

# ESTUDIO DEL EFECTO DE MEJORA DEL TERRENO CON INYECCIONES POR TUBO MANGUITO EN UN TERRAPLÉN FERROVIARIO A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LOS MÓDULOS DINÁMICOS UTILIZANDO EL MÉTODO SÍSMICO DE POZO CROSS-HOLE

JOAQUIN DORRONSORO<sup>1</sup> & CHRISTIAN MERINO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orbis Terrarum Projects. Departamento de Geofísica Aplicada.

## Resumen

*En el presente proyecto se llevaron a cabo ensayos de sismica en pozo Cross-Hole, con el fin de investigar la eficacia de un tratamiento de inyecciones por tubo manguito de un terraplén que experimentaba asentamientos en el norte de España. Se realizaron seis sondeos y se evaluó el comportamiento dinámico a partir de la estimación de los módulos dinámicos y del coeficiente de Poisson antes y después de la ejecución de las inyecciones que se realizaron como solución geotécnica a su patología. Se determinó que el método empleado resultó positivo y se precisó que el tratamiento se mostró más efectivo a profundidad. El relleno de terraplén se caracterizó tras las inyecciones con una ligera disminución del coeficiente de Poisson  $\nu$  del 4,0%, los módulos dinámicos ( $G_0$ ,  $E_0$  y  $K_0$ ) se duplicaron y, las velocidades  $V_P$  y  $V_S$  se incrementaron en un 53,0% y 90,0%. Para el Cuaternario coluvial se registraron decensos del coeficiente de Poisson del 2,0%, los módulos dinámicos ( $G$ ,  $E$  y  $K$ ) triplicaron sus valores y las velocidades sísmicas  $V_P$  y  $V_S$  mejoraron en un 69,0% y 75,0%.*

## I. INTRODUCCIÓN

EL método de sismica en pozo Cross-Hole se basa en provocar una señal sísmica en un sondeo. Se registran ondas P y S mediante un geófono triaxial que se sitúa en un sondeo próximo. El punto donde se produce la señal y el punto donde se localiza el receptor se deben encontrar a la misma profundidad. Este proceso se repite desplazando tanto la fuente como el geófono a pequeños intervalos a lo largo de los dos sondeos, generalmente, desde la boca hasta el fondo.

La señal sísmica genera tanto ondas compresionales como de cizalla; estas últimas se deben controlar cambiando su polaridad para facilitar la identificación de sus primeras llegadas en los sismogramas.

El análisis y el procesado se limita a determinar los valores de las velocidades  $V_P$  y  $V_S$  del terreno a cada profundidad de ensayo. Esto mediante el cociente entre la distancia emisor-receptor y el tiempo invertido de las primeras llegadas de

los trenes de onda. Su mayor dificultad se centra en la correcta identificación de las primeras llegadas de las ondas S.

El procesado de la señal asume que la transmisión de las ondas es directa, es decir, sin sufrir refracciones o reflexiones, de manera que, resulta necesario que los dos sondeos se localicen muy próximos entre sí. La distancia máxima recomendable es del orden de cinco (5) metros (Standard, 2004), en función de la normativa de referencia ASTM D 4428/D 4428M.

En el presente estudio se llevaron a cabo dos campañas de mediciones de sismica de pozo Cross-Hole: una previa a las inyecciones y otra posterior a su ejecución. Se perforaron seis (6) sondeos con el fin de investigar la eficiencia del tratamiento de inyecciones mediante la comparación de los módulos dinámicos de un terraplén que experimentaba asentamientos al norte de España.

## II. METODOLOGÍA

Para que la generación, transmisión y registro de ondas resultaran efectivos, se requirió que la ejecución y cementación de los sondeos fuese de alta calidad. Por esto, se cumplieron las recomendaciones generales de la norma ASTM D 4428/D 4428M (Standard, 2004):

- Tras la perforación del sondeo se realizó la instalación de tubería ciega de PVC de alta presión y diámetro útil de tubería 3", con inyección de lechada de cemento del espacio entre la perforación y la tubería, e instalar un tapón de fondo.
- La inyección de la lechada se realizó de abajo hacia arriba para asegurar un buen acople entre la tubería y las paredes del sondeo.
- Se protegió con una tapa metálica en la superficie y, se aseguró que el sondeo se mantuviera seco.

Para conocer las propiedades de compacidad y rigidez de los materiales en profundidad mediante el cálculo de los módulos dinámicos se realizaron tres (3) ensayos Cross-Hole. El equipo que se

empleó para la toma de datos en la campaña sísmica fue un sismógrafo PASI modelo GEA24 de 24 canales.

Las componentes que se utilizaron para la ejecución de las campañas se expresan a continuación.

- 1 geófono triaxial de GFA-60 en el interior del sondeo receptor.
- 1 Fuente de emisión electromecánica de energía CHE-50 en el sondeo emisor.
- Medidas cada 1 m de profundidad con 4 disparos ortogonales por medida.

Se expresa en la tabla 1, un resumen de los sondeos, su separación y la profundidad máxima de los ensayos realizados.

**Tabla 1:** Datos de los ensayos realizados.

CrossHole	Sondeo	Separación entre sondeos (m)	Profundidad Máxima (m)
CH-01	S-01	5,00	20,00
	S-02		20,00
CH-02	S-03	4,92	15,00
	S-04		15,00
CH-03	S-05	4,75	7,20
	S-06		7,20



(a) Abril 2019



(b) Diciembre 2019

**Figura 1:** Ejecución del Cross-Hole CH-01 por Orbis Terrarum antes y después de las inyecciones.

Se procesaron los datos haciendo uso del software ReflexWin con el que se obtuvieron los sismogramas, se calcularon las velocidades de las ondas prima-

rias y secundarias y, se determinaron los parámetros elásticos a partir de las expresiones que se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2:** Expresiones utilizadas para el cálculo de los módulos dinámicos. Modificado de Jia y Jia (2018).

Parámetro	Modelo elástico	En función de $V$
Módulo de Young $E$	$E = 2G \cdot (1 + \nu)$	$E = 2V_S^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)$
Módulo de Corte $G$	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	$G = V_S^2 \cdot \rho$
Módulo de Bulk $K$	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$K = \rho \cdot (V_P^2 - \frac{4}{3} \cdot V_S^2)$
Coefficiente de Poisson $\nu$	$\nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$	$\nu = \frac{\left(\frac{V_P^2}{V_S^2}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\left(\frac{V_P^2}{V_S^2}\right)^2 - 1\right)}$

Posteriormente, se bosquejaron las propiedades medidas del terreno con el software Surfer en su versión 14.

Para el cálculo de los módulos dinámicos, no así para el coeficiente de Poisson  $\nu$ , se precisaron datos de densidad. Por esto, se utilizaron como valores previos a la inyección (abril) los descritos por los ensayos directos del estudio geotécnico y, posterior a las inyecciones (diciembre), se consideró un incremento del 10% de las densidades originales como consecuencia de la inyección de la lechada de cemento.

De esta manera, se consideraron los siguientes valores de densidad aparente para las unidades geotécnicas supuestas:

**CH-01:**

- Relleno de terraplén:  
 $\rho_{abril} = 2170 - 1980 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2387 - 2178 \text{ kg/m}^3$
- Cuaternario coluvial:  
 $\rho_{abril} = 2070 - 2011 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2277 - 2212 \text{ kg/m}^3$

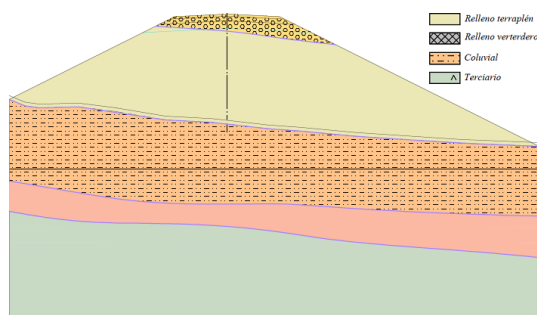
**CH-02:**

- Relleno de terraplén:  
 $\rho_{abril} = 2070 - 2160 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2277 - 2376 \text{ kg/m}^3$
- Cuaternario coluvial:  
 $\rho_{abril} = 2070 - 2011 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2277 - 2212 \text{ kg/m}^3$

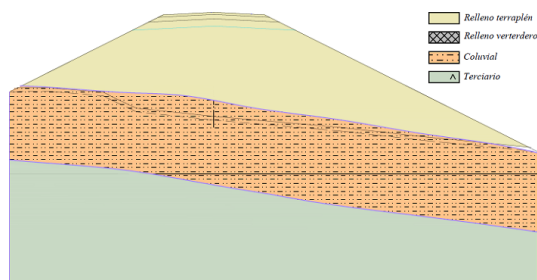
**CH-03:**

- Relleno de terraplén:  
 $\rho_{abril} = 2140 - 2170 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2354 - 2387 \text{ kg/m}^3$

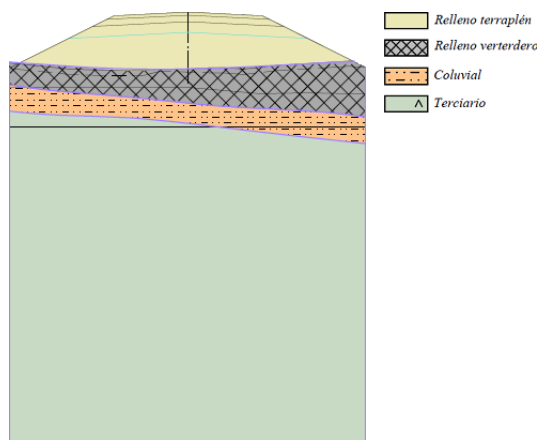
- Relleno de vertedero:  
 $\rho_{abril} = 2070 - 2110 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2277 - 2321 \text{ kg/m}^3$
- Cuaternario coluvial:  
 $\rho_{abril} = 2110 \text{ kg/m}^3$   
 $\rho_{diciembre} = 2321 \text{ kg/m}^3$



**Figura 2:** Perfil longitudinal del terraplén donde se localizó el CH-01.



**Figura 3:** Perfil longitudinal del terraplén donde se localizó el CH-02.



**Figura 4:** Perfil longitudinal del terraplén donde se localizó el CH-03.

### III. RESULTADOS

#### Velocidades sísmicas

Se presenta a continuación en la figura 5 cuatro perfiles en los que se representan las distintas velocidades medidas, tanto antes de las inyecciones ( $V_P$  y  $V_S$  Abril) como después de ellas ( $V_P$  y  $V_S$  Diciembre).

Cabe destacar que los datos brutos obtenidos en el ensayo CH-01 son nítidos, y en diciembre, en el CH-02 y CH-03 se evidenciaron dificultades para identificar las primeras llegadas de las ondas S. Esto se debe habitualmente al desplaza-

miento del encamisado por las inyecciones realizadas, las cuales llegaron a obturar los sondeos CH-02 (a 15 m de profundidad) y CH-03 (a 7,20 m de profundidad).

Al comparar los resultados obtenidos de los registros de velocidades de ambas campañas se evidenció un aumento significativo en los tres ensayos ejecutados. Dicho incremento se atribuye al efecto de mejora generado por la inyección de la lechada. Gracias a esto, el terraplén en cuestión incrementó su compacidad y rigidez y, por tanto se redujo el tiempo de transmisión de las perturbaciones a través de su paso por el material.

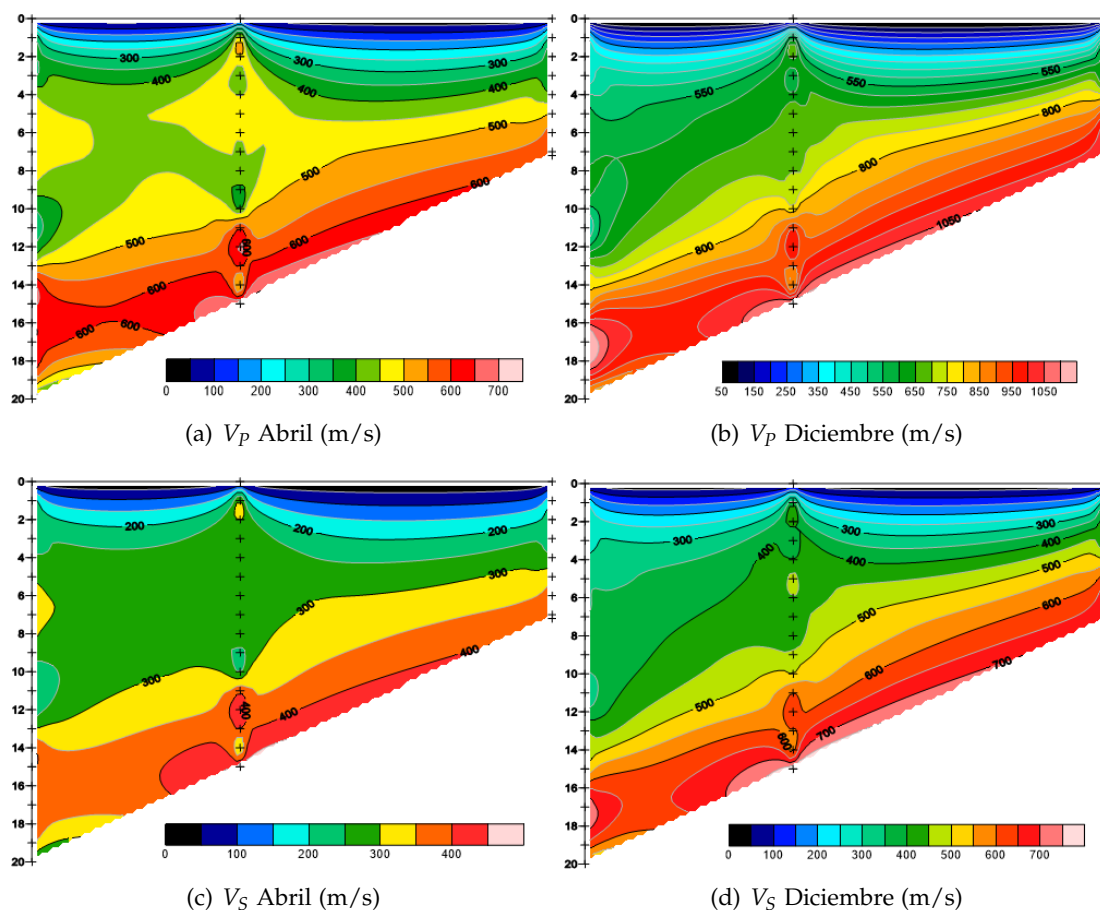


Figura 5: Comparación de las velocidades  $V_P$  y  $V_S$  de los pozos de abril a diciembre.

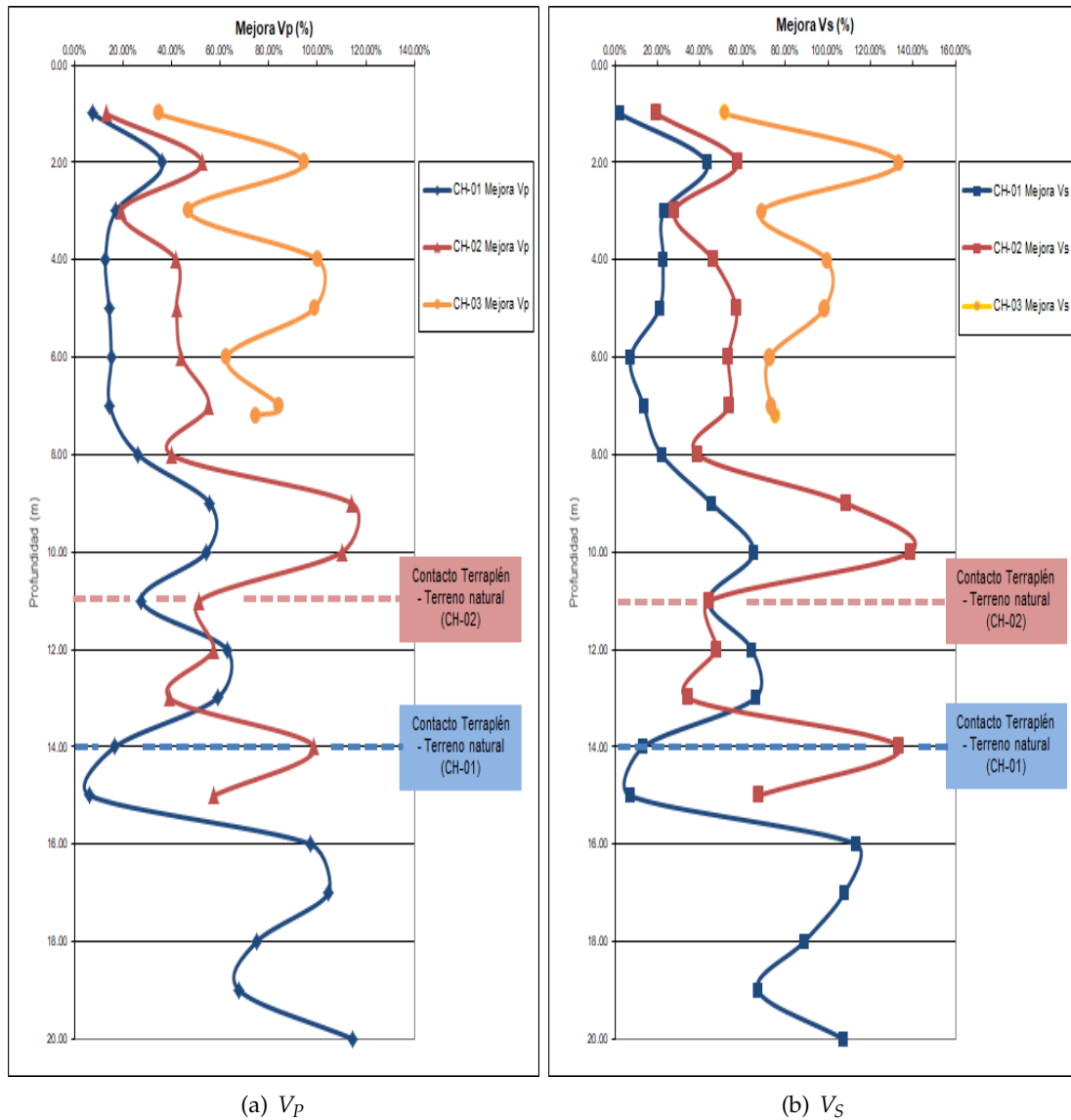
A continuación, se presentan los valores porcentuales correspondientes a la mejora de las velocidades entre ambas campañas (abril-diciembre) en función

de las profundidades registradas (ver figura 6).

En términos generales, el CH-01 obtuvo una mejora aproximada del 50%,

mientras que el CH-02 del 60% y, finalmente, el CH-03 fue el ensayo en el que se registraron mayores mejoras porcentuales (media 70%). Cabe destacar que

este último representó un mayor aumento debido que los datos de esta investigación abarcaron únicamente 7,20 metros por una obturación del sondeo.



**Figura 6:** Valores porcentuales correspondientes a la mejora de las velocidades  $V_p$  y  $V_s$ .

Se observa que entre uno y tres metros se distingue un aumento significativo y, posteriormente, un descenso en la mejora de las velocidades sísmicas  $V_p$  y  $V_s$ . Esto se atribuye a que en las zonas de tratamientos más cercanas a la superficie del terraplén la inyección de la lechada no resultó tan efectiva como se observa en profundidad, pues se limitan más las presiones del tratamiento para no rom-

per el terreno y, evitar posibles fugas de la mezcla. Por otra parte, se denota el contacto terraplén terreno natural a los 11 metros como consecuencia de la disminución paulatina de la densidad para el CH-02 y, por el mismo motivo para el primer ensayo a los 14 metros.

Tal y como se muestra en los perfiles de velocidad y en las gráficas de mejora (figuras 5 y 6), se logra apreciar duran-

te los primeros tres metros aumentos del 20% y 30% para los ensayos CH-01/CH-02 y 90% para el CH-03 de la  $V_S$ . Así, posteriormente a la inyección de la lechada la velocidad de la onda de cizalla  $V_S$  alcanzó los 300 m/s que según [Kulhawy y Mayne \(1990\)](#) puede atribuirse a un perfil de suelo duro o denso (medianamente rígido).

Entre los tres y los ocho metros se estimaron aumentos del 20%, 40% y 70% de la  $V_S$  en los ensayos ejecutados. La velocidad de la onda de cizalla alcanzó los 500 m/s lo cual se correlaciona con un perfil de suelo muy duro o muy denso/roca blanda.

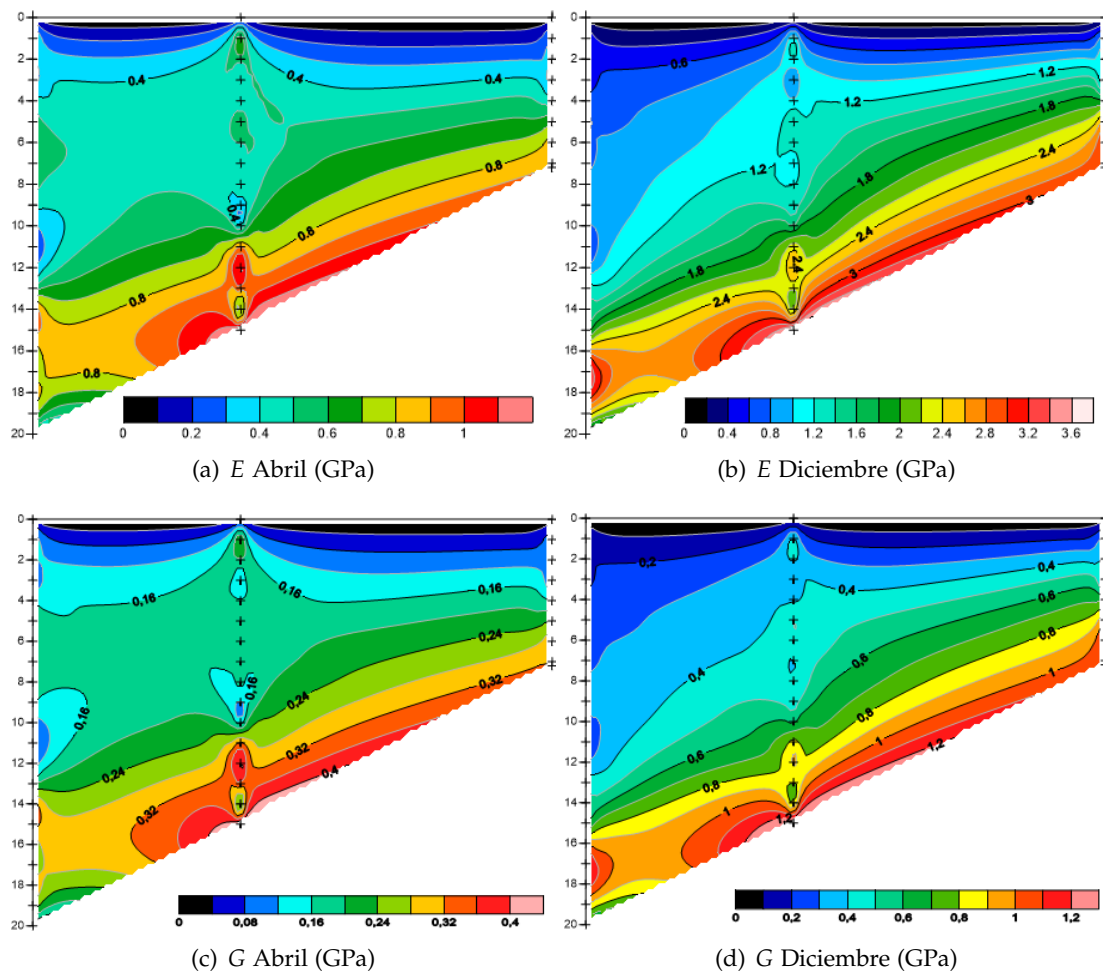
Finalmente, a partir de los 11 metros para el CH-02 y 14 metros para el CH-01, donde se localiza el contacto terraplén

con el terreno natural, se determinaron aumentos del 60% y 80% de la velocidad  $V_S$  para ambos ensayos. Se alcanzan valores iniciales de 500 m/s y llegan hasta 700 m/s lo cual puede asociarse a un perfil de roca blanda.

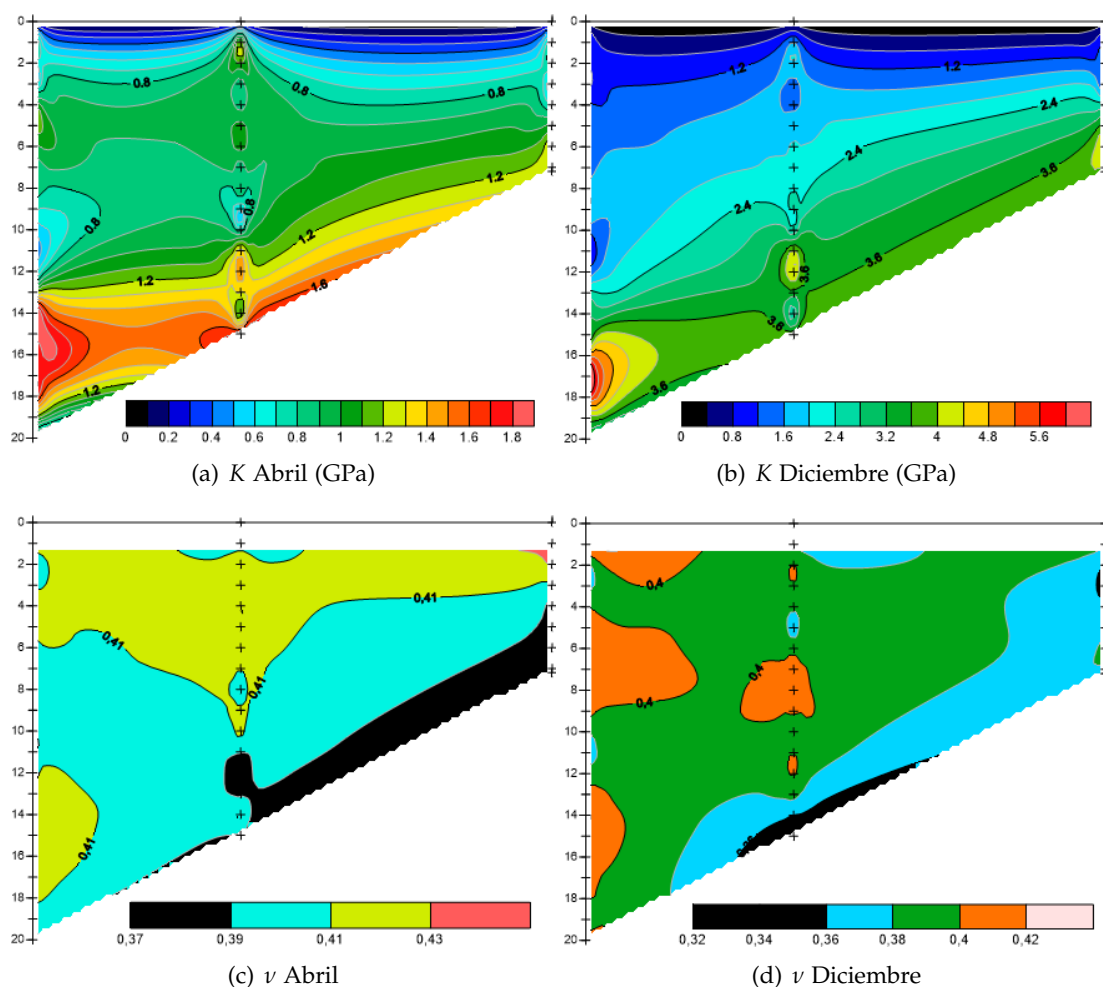
### Módulos dinámicos

A partir de los datos obtenidos, se calcularon los módulos de deformación dinámica ( $G_0$ ,  $E_0$ ,  $K_0$  y el coeficiente  $\nu$ ) con el fin de caracterizar el comportamiento elástico del terraplén para un rango de muy baja deformabilidad ( $< 10^{-4}\%$ ).

Se presentan a continuación las variaciones de los módulos elásticos obtenidos en función de la profundidad de cada sondeo (ver figuras 7 y 8).



**Figura 7:** Variación del módulo de Young ( $E$ ) y de rigidez ( $G$ ) antes y después de las inyecciones.



**Figura 8:** Variación del módulo de Bulk ( $K$ ) y del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) tanto antes como después de las inyecciones.

Al igual que en la sección anterior, se evidencia un incremento general de los módulos dinámicos calculados. Se observa que en los ensayos de la primera campaña no se caracteriza una tendencia clara respecto a los valores obtenidos, debido a la naturaleza anisotrópica y a la heterogeneidad de la composición del material del terraplén.

Consecuentemente posterior a la inyección de la lechada se observa una distribución uniforme y un aumento gradual de la rigidez y compacidad de las unidades tratadas. Gracias a esto, se comprueba que el tratamiento por inyecciones de tubo manguito resultó ser, en términos generales, eficiente como solución geotécnica sin que en este documen-

to se valore si es suficiente para el fin buscado.

Al evaluar los valores de los módulos dinámicos posterior al tratamiento, se evidencia la mayor efectividad de la campaña entre los 3 y 14 metros para el ensayo CH-01 y para los 11 metros en el CH-02; esto en comparación a los primeros metros para el relleno de terraplén en el que se destaca la poca variabilidad de las propiedades elásticas del material que compone el terreno.

No se observan variaciones significativas del coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Los valores de este parámetro varían entre 0,32 y 0,44 sin una tendencia clara y, al considerar los valores obtenidos y los propuestos por [Boiero y Rosales \(2016\)](#),

el material presente se relaciona con un sustrato denso tanto antes como después de la inyección de la lechada.

#### IV. CONCLUSIONES

El método sísmico cross-hole resultó ser una técnica eficiente para caracterizar el efecto de las inyecciones por tubo manguito de un terraplén ferroviario que presentaba asientos. Además, se manifestó como un método efectivo que ofrece información fiable sobre las velocidades de las ondas primarias y secundarias.

El relleno de terraplén se caracterizó tras las inyecciones con una ligera disminución del coeficiente de Poisson  $\nu$  del 4,0%, los módulos dinámicos ( $G$ ,  $E$  y  $K$ ) se duplicaron y, las velocidades  $V_P$  y  $V_S$  se incrementaron en un 53,0% y 90,0%.

Para el Cuaternario coluvial se registraron decensos del coeficiente de Poisson  $\nu$  del 2,0%, los módulos dinámicos ( $G$ ,  $E$  y  $K$ ) triplicaron sus valores y las velocidades sísmicas  $V_P$  y  $V_S$  mejoraron en un 69,0% y 75,0%.

Estos resultados se resumen en la tabla que se expresa a continuación (ver tabla 3).

**Tabla 3:** Porcentaje de mejora de las propiedades elásticas de cada unidad geotécnica.

Parámetro	Relleno de terraplén	Cuaternario coluvial
$G$	148,5 %	230,1 %
$E$	145,1 %	226,1 %
$K$	111,7 %	192,7 %
$V_P$	53,0 %	69,0 %
$V_S$	89,6 %	74,9 %
$\nu$	3,8 %	1,6 %

Se recomienda para futuros estudios con relación al tratamiento por inyecciones, la ejecución de ensayos de densidad tanto antes como después del tratamiento, para así reducir la incertidumbre con respecto al cálculo de los módulos dinámicos. Además, resulta importante reflejar la importancia de un correcto ce-

mentado del anillo anular de los sondeos.

Por otra parte, cabe resaltar la importancia de la utilización del método ejecutado para la estimación de las velocidades primarias y secundarias. A partir de la aplicación de ensayos cross-hole se consigue una muy buena resolución por intervalo medido y se garantiza en contraste a la sísmica de refracción convencional que, la onda directa se perciba por el geófono antes que la onda refractada. Por otra parte, en comparación a métodos como el ReMi, permite obtener registros sin depender de la presencia de ruido ambiental, pues la implementación de una fuente artificial para el análisis espectral de la técnica de microtemores limita la banda de frecuencias y por tanto dificulta su procesamiento e interpretación. No obstante, la técnica combinada de ReMi más sísmica de refracción es también muy útil cuando la rigidez aumenta en profundidad y no hay un estrato duro en superficie; además, este método combinado permitiría ahorrar costes por no necesitar de sondeos.

#### REFERENCIAS

- Boiero, A. y Rosales, C. (2016). Estimación de parámetros elásticos para el cálculo de asentamientos inmediatos en suelos friccionantes y cohesivos. *Boletín Técnico Sociedad Venezolana de Geotecnia (SVDG)*, pp. 1–7.
- Jia, J. y Jia (2018). *Soil dynamics and foundation modeling*. Springer.
- Konkov, A., Oshkin, A., Ragozin, N., Ignatev, V., y Ermakov, R. (2017). Cross-hole seismic testing on pressure and shear waves-an example of effective usage of the method. En *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, volumen 2017, pp. 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Kulhawy, F. H. y Mayne, P. W. (1990). *Manual on estimating soil properties*



- for foundation design. Technical report, Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell University, Ithaca.
- Sirles, P. C. y Veksne, A. (1990). Site-specific shear wave velocity determinations for geotechnical engineering applications. *Geotechnical and environmental geophysics*, 3:121–131.
- Standard, A. (2004). D4428/d4428m-07, 2007, standard test methods for cross-hole seismic testing. *astm international*, west conshohocken, pa, 2007, doi: 10.1520/d4428\_d4428m-07.
- Troncoso, J. (1979). Cross-hole and down-hole vs by mechanical impulse. *Journal of the geotechnical engineering division- asce*, 105(1):118–118.