al menos 50 horas según estimaciones basadas en flujo capilar en medios arcillosos. Además, se incorporan ensayos de succión y veleta, lo que permite correlacionar parámetros hidráulicos y mecánicos con la respuesta sísmica.

Este enfoque integrado busca fortalecer la interpretación de datos tomográficos en medios parcialmente saturados, ofreciendo herramientas útiles para el monitoreo de taludes y el desarrollo de modelos predictivos que vinculen humedad, propagación de ondas y estabilidad geotécnica.

## **2. Fundamento teórico**

### **2.1. Antecedentes**

La tomografía sísmica ha demostrado ser una herramienta eficaz para la caracterización geotécnica de taludes, al permitir identificar variaciones internas en la velocidad de propagación de ondas, asociadas a cambios en humedad, compactación o fracturación del suelo. Estudios como los de Heincke et al. (2006) en los Alpes suizos y Poveda et al. (2023) en Sudamérica han mostrado cómo zonas con velocidades sísmicas bajas se correlacionan con sectores inestables, especialmente en medios parcialmente saturados. Esta técnica no solo ha sido útil en campo, sino también en contextos experimentales, donde modelos físicos controlados permiten validar simulaciones numéricas.

El uso de herramientas como PyKonal y el método de Marcha Rápida (FMM) ha optimizado la modelación de tiempos de viaje en medios heterogéneos, mejorando la resolución y estabilidad numérica (Qi, 2022; Whiteley et al., 2020). Estos avances han facilitado la implementación de pruebas tipo checkerboard, que permiten evaluar la capacidad resolutive de sistemas tomográficos bajo condiciones experimentales controladas. Además, la compactación de suelos en laboratorio, bajo metodologías como las descritas por Craig (2012), ha permitido obtener muestras homogéneas y reproducibles en términos de densidad y humedad, fundamentales para analizar con precisión la influencia del contenido de agua sobre la propagación sísmica.

Integrar ensayos geotécnicos clásicos como mediciones de humedad gravimétrica, succión y veleta con tomografía sísmica permite establecer relaciones empíricas robustas entre parámetros mecánicos e hidráulicos del suelo. Según Fredlund y Rahardjo (1993), comprender esta interacción en suelos parcialmente saturados es clave para predecir fenómenos de inestabilidad. En este contexto, el presente estudio adopta un enfoque multitécnico que combina experimentación física, modelado numérico y caracterización geotécnica para evaluar la influencia de la humedad en la propagación sísmica, con el objetivo de mejorar la interpretación de datos tomográficos y su aplicación a problemas reales de estabilidad de suelos.

## **2.2. Tomografía sísmica en suelos parcialmente saturados**

La propagación de ondas sísmicas en suelos parcialmente saturados es sensible a la estructura interna del medio, su contenido de humedad y la distribución de esfuerzos. Esta sensibilidad convierte a la tomografía sísmica en una herramienta idónea para identificar zonas de menor rigidez o acumulación de agua, factores críticos en la estabilidad de taludes. La técnica permite reconstruir la distribución de velocidades en el subsuelo a partir de los tiempos de llegada de ondas P y S registrados entre múltiples fuentes y receptores. En medios heterogéneos como suelos naturales o bloques de laboratorio con variaciones inducidas de humedad, esta reconstrucción permite inferir indirectamente el estado hidráulico del material.

La humedad afecta de manera diferenciada la propagación de ondas sísmicas. En general, las ondas P aumentan su velocidad con la saturación, ya que el agua mejora la transmisión de esfuerzos compresivos. En cambio, las ondas S se ven ralentizadas, pues la presencia de agua en los poros reduce la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado (Whiteley et al., 2020; Yang et al., 2024), y su magnitud depende de la estructura del suelo, el grado de compactación y la continuidad del esqueleto sólido. Así, áreas con alta saturación suelen presentar velocidades P elevadas y velocidades S reducidas, lo que se interpreta como un indicio de pérdida de rigidez o estabilidad potencialmente comprometida.

En materiales como el caolín compactado, estas variaciones pueden ser modeladas experimentalmente con alta precisión. La presencia de humedad también genera fenómenos como la refracción, dispersión y difracción de las ondas, especialmente en zonas donde existen gradientes marcados de saturación o discontinuidades internas. Estos efectos alteran tanto la trayectoria como la forma de las señales registradas, afectando directamente la calidad de los modelos tomográficos. Por ello, comprender y anticipar estas distorsiones resulta esencial para interpretar adecuadamente los resultados de inversión.

La tomografía sísmica no solo permite detectar estas zonas de contraste, sino también evaluar su evolución en el tiempo, convirtiéndose en una herramienta clave para el monitoreo y la prevención de fallas geotécnicas. En el presente estudio, se utiliza este enfoque para analizar cómo la redistribución de humedad dentro de un bloque experimental afecta la propagación de ondas y, por tanto, la lectura de la estructura interna del medio.

### 2.3. Ecuación de Eikonal y solución numérica

La ecuación de Eikonal describe la propagación de un frente de onda en un medio donde la velocidad varía espacialmente, y constituye una aproximación válida en el régimen de altas frecuencias, cuando las ondas se comportan como rayos y su energía se propaga a lo largo de trayectorias definidas (Rawlinson & Sambridge, 2005). Esta formulación permite modelar los tiempos de llegada sin resolver la ecuación completa de ondas. Matemáticamente, la ecuación de Eikonal se expresa como:

$$|\nabla T(x, y, z)| = \frac{1}{V(x, y, z)}$$

Donde:

- $T(x, y, z)$  es el tiempo de llegada de la onda a un punto  $(x, y, z)$ .
- $V(x, y, z)$  es la velocidad de propagación de la onda en el medio.
- $\nabla T(x, y, z)$  es el gradiente del tiempo de llegada, que define la dirección de propagación de la onda.

Resolver esta ecuación equivale a calcular, para cada punto del dominio, el tiempo mínimo que le toma a una onda alcanzar dicho punto desde una fuente. En medios reales con heterogeneidades, no se dispone de soluciones analíticas, por lo que se emplean métodos numéricos. Entre los más utilizados en geofísica aplicada se encuentra el Método de Marcha Rápida (Fast Marching Method, FMM), desarrollado por Sethian (1996), que permite propagar de forma eficiente el frente de onda respetando la condición de causalidad y evitando oscilaciones numéricas.

El FMM resuelve la ecuación en mallas estructuradas, partiendo desde la fuente y actualizando los tiempos de llegada en los nodos vecinos según un criterio de mínima distancia acumulada (Sethian, 1996; Rawlinson et al., 2010). Esto lo convierte en una herramienta muy adecuada para modelar tiempos de viaje en medios geotécnicos discretizados, donde las velocidades varían suavemente.

En tomografía sísmica, la solución numérica de la ecuación de Eikonal permite generar un campo sintético de tiempos de viaje para un modelo dado. Estos tiempos se comparan con los registrados



experimentalmente, y la diferencia entre ambos se utiliza como criterio para ajustar el modelo de velocidades mediante inversión iterativa (Zhao, 2005). Este proceso constituye la base para la reconstrucción de la estructura interna del medio, lo que resulta esencial para la evaluación de la estabilidad en suelos parcialmente saturados.

## **2.4. Implementación del modelo con PyKonal**

PyKonal es una herramienta computacional basada en Python que permite resolver la ecuación de Eikonal utilizando el Método de Marcha Rápida (FMM). Su diseño modular y su eficiencia computacional lo hacen especialmente útil para estudios geofísicos donde se requiere calcular campos de tiempos de viaje en medios discretizados. En el contexto de la tomografía sísmica geotécnica, PyKonal permite construir modelos directos precisos y compararlos con datos experimentales para validar configuraciones o realizar inversiones. Aunque existen otras alternativas como el Fast Marching Toolbox (FMM-MATLAB) o bibliotecas de elementos finitos como FEniCS, la elección de PyKonal se justifica por su integración directa con el entorno Python, su eficiencia en geometrías regulares y su compatibilidad con mallas cartesianas, condiciones que coinciden con el dominio experimental del presente estudio (White et al., 2020).

El proceso de implementación comienza con la definición de una malla cartesiana en dos dimensiones, donde a cada celda se le asigna un valor de *slowness* (inverso de la velocidad sísmica). Luego se define la posición de la fuente, y el algoritmo propaga el frente de onda resolviendo la ecuación de Eikonal hacia el resto del dominio. La salida principal es un mapa de tiempos de llegada desde la fuente hacia todos los nodos de la malla. En este estudio, PyKonal se emplea para simular condiciones ideales de propagación de ondas en un bloque de caolín con distintos perfiles de humedad. Estas simulaciones se comparan con los tiempos reales medidos en el experimento, lo que permite validar el modelo numérico. Además, se utiliza como base para la prueba *checkerboard* y para explorar distintos escenarios de resolución, distribución de sensores y sensibilidad a variaciones internas. Las principales ventajas de PyKonal en este contexto incluyen su compatibilidad con herramientas de análisis en Python, su capacidad para manejar dominios grandes con eficiencia y su facilidad para modificar modelos de velocidad y topología. Si bien presenta limitaciones en medios con

discontinuidades abruptas, su precisión en dominios con variaciones suaves lo hace ideal para modelar medios como suelos compactados con gradientes de humedad.

## **2.5. Relación humedad–succión–resistencia en suelos finos**

En suelos parcialmente saturados, el contenido de humedad influye directamente en su rigidez, resistencia y estabilidad. Esta relación está mediada por la succión matricial, definida como la diferencia entre la presión del aire y la presión del agua en los poros, la cual actúa como una variable de estado adicional que controla el comportamiento mecánico del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993). La succión genera fuerzas capilares que contribuyen a la cohesión aparente del material, estabilizando el contacto entre partículas y aumentando la resistencia al corte.

Cuando la humedad del suelo aumenta, la succión disminuye, reduciendo así la fuerza capilar y, con ella, la resistencia estructural del medio. Este efecto es especialmente relevante en suelos de baja permeabilidad como el caolín, donde la redistribución del agua ocurre lentamente por difusión capilar. Incluso pequeñas variaciones en el contenido de agua pueden inducir cambios sustanciales en la respuesta mecánica del suelo, incluyendo colapsos estructurales localizados o pérdida de capacidad portante (Vanapalli et al., 1996; Lu & Likos, 2004).

La curva de retención de humedad, que relaciona el contenido volumétrico de agua con la succión del suelo, es fundamental para entender cómo se modifican sus propiedades hidráulicas y mecánicas ante cambios de humedad. Esta curva refleja la capacidad del suelo para retener agua y su evolución frente a procesos de secado o humectación, y constituye un insumo clave para modelar su comportamiento bajo condiciones parcialmente saturadas (Fredlund & Xing, 1994).

Desde el punto de vista dinámico, una disminución de la succión implica una pérdida de rigidez efectiva, lo que se traduce en una menor velocidad de propagación de ondas, especialmente en el caso de ondas de corte, que dependen directamente del módulo de rigidez del suelo (Santamarina et al., 2001). Esta relación justifica la integración de datos sísmicos con parámetros hidráulicos y mecánicos para caracterizar la condición del medio.

En este estudio, estos conceptos permiten establecer vínculos entre los resultados tomográficos y mediciones independientes de humedad gravimétrica, succión y resistencia no drenada. Esta

integración metodológica refuerza la interpretación de los modelos de velocidad y la evaluación de estabilidad, aportando una base más robusta para el análisis geotécnico de suelos parcialmente saturados.

## **2.6. Validación numérica: la prueba checkerboard**

La validación de la capacidad resolutive de un sistema tomográfico es esencial para interpretar con confianza los resultados obtenidos. Una de las estrategias más comunes para este fin es el checkerboard test, o prueba de tablero de ajedrez, utilizada ampliamente en estudios de inversión sísmica para evaluar la sensibilidad espacial del sistema frente a variaciones en la velocidad del medio (Rawlinson & Spakman, 2016).

Esta prueba consiste en construir un modelo sintético con celdas alternadas de velocidad alta y baja, siguiendo un patrón regular similar a un tablero de ajedrez. A partir de este modelo, se generan tiempos de viaje utilizando el mismo método numérico que se aplicará en el experimento real — en este caso, PyKonal con el Método de Marcha Rápida (FMM)—. Luego, se realiza el proceso de inversión sobre esos datos sintéticos, utilizando exactamente la misma configuración de fuentes y receptores que la del estudio experimental (Zelt, 1999).

La comparación entre el modelo original y el modelo reconstruido permite evaluar la resolución espacial del sistema. Una recuperación nítida del patrón indica buena cobertura de rayos y sensibilidad adecuada del algoritmo en esa región. Por el contrario, patrones atenuados o distorsionados indican zonas con resolución insuficiente, ya sea por limitaciones geométricas en la distribución de sensores o por debilidades numéricas en el esquema inversor (Nolet, 2008).

En el presente estudio, el checkerboard test se aplica sobre una malla con características geométricas y espaciales equivalentes a las del bloque de caolín experimental. Esto permite identificar con mayor precisión las regiones del dominio donde los resultados tomográficos pueden interpretarse con confianza, y distinguir entre anomalías físicas reales y artefactos numéricos derivados de la geometría o de las limitaciones del algoritmo.

La inclusión de este tipo de prueba refuerza la validez del enfoque experimental-numérico adoptado y proporciona un criterio objetivo para delimitar las zonas útiles del modelo reconstruido, cumpliendo así con uno de los principios básicos de la tomografía: no interpretar más allá de lo que el sistema puede resolver de forma fiable.

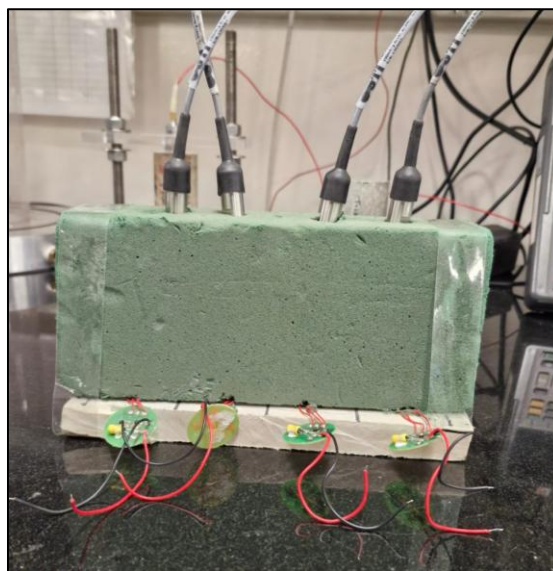
### 3. Metodología

#### 3.1. Modelo físico y preparación del material

Para analizar la influencia de la humedad en la propagación de ondas sísmicas, se construyó un modelo físico a escala de laboratorio a partir de un bloque de caolín 100% puro, material elegido por su uniformidad, baja plasticidad y comportamiento mecánico bien caracterizado (Craig, 2012). La muestra fue compactada en un molde de  $22 \times 22 \times 10$  cm, dividido en capas de 2.5 cm, aplicando una presión uniforme de 100 kPa por capa para alcanzar una densidad seca de  $1.3 \text{ g/cm}^3$ . Esta configuración asegura reproducibilidad con estudios previos en condiciones similares (Pérez-Jaimes, 2023).

El caolín fue previamente tamizado en estado húmedo con malla de 2 mm para garantizar homogeneidad y almacenado en bolsas selladas para evitar pérdidas de humedad. La muestra se preparó inicialmente con un contenido de humedad del 31%, considerado como óptimo de compactación, lo que implicó una masa seca de 6292 g y una masa húmeda total de 8242 g.

Antes de iniciar los ensayos principales, se realizaron pruebas con materiales sustitutos (madera y oasis floral) para validar el funcionamiento de sensores y sistemas de adquisición. Estos dummies permitieron verificar la calibración sin afectar el estado hídrico del material real.



*Figura 1. Prueba preliminar de calibración de sensores sobre dummy de oasis floral.*

El estudio contempló tres estados hídricos principales: humedad óptima (31%), intermedia (44.13%) y alta (50.47%), definidos con base en humectación progresiva controlada. En todos los casos, se respetó un tiempo de 50 horas de espera antes de cada ensayo, estimado a partir de principios de redistribución capilar en suelos finos de baja permeabilidad (Fredlund & Rahardjo, 1993), para asegurar una distribución interna de humedad cuasi-estacionaria.

Este control experimental permite aislar el efecto de la humedad sobre la velocidad de propagación de ondas, facilitando la interpretación sísmica y su correlación con parámetros geotécnicos del medio.

### **3.2. Configuración de sensores y fuentes sísmicas**

La disposición de sensores y fuentes sísmicas fue diseñada para maximizar la cobertura del dominio físico, asegurar una adecuada resolución angular de los rayos y optimizar la calidad de los datos para la reconstrucción tomográfica. Se emplearon acelerómetros industriales CMCP1100, dispuestos en dos configuraciones complementarias: una lineal superficial y otra vertical en los bordes laterales del molde.

En la configuración superficial, cuatro sensores fueron ubicados directamente sobre la cara superior del bloque de caolín, separados entre sí por 5 cm, distancia que asegura una resolución espacial proporcional al tamaño del modelo (22 cm de lado). Los sensores se fijaron mediante tornillos sin cabeza de doble rosca, garantizando un acoplamiento firme y una transmisión eficiente de las ondas generadas desde la base.



*Figura 2. Disposición superficial de acelerómetros en el bloque experimental.*

Para mejorar la cobertura angular y detectar gradientes verticales de velocidad, se implementó una segunda configuración en los bordes laterales del molde, también con separación de 5 cm entre

sensores. Esta disposición permitió registrar ondas que atraviesan el bloque en trayectorias oblicuas y verticales, esenciales en un contexto con redistribución interna de humedad.

Las fuentes sísmicas fueron piezoeléctricos BRED-624, montados sobre una placa rígida de fibrocemento con divisiones regulares para asegurar una separación constante. Cada piezoeléctrico fue activado individualmente mediante un generador de pulsos manual, lo que garantizó control sobre la señal y evitó superposiciones. Esta disposición permitió generar ondas reproducibles en múltiples posiciones, mejorando la uniformidad de la cobertura.

La coherencia geométrica entre fuentes y sensores fue diseñada para facilitar la inversión tomográfica bidimensional. Además, esta configuración fue validada mediante un test checkerboard, que demostró la capacidad del sistema para detectar variaciones internas de velocidad en el dominio experimental.

### **3.3. Adquisición, inversión tomográfica y modelado numérico**

El sistema de adquisición estuvo conformado por cuatro acelerómetros CMCP1100 conectados a un sistema multicanal que registró las señales generadas por piezoeléctricos BRED-624 activados secuencialmente mediante un generador de pulsos. Cada sensor se acopló directamente al caolín mediante tornillos sin cabeza, permitiendo una transmisión eficiente de la señal sísmica sin pérdidas por desacoplamiento.

Se realizaron múltiples mediciones para cada fuente, registrando simultáneamente en los cuatro sensores. Las señales fueron procesadas mediante un filtrado pasa banda (10 Hz–1 kHz), normalización de amplitudes y corrección temporal por correlación cruzada, lo que permitió extraer los tiempos de llegada con alta precisión.

A partir de estos tiempos, se aplicó una inversión tomográfica para reconstruir la distribución de velocidades sísmicas en el interior del bloque. El modelo fue discretizado como una malla de  $88 \times 88$  celdas de 2.5 mm, cubriendo un dominio de  $22 \times 22$  cm. Cada trayecto fuente-receptor se proyectó sobre la malla para construir la matriz de trayectorias, que fue invertida mediante mínimos cuadrados para obtener el campo de velocidades.

Para validar los resultados y simular escenarios controlados, se implementó un modelo directo en PyKonal, resolviendo la ecuación de Eikonal mediante el Método de Marcha Rápida (FMM). Se definieron tres modelos de velocidad asociados a estados hídricos experimentales (31%, 44.13% y 50.47%), asignando valores representativos en cada nodo de la malla, con base en literatura sobre suelos arcillosos parcialmente saturados (Whiteley et al., 2020; Fredlund & Rahardjo, 1993).

Los tiempos simulados se compararon con los observados mediante mapas de error absoluto, lo que permitió evaluar la precisión del modelo e identificar zonas con menor cobertura o sensibilidad. Finalmente, se aplicó una prueba tipo checkerboard para verificar la capacidad resolutive del sistema, confirmando que la red de sensores permite detectar variaciones internas de velocidad en el dominio experimental.

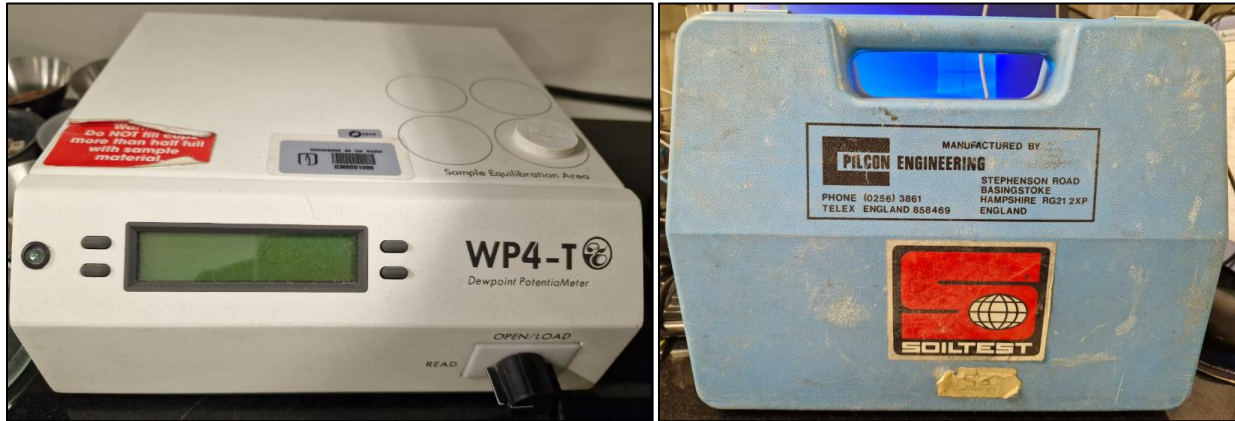
### **3.4. Ensayos geotécnicos complementarios**

Para correlacionar las velocidades sísmicas con las propiedades físicas del suelo, se implementaron tres tipos de ensayos geotécnicos en cada estado de humedad del bloque: humedad gravimétrica, succión del suelo y resistencia no drenada mediante veleta. Estas mediciones permitieron establecer vínculos entre los parámetros hidráulicos y mecánicos, fortaleciendo la interpretación conjunta con los modelos tomográficos.

La humedad gravimétrica se determinó extrayendo pequeñas muestras del bloque en zonas próximas a los acelerómetros. Cada muestra fue pesada inmediatamente y luego secada en horno a 110 °C durante 24 horas para obtener su masa seca. La humedad se calculó como el cociente entre la masa de agua y la masa seca, proporcionando un valor preciso del contenido hídrico en el momento de cada ensayo sísmico.

La succión matricial se midió utilizando el equipo WP4-T (Decagon Devices), que emplea el principio de punto de rocío para determinar el potencial hídrico de las muestras. Estas se colocaron en la cámara de equilibración siguiendo las recomendaciones del fabricante, evitando la sobresaturación del compartimento.

La resistencia al corte no drenada fue evaluada mediante una veleta Pilcon Engineering, insertada directamente sobre la superficie del bloque. La prueba consistió en aplicar un momento torsional hasta alcanzar la falla del material, registrando la torsión máxima para estimar la cohesión en condiciones de corte rápido y sin drenaje.



*Figura 3. Equipos utilizados para la caracterización hidráulica y mecánica.*

*WP4-T para medición de succión (izquierda) y veleta para resistencia no drenada (derecha).*

Estos tres ensayos se aplicaron sistemáticamente en cada uno de los estados hídricos definidos experimentalmente. Los resultados permitieron validar los perfiles de humedad utilizados en el modelo numérico y evidenciaron tendencias claras: a mayor humedad, la succión disminuye y la resistencia no drenada se reduce, coherente con la pérdida progresiva de rigidez del medio. Esta información fue fundamental para interpretar las variaciones en las velocidades sísmicas y para reforzar la validez de los modelos de velocidad empleados en PyKonal.



## 4. Resultados

### 4.1. Cobertura del sistema de medición

La confiabilidad de los modelos tomográficos depende en gran medida de la cobertura espacial de las trayectorias sísmicas entre fuentes y receptores. En este estudio se realizaron ocho combinaciones por ensayo ( $4 \text{ fuentes} \times 2 \text{ configuraciones de receptores}$ ), que en conjunto generaron una matriz acumulada de trayectorias sobre el dominio físico del bloque de caolín.

La Figura 1 presenta el mapa de cobertura de rayos, donde cada celda está coloreada según la cantidad de trayectorias que la atraviesan. Se observa una buena densidad de cobertura en la zona central del modelo, mientras que las esquinas superiores presentan celdas sin cobertura directa. Estas regiones no fueron consideradas en la inversión activa, sino que se enmascararon o se le asignó una velocidad constante correspondiente al valor máximo de cada ensayo.

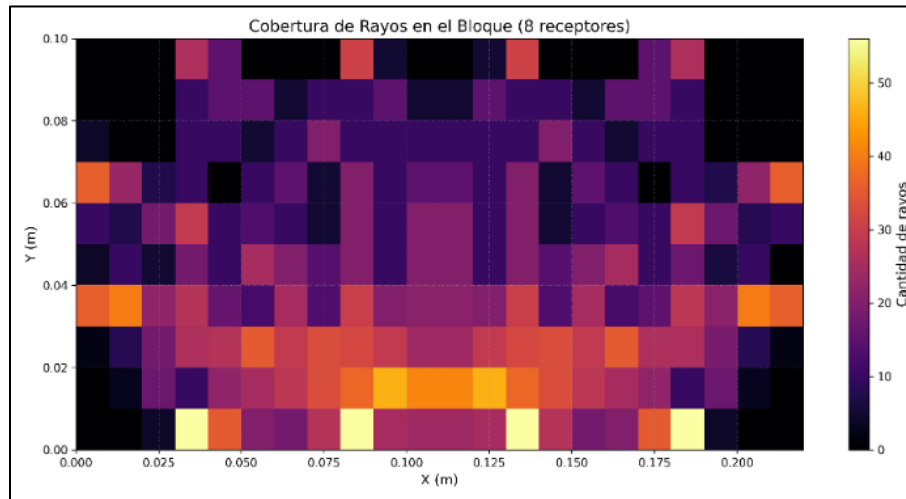


Figura 4. Mapa acumulado de cobertura de trayectorias sísmicas.

Este patrón de cobertura confirma que la red de fuentes y receptores fue adecuada para resolver con confiabilidad las zonas más relevantes del dominio, particularmente aquellas afectadas por la redistribución de humedad. La validación de la resolución espacial de esta configuración se aborda en la sección 4.4 mediante la prueba tipo checkerboard.

### 4.2. Registro y extracción de tiempos de llegada

Cada ensayo generó ocho registros de aceleración (uno por sensor), correspondientes a las combinaciones fuente–receptor implementadas sobre el bloque de caolín. Las señales fueron

adquiridas mediante un sistema digital multicanal, en condiciones de laboratorio controladas, y se almacenaron en archivos .lvm para su procesamiento posterior.

La estimación de los tiempos de llegada se realizó identificando el punto de máxima energía acumulada en cada traza, lo cual permitió una detección robusta incluso en señales con bajo contenido espectral o presencia de ruido. A partir de estos tiempos, se construyó una matriz de observaciones para cada ensayo, la cual sirvió de insumo para la inversión tomográfica.

Todo el procedimiento de filtrado, análisis espectral (FFT), detección de ruido y validación gráfica fue realizado para cada sensor y ensayo. Sin embargo, dado el volumen de información (7 ensayos  $\times$  8 sensores  $\times$  múltiples gráficas), se optó por incluir únicamente ejemplos representativos en los anexos, organizados por ensayo y por tipo de procesamiento.

Esta estrategia permite conservar trazabilidad sobre la calidad de los datos sin saturar el cuerpo del documento, y asegura que los tiempos de llegada utilizados en los modelos tomográficos fueron determinados con criterios reproducibles y controlados.

### **4.3. Modelos tomográficos de velocidad sísmica**

Los modelos tomográficos fueron obtenidos resolviendo un sistema de ecuaciones lineales del tipo  $G \cdot s = t$ , donde  $G$  representa la matriz de trayectorias fuente–receptor,  $s$  el vector de lentitudes (inverso de velocidad) y  $t$  el vector de tiempos de llegada medidos experimentalmente. El dominio de  $22 \times 10$  cm fue discretizado en una malla regular de  $22 \times 11$  celdas, empleando los mismos parámetros de inversión en todos los casos. La inversión se resolvió utilizando PyKonal, por su eficiencia en geometrías cartesianas y su compatibilidad con modelos sintéticos discretos, factores clave en el contexto experimental de esta investigación.

En las celdas sin cobertura de rayos, se aplicó un enmascaramiento o se asignó una velocidad constante correspondiente al valor máximo estimado para cada ensayo, a fin de evitar extrapolaciones inestables. Las diferencias entre los modelos reconstruidos reflejan exclusivamente el efecto del contenido de humedad, ya que todas las demás condiciones experimentales fueron mantenidas constantes.

#### 4.3.1. Reconstrucción de modelos por ensayo

A continuación, se presentan los modelos tomográficos obtenidos a partir de los siete ensayos válidos realizados sobre el bloque de caolín. Cada figura muestra la distribución de velocidades sísmicas reconstruidas, empleando una escala de colores común para facilitar la comparación entre condiciones experimentales.

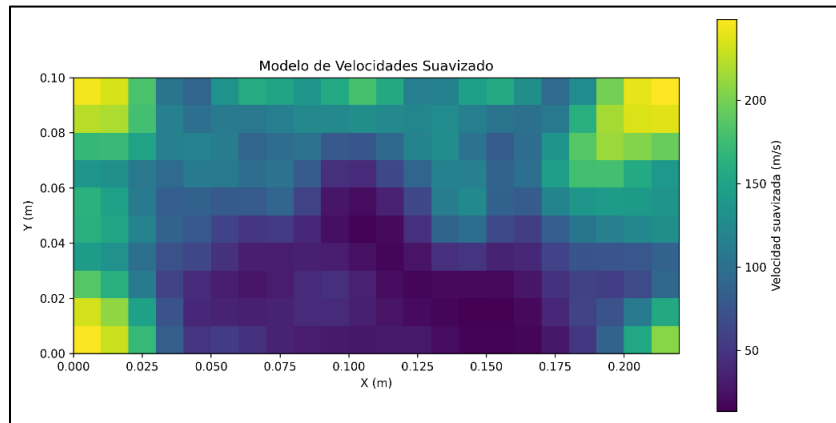


Figura 5. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 1.

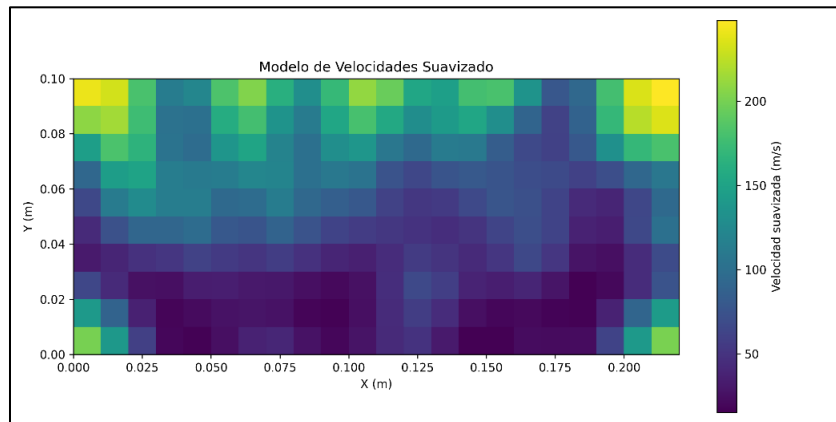
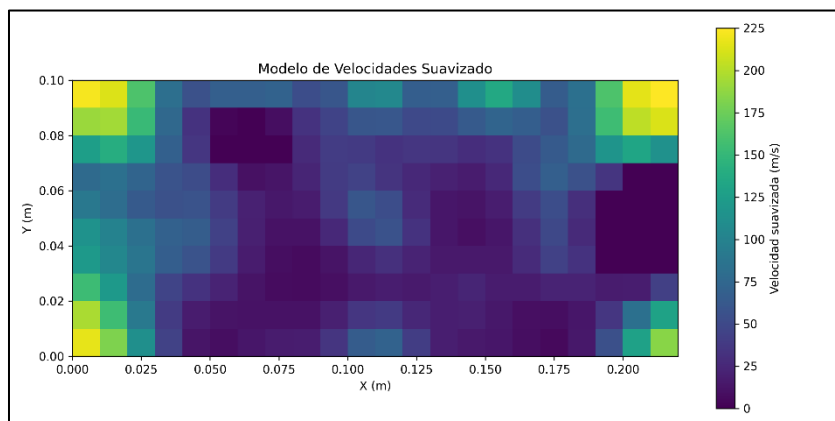
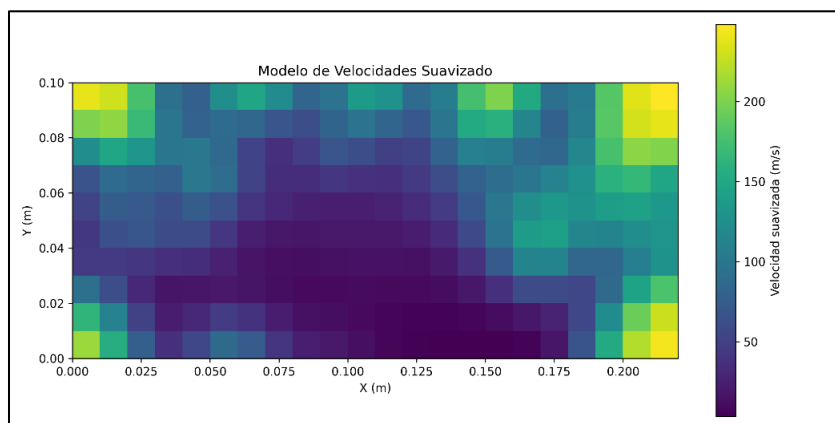


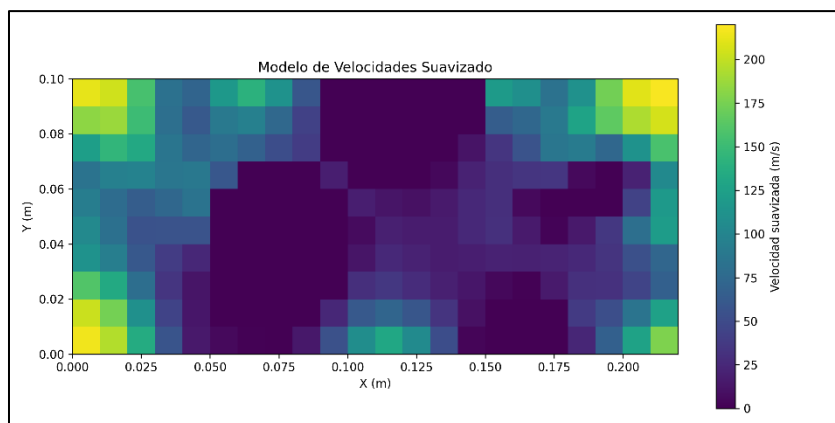
Figura 6. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 2.



*Figura 7. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 3.*



*Figura 8. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 4.*



*Figura 9. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 5.*

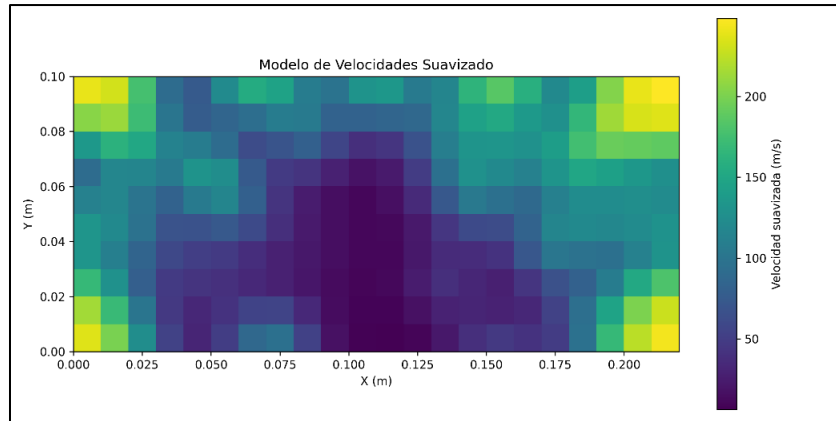


Figura 10. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 6.

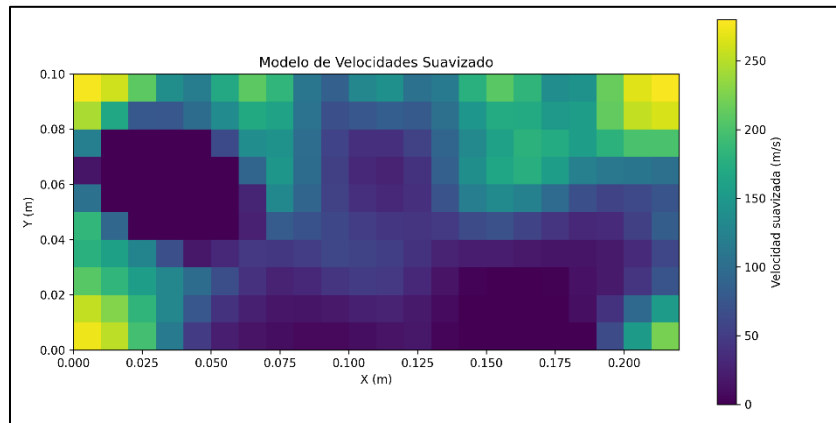
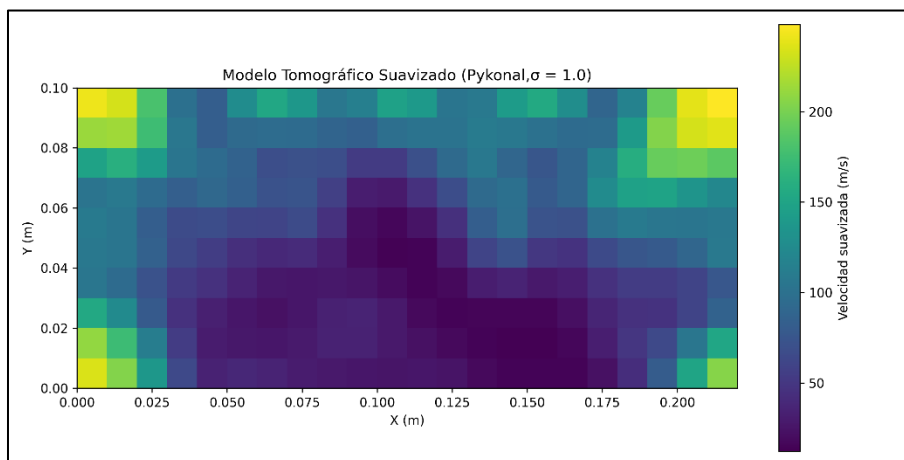


Figura 11. Modelo tomográfico de velocidad sísmica – Ensayo 7.

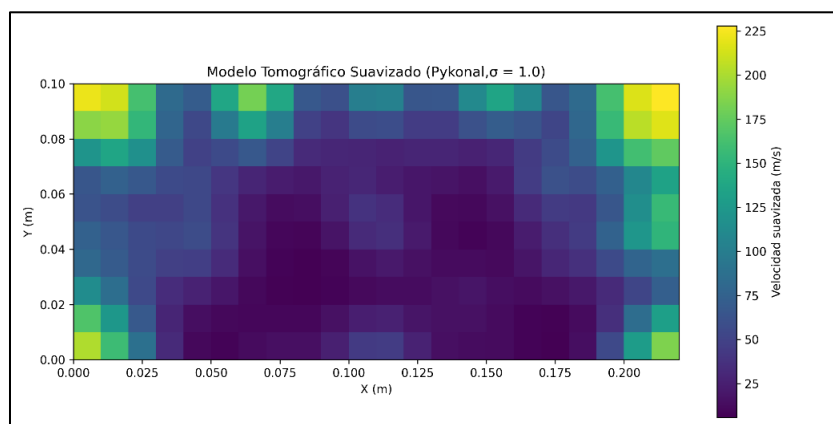
En todos los casos, las zonas enmascaradas se visualizan con una velocidad uniforme fuera del rango de reconstrucción activa. La cobertura obtenida permite resolver con fiabilidad la región central del dominio, donde se concentran las trayectorias.

#### 4.3.2. Modelos simulados en Pykonal

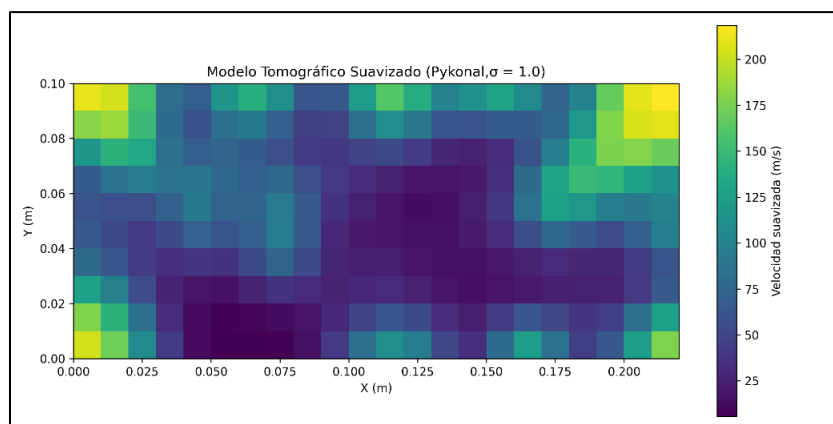
Con el fin de contar con una base de comparación teórica, se generaron modelos directos mediante el paquete PyKonal, utilizando velocidades homogéneas representativas para cada estado de humedad. Estos modelos fueron resueltos numéricamente con el Método de Marcha Rápida (FMM), aplicando la misma malla de  $22 \times 11$  celdas y geometría de fuentes y receptores del experimento.



*Figura 12. Modelo teórico de velocidad – Ensayos 1 y 2.*



*Figura 13. Modelo teórico de velocidad – Ensayos 3 y 4.*



*Figura 14. Modelo teórico de velocidad – Ensayos 5 y 6.*

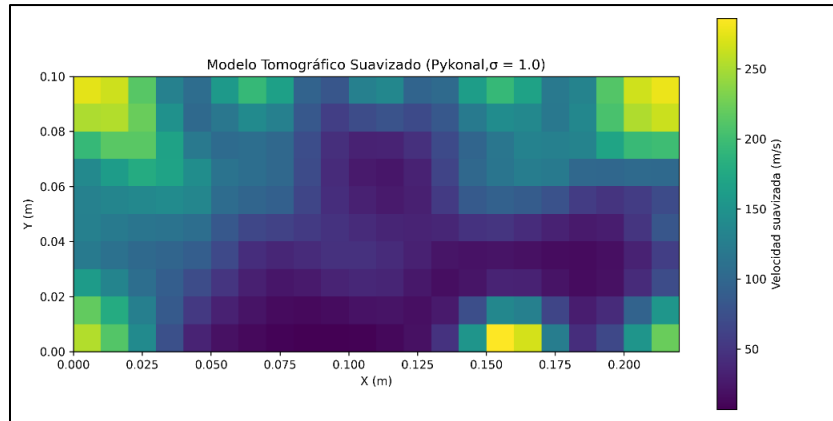


Figura 15. Modelo teórico de velocidad – Ensayo 7.

Estos resultados numéricos representan una propagación idealizada sin ruido, útil para interpretar tendencias generales del comportamiento sísmico frente a variaciones de humedad. Su comparación con los modelos experimentales se aborda posteriormente en el Capítulo 5.

#### 4.4. Validación con checkerboard

Con el fin de evaluar la capacidad resolutive del sistema fuente–receptor y del esquema de inversión utilizado, se implementó una prueba tipo *checkerboard*. Esta técnica consiste en imponer un patrón sintético de velocidades alternadas en una malla regular y verificar si el sistema es capaz de recuperar dicho patrón a partir de los tiempos de llegada generados numéricamente.

El modelo original se construyó sobre la misma malla del experimento ( $22 \times 11$  celdas), aplicando anomalías del  $\pm 20\%$  respecto a una velocidad base de 250 m/s, generando bloques de alta y baja velocidad distribuidos de forma alternada en patrones de  $4 \times 4$  celdas. Con este modelo se simulaban tiempos de llegada utilizando forward modeling con PyKonal, replicando la geometría real de fuentes y receptores.

A partir de esos tiempos simulados, se aplicó el mismo algoritmo de inversión empleado en los datos experimentales. La Figura 16 muestra el patrón ideal (izquierda) y el modelo reconstruido (derecha), evidenciando qué zonas del dominio pudieron ser resueltas por el sistema bajo la cobertura disponible.

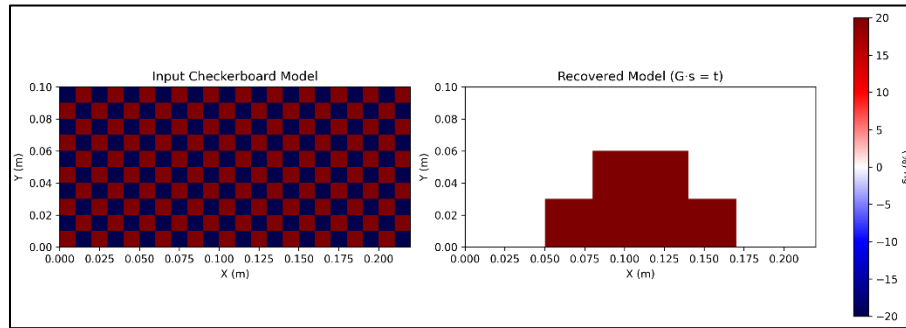


Figura 16. Comparación entre el modelo checkerboard original (izquierda) y el modelo reconstruido (derecha).

Este resultado sirve como referencia para delimitar el área donde los modelos tomográficos reales pueden interpretarse con mayor confianza. La discusión sobre la sensibilidad espacial y las limitaciones de resolución derivadas de esta prueba se desarrollará en el Capítulo 5.

## 4.5. Ensayos geotécnicos complementarios

Con el objetivo de complementar los resultados sísmicos y caracterizar el estado hidráulico y mecánico del material, se realizaron ensayos de humedad gravimétrica, succión matricial y resistencia no drenada sobre el bloque de caolín compactado, en tres estados representativos de humedad: alta (50.47%), intermedia (44.13%) y baja (26.51%).

Los resultados obtenidos permiten cuantificar el contenido de agua, el potencial hídrico del suelo y su capacidad resistente bajo condiciones sin drenaje. A continuación, se presentan los valores medidos y los recursos visuales utilizados para registrar cada procedimiento.

### 4.5.1. Humedad gravimétrica

Las muestras fueron pesadas antes y después del secado en horno a 110 °C durante 24 horas. La humedad se calculó como el cociente entre la masa de agua evaporada y la masa seca de cada muestra.



Tabla 1. Porcentaje de humedad gravimétrica para los tres estados del material.

| Cálculo de humedades |                 |               |                  |           |
|----------------------|-----------------|---------------|------------------|-----------|
| Humedad              | Masa húmeda [g] | Masa seca [g] | Masa de agua [g] | % de agua |
| 1                    | 4.39            | 3.47          | 0.92             | 26.51%    |
| 2                    | 5.52            | 3.83          | 1.69             | 44.13%    |
| 3                    | 4.83            | 3.21          | 1.62             | 50.47%    |

#### 4.5.2. Succión matricial

La succión se midió con el equipo WP4-T (Decagon Devices), el cual determina el potencial hídrico a partir del punto de rocío en condiciones de equilibrio termodinámico.

Tabla 2. Valores de succión matricial para los distintos estados hídricos.

| Ensayos de succión |               |
|--------------------|---------------|
| Humedad            | Succión [Mpa] |
| 26.51%             | -1.09         |
| 44.13%             | -0.94         |
| 50.47%             | 0             |

#### 4.5.3. Resistencia no drenada (veleta)

La resistencia al corte fue estimada mediante una veleta Pilcon Engineering aplicada directamente sobre el bloque en cada condición hídrica. El par torsor registrado se tradujo en resistencia no drenada.

Tabla 3. Resistencia no drenada para cada estado hídrico.

| Ensayos de veleta |       |
|-------------------|-------|
| Humedad           | [Kpa] |
| 26.51%            | 102   |
| 44.13%            | 30    |
| 50.47%            | 16    |

## **5. Análisis e interpretación de resultados**

### **5.1. Influencia del contenido de humedad en la velocidad de onda**

La propagación de ondas sísmicas en suelos parcialmente saturados está directamente influenciada por el contenido de humedad, tanto por su magnitud como por su distribución interna. En este estudio, la relación entre la velocidad de onda y el estado hídrico del caolín compactado fue evaluada a partir de siete ensayos experimentales, cuyos modelos tomográficos muestran un patrón claro: a mayor contenido de humedad, menor velocidad de propagación.

Los modelos correspondientes a los ensayos 1 y 2, con 26.51 % de humedad y redistribución completa, presentan velocidades altas y distribuciones uniformes, lo que refleja un medio rígido y homogéneo. En contraste, los ensayos 3 y 5 (44.13 % y 50.47 % de humedad respectivamente) realizados sin permitir la redistribución del agua, muestran modelos con zonas definidas de velocidad nula, lo que indica una acumulación localizada de agua en ciertas regiones del bloque. Estas áreas húmedas aún no redistribuidas impidieron la propagación efectiva de las ondas en el momento del ensayo. Esto sugiere que no solo el contenido de agua, sino su redistribución interna, es determinante para obtener una respuesta sísmica coherente.

Por su parte, los ensayos 4 y 6, con igual contenido hídrico que los anteriores pero realizados tras 50 horas de espera, presentan modelos más estables, con zonas de baja velocidad centradas y transiciones suaves. Este comportamiento evidencia que el equilibrio hídrico alcanzado tras la redistribución capilar es clave para que el medio refleje de forma confiable su rigidez estructural.

Finalmente, el ensayo 7 (bloque seco) resultó en un modelo disperso con regiones sin propagación de onda, probablemente por pérdida de rigidez total en un medio seco, con escasa transmisión de energía sísmica debido a la ausencia de agua en los contactos interparticulares. Esto puede explicarse por una pérdida de acoplamiento entre el sensor y el material, así como por la reducción de la sensibilidad del sistema ante la ausencia total de humedad.

En resumen, la tomografía sísmica permitió visualizar la evolución estructural del bloque de caolín ante cambios de humedad. La velocidad de propagación decrece con el aumento del contenido de agua, pero esta relación solo se expresa claramente cuando la redistribución ha alcanzado un estado

cuasi-estacionario. La técnica permite no solo detectar niveles de saturación, sino también evaluar indirectamente la condición de equilibrio hídrico del medio.

## **5.2. Evaluación del modelo numérico y resolución espacial**

El modelo numérico implementado con PyKonal permitió simular la propagación de ondas sísmicas en el bloque de caolín bajo distintas condiciones hídricas, a partir de la resolución de la ecuación de Eikonal mediante el Método de Marcha Rápida. Su validez fue evaluada mediante la comparación entre tiempos de llegada simulados y observados, así como mediante el análisis de cobertura espacial, sensibilidad del sistema de adquisición y fuentes de error.

En los ensayos con redistribución completa del agua (1, 2, 4 y 6), los tiempos simulados a partir de los modelos de velocidad reconstruidos coincidieron en gran medida con los tiempos medidos experimentalmente. Las diferencias se concentraron en bordes y esquinas del dominio, donde la cobertura angular de rayos es limitada. Esto indica que el modelo numérico, con la malla de  $22 \times 11$  celdas utilizada, ofrece una representación adecuada del comportamiento del medio en regiones bien muestreadas.

En cambio, los ensayos 3 y 5, ejecutados sin esperar el tiempo mínimo de redistribución hidráulica, presentan modelos inconsistentes, tanto en su morfología como en los tiempos simulados. Las discrepancias en estas condiciones se deben principalmente a estados transitorios de humedad, donde el perfil hídrico no está estabilizado y la propagación sísmica no representa un régimen estacionario. Esto compromete la calidad del ajuste entre observación y simulación, especialmente en zonas donde se registran velocidades anómalamente bajas o trayectorias dispersas.

El modelo del ensayo 7, completamente seco, también mostró errores elevados y sin patrón espacial definido. Esta condición extrema afecta el acoplamiento mecánico entre sensores y muestra, además de disminuir la energía transmitida por la onda, lo que genera registros ruidosos e interpretaciones poco confiables. A pesar del filtrado y la normalización aplicados, los tiempos obtenidos en este estado no fueron representativos, lo que limitó su valor para validar el modelo numérico.

En cuanto a la cobertura del sistema de adquisición, el análisis de la matriz de trayectorias evidencia una buena densidad en la zona central del dominio, pero una falta de información en los bordes superiores. Esta geometría condiciona la resolución del modelo, ya que las trayectorias son

preferentemente horizontales u oblicuas con escasa diversidad angular en algunas regiones. Esto se reflejó en las pruebas de checkerboard, donde las anomalías solo se recuperaron parcialmente en la parte central, y en las zonas periféricas la resolución fue deficiente.

Las principales fuentes de error en la inversión se identificaron como: la discretización espacial del dominio, el ruido presente en las señales, el desacople físico entre sensores y muestra en condiciones secas, y la ejecución manual de los ensayos (sin sincronización electrónica de fuente y sensores). Estos factores introducen incertidumbre en los tiempos medidos y afectan la estabilidad del sistema de ecuaciones lineales resuelto para estimar los modelos de velocidad.

Pese a estas limitaciones, el modelo numérico mostró una capacidad robusta para reproducir los tiempos de llegada en condiciones experimentales bien controladas. Su implementación permitió no solo validar la coherencia de los datos experimentales, sino también ofrecer una herramienta flexible para la simulación de escenarios hipotéticos. La correspondencia general entre simulación y observación en ensayos con redistribución completa confirma que la técnica es adecuada para caracterizar la respuesta sísmica de medios parcialmente saturados, siempre que se garantice una geometría de adquisición representativa y una adecuada estabilización hídrica del sistema.

### **5.3. Relación entre propiedades geotécnicas e imagen sísmica**

#### **5.3.1. Correlación entre humedad, succión y velocidad de onda**

Los resultados experimentales mostraron una asociación coherente entre el contenido de humedad, la succión matricial y la velocidad sísmica reconstruida. A medida que el caolín compactado pasó de un estado seco a uno húmedo, las velocidades sísmicas promedio disminuyeron progresivamente, reflejando una pérdida de rigidez del medio.

En el estado más seco, con una humedad gravimétrica de 26.51 %, los modelos tomográficos presentaron velocidades más altas, distribuidas de forma regular en todo el dominio. Este comportamiento corresponde a una matriz de suelo con alta succión matricial (1.09 MPa), dominada por microporos donde las fuerzas capilares entre partículas generan una alta cohesión aparente y una buena transmisión de la onda.

En el estado intermedio, con 44.13 % de humedad y una succión de 0.94 MPa, se evidenció una transición: las velocidades sísmicas comenzaron a disminuir, y en los modelos se observaron zonas lentas más extendidas, especialmente en el centro del bloque, asociadas a una redistribución más avanzada del agua. Este nivel de humedad se ubica en la zona de cambio entre la desaturación de los macroporos y la retención capilar en poros más finos.

En el estado más húmedo, con 50.47 % de humedad, la succión cayó a un valor cercano a 0.007 MPa, reflejando una condición próxima a la saturación completa. En esta situación, los modelos tomográficos presentaron zonas lentas bien definidas en el núcleo del dominio, asociadas a una pérdida marcada de rigidez del suelo por desaparición de las fuerzas capilares. La resistencia al corte no drenada también fue mínima (16 kPa), lo que coincide con el comportamiento esperado en suelos blandos saturados.

Para visualizar esta evolución, se incorporaron los tres estados hídricos del experimento en una curva de retención de agua de referencia correspondiente a un suelo residual con alta proporción de caolinita, presentada en la Figura 17. Esta curva, tomada de Otálvaro et al. (2016), muestra cómo varía la succión en función del contenido de agua del suelo, reflejando el paso de un dominio estructural seco a uno saturado.

En la figura, se han superpuesto los tres puntos experimentales con estrellas codificadas por color:

- **Estrella roja:** humedad 26.51 %, succión 1.09 MPa, resistencia no drenada 102 kPa.
- **Estrella verde:** humedad 44.13 %, succión 0.94 MPa, resistencia 30 kPa.
- **Estrella azul:** humedad 50.47 %, succión 0.007 MPa, resistencia 16 kPa.

Estas ubicaciones permiten contextualizar los resultados obtenidos dentro de un marco conceptual ampliamente aceptado para suelos parcialmente saturados. Se confirma que las velocidades sísmicas pueden funcionar como un indicador indirecto del estado hídrico y mecánico del suelo, especialmente si se cuenta con curvas de calibración o referencia como esta.

En los ensayos 3 y 5, que se realizaron sin permitir el tiempo completo de redistribución, se identificaron zonas extensas con velocidad cero en los modelos tomográficos. Este patrón evidencia que la acumulación localizada de agua sin redistribuir puede anular la propagación sísmica en ciertas regiones, sin que esto implique necesariamente un aumento uniforme de

humedad en todo el dominio. En el caso del ensayo 7, realizado en condición seca, las zonas con velocidad nula reflejan la desconexión física del medio por la ausencia de humedad, lo cual afecta severamente la transmisión sísmica.

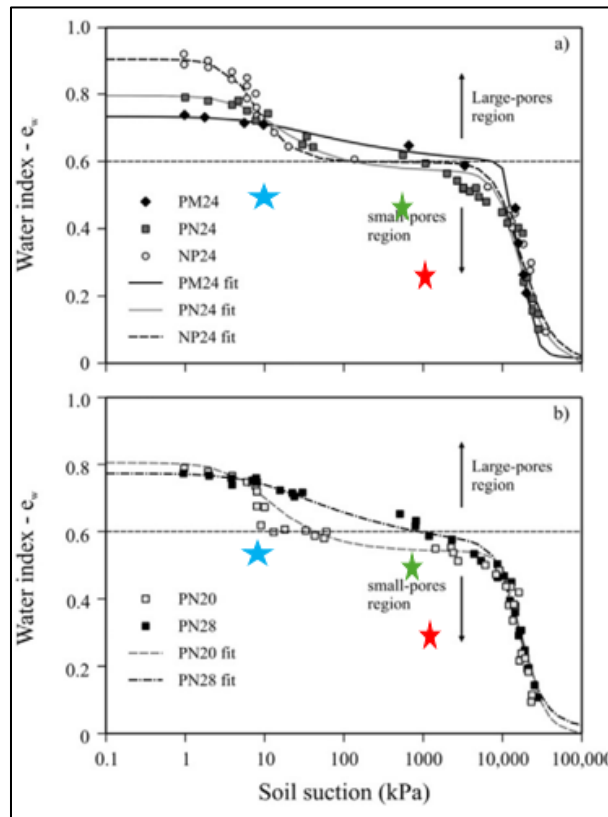


Figura 17. Curva de retención de agua para un suelo residual con alta proporción de caolinita.

Fuente: Otálvaro, I. F., Cordão Neto, M. P., Delage, P., & Caicedo, B. (2016). *Engineering Geology*, 205, 73–80.

### 5.3.2. Relación entre resistencia al corte, succión y velocidad sísmica

La pérdida de rigidez del caolín con el incremento de humedad fue confirmada mediante la integración de los datos de resistencia no drenada, succión matricial y velocidad sísmica. Esta sección consolida esa relación, usando una curva de referencia de succión vs. resistencia para validar el comportamiento observado.

Los ensayos de veleta mostraron una disminución progresiva de la resistencia al corte no drenada, desde 102 kPa en el estado seco, hasta 30 kPa en humedad intermedia y 16 kPa en el estado más húmedo. Esta pérdida de resistencia coincidió con una disminución en la succión matricial, medida

con el WP4-T, desde 1.09 MPa hasta valores cercanos a 0.007 MPa. A nivel sísmico, los modelos tomográficos en estos estados mostraron una caída en la velocidad de propagación, especialmente en zonas centrales del dominio.

Para contextualizar estos resultados, se recurrió a la curva teórica de succión vs. resistencia no drenada tomada de *Unsaturated Soils: Research and Applications 1* (Springer), ampliamente utilizada en suelos parcialmente saturados. En dicha curva, se incorporaron los tres puntos experimentales con estrellas codificadas por color, ya introducidas en la sección 5.3.1:

- **Estrella roja:** 26.51 % humedad, 1.09 MPa succión, 102 kPa resistencia.
- **Estrella verde:** 44.13 % humedad, 0.94 MPa succión, 30 kPa resistencia.
- **Estrella azul:** 50.47 % humedad, ~0.007 MPa succión, 16 kPa resistencia.

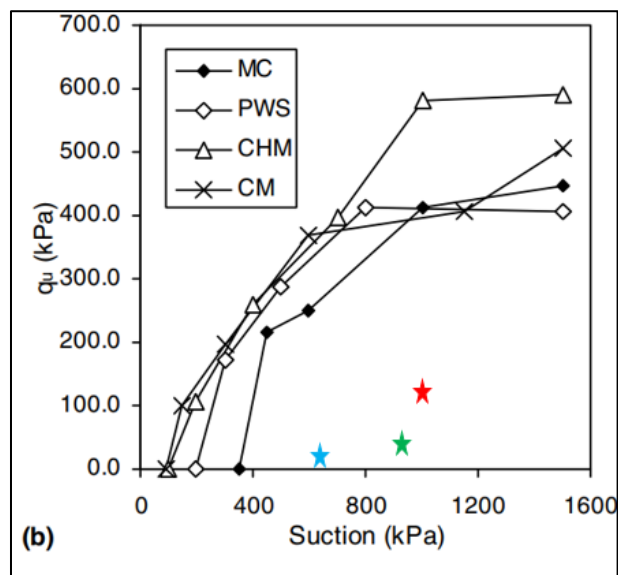


Figura 18. Relación típica entre succión y resistencia no drenada ( $q_u$ ) en suelos parcialmente saturados.

Fuente: *Unsaturated Soils: Research and Applications 1*. Springer.

La figura muestra que los tres estados del bloque de caolín se alinean con la tendencia esperada: a menor succión (mayor humedad), la resistencia disminuye de forma no lineal. La estrella azul, correspondiente al estado más húmedo, se sitúa en la zona de saturación total, donde el suelo pierde rigidez estructural y las ondas sísmicas se propagan más lentamente.

Esta comparación corrobora que la velocidad sísmica reconstruida en cada ensayo no solo refleja la estructura física del medio, sino también su estado tensional e hidromecánico. En particular, las zonas de menor velocidad coinciden con condiciones de baja resistencia y succión, validando el uso de la tomografía como herramienta para inferir indirectamente la estabilidad del suelo bajo condiciones variables de humedad.

### **5.3.3. Interpretación en el marco de la mecánica de suelos no saturados**

El comportamiento integrado observado a lo largo de los ensayos puede explicarse adecuadamente mediante el marco conceptual de Fredlund y Rahardjo (1993), en el que la succión matricial se considera una variable de estado adicional que incrementa la cohesión aparente del suelo. En estados secos, las fuerzas capilares mantienen unidas las partículas, favoreciendo una mayor resistencia al corte y facilitando una propagación más eficiente de las ondas sísmicas. A medida que el contenido de agua aumenta, estas fuerzas se reducen progresivamente hasta desaparecer en condiciones de saturación, lo que se traduce en una pérdida de rigidez estructural, disminución de la velocidad de onda y reducción de la capacidad de carga del medio.

No obstante, los resultados también muestran que el contenido absoluto de humedad no es el único factor determinante. La redistribución interna del agua, gobernada por el gradiente de cabeza hidráulica y la permeabilidad del caolín, demostró ser igual o más importante para garantizar modelos tomográficos estables y físicamente consistentes. Los ensayos 3 y 5, realizados con tiempos insuficientes de redistribución, presentaron artefactos, velocidades extremas e inconsistencias estructurales, evidenciando que el sistema no había alcanzado el equilibrio hídrico. En contraste, los modelos obtenidos en los ensayos 1, 2, 4 y 6, con redistribución cuasi-estacionaria, ofrecieron imágenes coherentes con la estructura interna del medio y con su comportamiento mecánico esperado.

Desde esta perspectiva, la imagen tomográfica obtenida mediante tiempos de viaje no debe interpretarse simplemente como una geometría de velocidades, sino como una manifestación del estado hidro-mecánico del suelo. El campo de velocidades reconstruido integra la influencia de la succión, el contenido de agua y la estructura interna, reflejando de manera indirecta el grado de rigidez y estabilidad del medio. En este sentido, la tomografía sísmica puede ser utilizada como un



mapa tridimensional del estado tensional del suelo parcialmente saturado, útil tanto para la caracterización como para el monitoreo de estructuras geotécnicas expuestas a variabilidad hídrica.

#### **5.4. Aplicaciones prácticas y limitaciones del sistema experimental**

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten proyectar la utilidad de la tomografía sísmica como una herramienta de diagnóstico no destructivo en suelos arcillosos parcialmente saturados. La sensibilidad observada ante cambios en el contenido y redistribución de humedad sugiere que esta técnica puede aplicarse al monitoreo geotécnico en contextos reales, como taludes, rellenos, subrasantes o plataformas compactadas, donde la acumulación localizada de agua puede comprometer la estabilidad estructural.

En particular, la identificación de zonas internas con velocidades significativamente menores, asociadas a baja rigidez y alto contenido de agua, constituye una forma indirecta de detectar áreas potencialmente inestables sin necesidad de recurrir a métodos intrusivos. Esta capacidad diagnóstica es especialmente valiosa en etapas de inspección temprana, mantenimiento preventivo o vigilancia estructural, donde no siempre es viable perforar o excavar para obtener muestras. La posibilidad de integrar modelos de velocidad con datos independientes de succión y resistencia permite interpretar las tomografías como mapas del estado hidromecánico del suelo, una ventaja significativa frente a mediciones puntuales.

Sin embargo, el experimento presenta limitaciones que deben ser tenidas en cuenta antes de extender su aplicación a campo. La primera corresponde a la escala reducida del modelo físico, que, si bien permite un control riguroso de variables, no reproduce completamente los mecanismos tridimensionales de flujo ni las condiciones límite de estructuras reales. Adicionalmente, la adquisición de datos se realizó de forma manual y no automatizada, tanto para la generación del pulso sísmico como para la activación del sistema de registro. Esto introduce incertidumbre en los tiempos de llegada debido a diferencias no controladas en el inicio de cada medición.

Por otra parte, el modelo numérico utilizado en la inversión parte del supuesto de trayectorias rectas e isotropía, lo que simplifica la física de propagación en medios con posibles anisotropías inducidas por la compactación o por gradientes de humedad. Además, al considerar únicamente tiempos de llegada como dato de entrada, se desaprovecha la información contenida en la amplitud, forma y

dispersión de la onda. Estas simplificaciones limitan la sensibilidad del modelo frente a variaciones más sutiles del medio.

Para superar estas limitaciones, se recomienda que futuros estudios avancen hacia la automatización total del sistema de adquisición, incluyendo un generador sísmico controlado electrónicamente, sincronización digital de señales y un mayor número de sensores. Igualmente, la incorporación de otros métodos geofísicos complementarios, como resistividad eléctrica o GPR, permitiría validar y enriquecer los resultados sísmicos. En el ámbito numérico, sería deseable implementar algoritmos de inversión que consideren trayectorias curvas, anisotropía o regularización basada en propiedades físicas del suelo.

La experiencia adquirida en este experimento sienta las bases para escalar la técnica a contextos reales, conservando su fortaleza como herramienta no destructiva, rápida y económicamente viable para caracterizar la estabilidad de suelos parcialmente saturados en función de su respuesta sísmica.

### **5.5. Evaluación de la resolución mediante prueba tipo checkerboard**

La interpretación de cualquier modelo tomográfico requiere una evaluación previa de su resolución espacial. Para ello, se implementó una prueba tipo checkerboard, en la que se impusieron variaciones sintéticas alternadas de velocidad sobre la misma malla utilizada en los ensayos reales. Esta prueba consistió en simular los tiempos de llegada desde un modelo con patrones conocidos, y luego invertir estos datos como si fueran reales, aplicando exactamente el mismo algoritmo utilizado para los ensayos experimentales.

Se diseñaron dos configuraciones: una con bloques de una celda de lado, que representa un patrón de alta frecuencia espacial, y otra con bloques de cuatro por cuatro celdas, de menor frecuencia. En ambos casos, las velocidades alternaban un veinte por ciento por encima y por debajo del valor medio de doscientos cincuenta metros por segundo. Esta configuración buscaba determinar qué tan bien el sistema podía resolver estructuras internas con distintas escalas espaciales.

Los resultados demostraron que el sistema tiene limitaciones importantes. El patrón de alta frecuencia no pudo ser recuperado. La reconstrucción fue prácticamente nula y solo se observó una región central uniforme sin correspondencia con el patrón impuesto. Para el patrón más amplio, la

recuperación mejoró ligeramente, pero aún se observaron grandes diferencias entre el modelo original y el reconstruido. Las anomalías recuperadas no coincidieron en forma ni en ubicación con las que fueron introducidas inicialmente.

La interpretación de estos resultados es clara. El sistema experimental y numérico implementado solo tiene capacidad resolutive confiable en el volumen central del dominio, donde la densidad de trayectorias fuente–receptor es más alta y las direcciones de propagación son diversas. Las regiones cercanas a las esquinas y los bordes presentan baja cobertura, lo que se traduce en una resolución deficiente. Además, al depender exclusivamente de los tiempos de llegada, se pierde información valiosa sobre amplitudes, dispersión y forma de onda, lo que limita la sensibilidad del modelo inverso ante variaciones más sutiles en el medio.

Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la interpretación general de los modelos experimentales. Aunque las imágenes tomográficas obtenidas en los ensayos sísmicos pueden reflejar de manera confiable ciertas zonas de baja velocidad asociadas a acumulación de humedad, esta confiabilidad está restringida a regiones bien cubiertas por trayectorias. Cualquier interpretación fuera de estas áreas debe considerarse con precaución.

Finalmente, la prueba checkerboard evidencia que para mejorar la capacidad resolutive del sistema sería necesario ampliar la red de sensores, diversificar la ubicación de las fuentes, e incluso considerar un modelo tridimensional o incluir información adicional como amplitudes o registros multicomponente. Este tipo de validación no solo permite delimitar el alcance de los resultados actuales, sino que también orienta de forma concreta los pasos a seguir en futuras investigaciones.

## 6. Conclusiones y alcances del estudio

Este estudio demostró la viabilidad de aplicar tomografía sísmica de ondas directas en un modelo físico de laboratorio constituido por caolín compactado, con el propósito de analizar la relación entre la propagación de ondas y el estado hídrico del medio. A través de un diseño experimental controlado, se desarrollaron ensayos en condiciones variables de humedad, incorporando mediciones geotécnicas clave y simulaciones numéricas con PyKonal, lo que permitió reconstruir modelos de velocidad espacialmente distribuidos e interpretar sus variaciones con base en principios hidromecánicos.

Se identificó una correlación inversa entre el contenido de humedad y la velocidad de propagación sísmica. En los estados más secos, las velocidades fueron altas y el modelo tomográfico mostró una estructura homogénea, mientras que en condiciones de mayor humedad se observaron zonas lentas bien definidas, correspondientes a una disminución en la rigidez del material. Esta relación fue confirmada mediante ensayos de succión y veleta, que evidenciaron una pérdida progresiva de resistencia al corte y tensión matricial conforme aumentó el contenido de agua. La tomografía sísmica se valida, así como un método indirecto y no invasivo para evaluar el estado tensional en suelos parcialmente saturados, en coherencia con la teoría de Fredlund y Rahardjo.

Estos hallazgos se vieron reflejados en los modelos tomográficos con zonas de velocidad nula, tanto por acumulación de agua sin redistribuir como por pérdida total de rigidez en condiciones secas. Esta sensibilidad del sistema refuerza el valor de la tomografía sísmica como herramienta indirecta para identificar estados hidromecánicos críticos en suelos finos.

Además del volumen de agua, el tiempo de redistribución hídrica previo a la medición fue determinante. Los ensayos realizados tras alcanzar un equilibrio estimado por gradiente hidráulico produjeron modelos coherentes, mientras que aquellos con redistribución incompleta mostraron artefactos, dispersión e inconsistencias numéricas. Este hallazgo refuerza la necesidad de considerar no solo el contenido de humedad, sino también su distribución interna antes de realizar una adquisición sísmica.

La validación del modelo numérico a través de simulaciones directas mostró una buena correspondencia entre los tiempos simulados y observados, aunque los errores se incrementaron en

las zonas de baja cobertura angular. Las trayectorias se concentraron en la región central del dominio, donde la resolución fue mayor, pero decreció hacia los bordes, limitando la capacidad de detección de anomalías en esas zonas. La prueba checkerboard confirmó que el sistema actual solo puede resolver estructuras de gran escala y no es capaz de recuperar patrones con alta frecuencia espacial, incluso cuando estos se amplían a varios bloques.

La integración de datos sísmicos con resultados geotécnicos permitió establecer relaciones cuantitativas entre velocidad, humedad, succión y resistencia. Los resultados experimentales se ubicaron dentro de curvas de retención y de resistencia típicas para suelos con alta proporción de caolinita, lo que demuestra la validez física del modelo y permite extender este enfoque a otros suelos finos parcialmente saturados. Esta combinación metodológica refuerza la utilidad de la tomografía como herramienta de diagnóstico multitécnico.

Desde una perspectiva aplicada, esta técnica ofrece un gran potencial para el monitoreo no destructivo de taludes, rellenos, cimentaciones y estructuras construidas sobre suelos sensibles a la variación hídrica. La posibilidad de detectar zonas blandas o pérdida de rigidez antes de que ocurran manifestaciones superficiales convierte a la tomografía sísmica en una herramienta preventiva valiosa, especialmente si se complementa con sensores convencionales o sistemas de adquisición continua.

Metodológicamente, este estudio sienta las bases para integrar tomografía sísmica con modelos hidromecánicos en medios parcialmente saturados. Se propone una estrategia replicable que combina diseño experimental riguroso, análisis numérico y validación geotécnica. Aunque el modelo físico tiene limitaciones de escala, control ambiental y cobertura, los resultados obtenidos abren la posibilidad de extender este enfoque a condiciones reales mediante pruebas piloto en campo. La automatización del sistema de adquisición, la incorporación de fuentes sísmicas controladas y la inversión de más tipos de datos constituyen mejoras futuras viables.

En conclusión, esta investigación demuestra que la velocidad sísmica puede ser interpretada como un reflejo del estado tensional del suelo, y que su variación contiene información valiosa sobre la humedad, la rigidez y la estabilidad del medio. Este enfoque puede contribuir al desarrollo de nuevas herramientas en geotecnia predictiva, enfocadas en la prevención de fallas inducidas por cambios hídricos en suelos finos de baja permeabilidad.

## 7. Referencias

- García Aráoz, E., Rinaldi, V. A., Molina, G. R., & Ciocale, M. A. (s.f.). Aplicación de la tomografía sísmica para la evaluación de los parámetros geomecánicos y geoestructurales de un macizo rocoso. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad Nacional de Córdoba (UNC)*.
- Ghasemzadeh, H., Sojoudi, M. H., Ghoreishian Amiri, S. A., & Karami, M. H. (2017). Elastoplastic model for hydro-mechanical behavior of unsaturated soils. *Soils and Foundations*, 57(3), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.05.005>
- Heincke, B., Maurer, H. R., Green, A. G., Willenberg, H., Spillmann, T., & Burlini, L. (2006). Characterizing an unstable mountain slope using shallow 2D and 3D seismic tomography. *Geophysics*, 71(6), B241–B256. <https://doi.org/10.1190/1.2338333>
- Otálvaro, I. F., Cordão Neto, M. P., Delage, P., & Caicedo, B. (2016). Relationship between soil structure and water retention properties in a residual compacted soil. *Engineering Geology*, 205, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.016>
- Pérez Jaimes, L. F. (s.f.). Modelación física del comportamiento de suelos expansivos en presencia de áreas impermeables superficiales mediante la cámara climática (Trabajo de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia).
- Poveda, E., Monsalve, G., Julià, J., & Pedraza, P. (2023). Radial and azimuthal seismic anisotropy in NW South America: Insights into crustal deformation and mantle flow using ambient noise and surface wave tomography. *Journal of South American Earth Sciences*, 121, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104606>
- Qi, Y. (2021). Multi-stencils fast marching method for factored eikonal equations with quadratic anisotropy. *Applied Mathematics and Computation*, 401, 126776. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126776>
- Rawlinson, N., Pozgay, S., & Fishwick, S. (2009). Seismic tomography: A window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 178(3–4), 101–135. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.10.002>

- Rawlinson, N., & Spakman, W. (2016). On the use of sensitivity tests in seismic tomography. *Geophysical Journal International*, 205(2), 1221–1243. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw084>
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, 61(4), 313–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.4.313>
- White, M. C. A., Fang, H., Nakata, N., & Ben-Zion, Y. (2020). PyKonal: A Python package for solving the Eikonal equation in spherical and Cartesian coordinates using the Fast Marching Method. *Seismological Research Letters*, 91(4), 2378–2389. <https://doi.org/10.1785/0220190318>
- Whiteley, J. S., Chambers, J. E., Uhlemann, S., Boyd, J., Cimpoiasu, M. O., Holmes, J. L., Inauen, C. M., Watlet, A., Hawley-Sibbett, L. R., Sujitapan, C., Swift, R. T., & Kendall, J. M. (2020). Landslide monitoring using seismic refraction tomography – The importance of incorporating topographic variations. *Engineering Geology*, 268, 105525. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105525>
- Xia, J., Yang, D., & Tong, P. (2024). A high-efficiency parallel fast marching method for large-scale seismic tomography in three-dimensional spherical coordinates. *Computers & Geosciences*, 183, 105841. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105841>
- Yang, H., Duan, H. F., Zhu, J., & Zhao, Q. (2024). Water effects on elastic S-wave propagation and attenuation across single clay-rich rock fractures: Insights from ultrasonic measurements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57, 2645–2659. <https://doi.org/10.1007/s00603-023-03712-6>
- Zhang, Z., Hu, J., & Zhang, X. (2022). Experimental characterization of the seismic responses of silt-interlayered stratified sandy tailings slopes using centrifuge shaking table tests. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article ID 4856800. <https://doi.org/10.1155/2022/4856800>
- Zhao, D. (2015). *Multiscale seismic tomography*. Springer Geophysics. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55360-1>

## 8. Anexos