PANGEA
GEOTECNIA

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA **GEOTECNIA MINERA**



PANGEA
GEOTECNIA

INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA **GEOTECNIA MINERA**

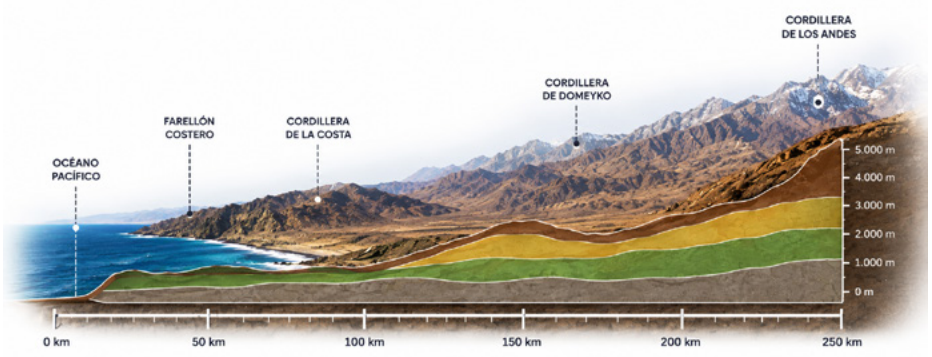


Del mar a la cordillera de Chile. © Pangea Geotecnia

Minería en Chile

En un perfil transversal típico del norte de Chile, se ascienden 5.000 metros en tan solo 250 km de ancho. Si se mide el ascenso geográfico en esa misma distancia a lo largo del río Támesis, se obtienen apenas 55 metros, y solo 30 metros en el río Misisipi. Geologías como las de estos ríos han moldeado la geotecnia actual, ya que este tipo de suelos predominan en países de Europa y Norteamérica, los cuales han financiado el desarrollo del conocimiento y la creación de equipos de laboratorio e in situ para su estudio.

Lamentablemente, la energía de depositación de esos suelos representa aproximadamente solo el 1 % de la energía presente en nuestras condiciones geográficas. Como resultado, los suelos finos suelen ser arrastrados hacia el mar, quedando principalmente partículas duras y gruesas. Esto, sumado a nuestra alta sismicidad y escasez de agua, implica que muchas veces las correlaciones y métodos internacionales no son aplicables a los suelos y rocas locales.



En resumen

1. Suelos europeos y de Norteamérica se depositaron en ambientes con 1% de nuestra energía (muy distintos).
2. Gran presencia de suelos duros y gruesos en Chile.
3. Escasez de agua en el norte de Chile.
4. Alta sismicidad.
5. Condiciones que requieren de métodos únicos y específicos para nuestra geología.

Simplificaciones típicas - SPT

¿Cómo se ha resuelto históricamente la caracterización de suelos en el mundo desarrollado?

El ensayo SPT es uno de los más antiguos y probablemente el más ampliamente utilizado.

Su gran ventaja es su simplicidad, pero no mide propiedades intrínsecas del suelo, sólo entrega información cualitativa. Una de las grandes debilidades de este método para suelos de la minería chilena es que generalmente se obtiene "rechazo" debido a la presencia de gravas o partículas cementadas. Esto implica que no se pueden obtener datos útiles para la etapa de ingeniería.

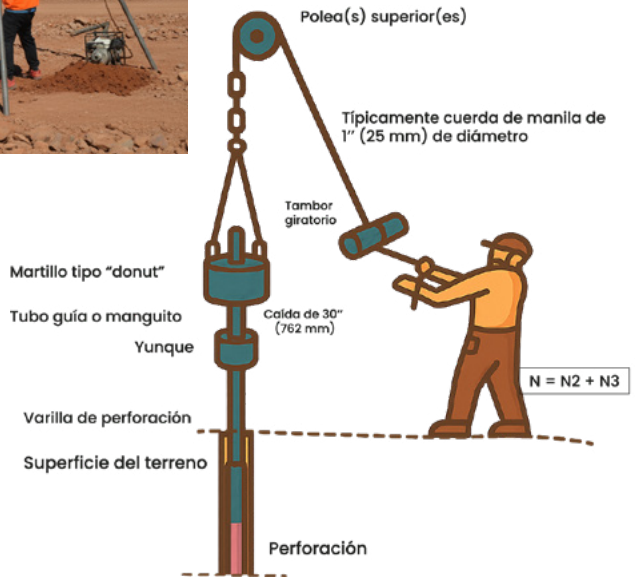
Simplificaciones - SPT

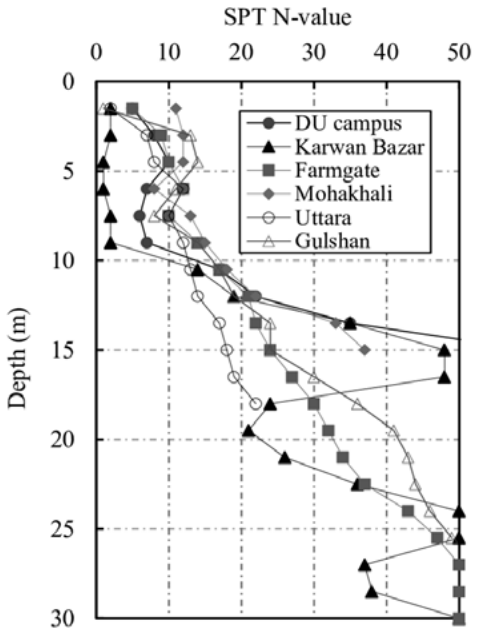
Para la construcción de correlaciones del ensayo SPT la práctica implica realizar el ensayo en un suelo con propiedades conocidas mediante ensayos de laboratorio tradicionales. Si se genera una base de datos de varios sitios se puede generar una regresión y construir la correlación.

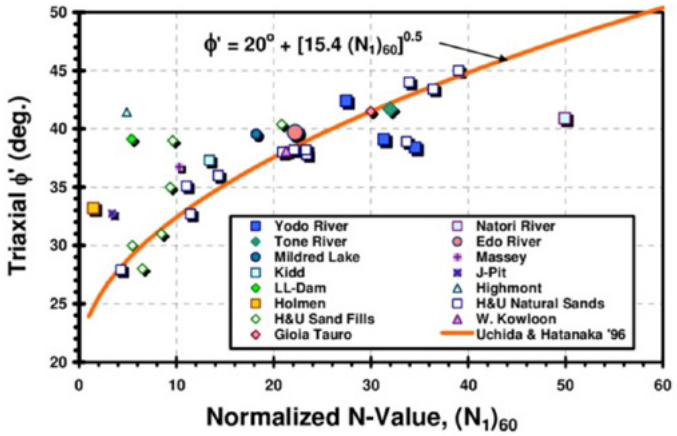
Estas ecuaciones agrupan datos de muchos sitios y países distintos, lo que genera que muchos datos escapen de la ecuación, ya sea sobreestimando o subestimando la regresión.

Lamentablemente, muchas veces los ingenieros no conocen el nivel de incertidumbre que esconden estas correlaciones.









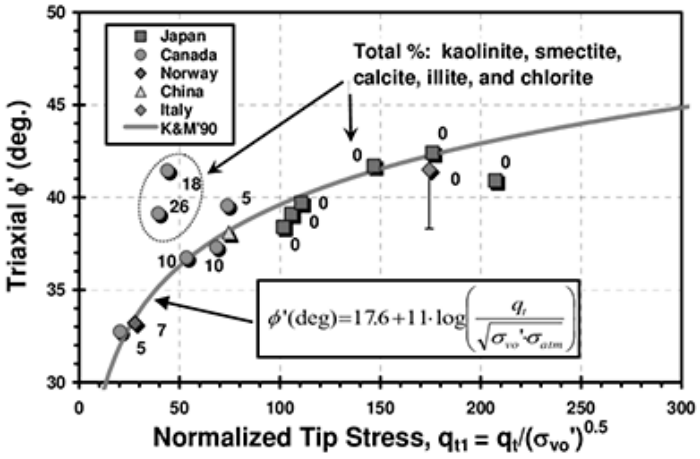
REFERENCIAS:

Fig. 1 y 2 : Ensayo SPT en terreno.
Fig. 3 : Gráfico típico de resultado de SPT en profundidad.
Fig. 4 : Gráfico esquemático de correlación del parámetro N_{160} con el ángulo de resistencia al corte, obtenido en ensayos triaxiales.

Simplificaciones - CPT

El ensayo CPT fue desarrollado en Los Países Bajos en los años 50, por lo que fue concebido para investigar probablemente uno de los ambientes de más baja energía de depositación que existen en el mundo (suelos muy blandos). Su gran ventaja es su velocidad de obtención de datos.
En la minería chilena este ensayo ha ganado su espacio en los tranques de relaves, ya que en general, los relaves son lo suficientemente blandos para permitir la ejecución del ensayo.

El CPT, al igual que el SPT, es un ensayo que no mide las propiedades intrínsecas del terreno y los resultados se basan en correlaciones. Además, el CPT y SPT generan altas deformaciones, por lo que están enfocados en medir las propiedades resistentes y no de deformación a cargas de servicio.



En resumen el **SPT y CPT**

1. Son correlaciones.
2. Enfocados en resistencia.
3. No enfocados en deformaciones.
4. No son para materiales duros.



Ensayos de laboratorio

¿Cómo se ha resuelto históricamente la caracterización de suelos en el mundo desarrollado?

Para que los ensayos de laboratorio sean representativos del comportamiento real del suelo, las normas internacionales requieren que la razón entre el tamaño de la probeta y el diámetro máximo de la partícula (α) sea mayor a cierto número. Investigaciones recientes[1] muestran que muchos códigos no son lo suficientemente rigurosos para definir este parámetro y que, en general, se debería cumplir con un valor de $\alpha > 20$ para obtener resultados de laboratorio realistas. Utilizar valores de α menores a 20 induciría a medir valores del ángulo de resistencia al corte (ϕ') no conservadores o inseguros. En general, sólo la norma japonesa es lo suficientemente rigurosa.

Si se cuenta con una probeta de ensayo triaxial de diámetro 1m (lo más grande que hay en Chile) se podría ensayar máximo una partícula de diámetro 50mm.

Table 1. Standard testing prescriptions for representative sample dimensions as a function of the maximal particle size d_{max}

Shearing test	Standard	$d_{max} \leq$
Direct shear	ASTM D3080	min{*H*/6, *D*/10}
	BS 1377	*H*/10
	JGS 0561	*H*/23·5 '…may be relaxed for soils that have a wide particle size range.'
Triaxial	ASTM D7181	*D*/6
	BS 1377	*D*/5
	JGS 0525	*D*/20 for samples of *D* = 35 to 100 mm
	JGS 0530	*D*/10 for samples of *D* = 300 mm
	JGS 0525 and JGS 0530	*D*/5 '…for soils having a wide range of particle sizes'
Simple shear	ASTM D6528	*H*/10
Ring shear	ASTM D6467	*H*/10
	BS 1377	*H*/5 and *T*/25

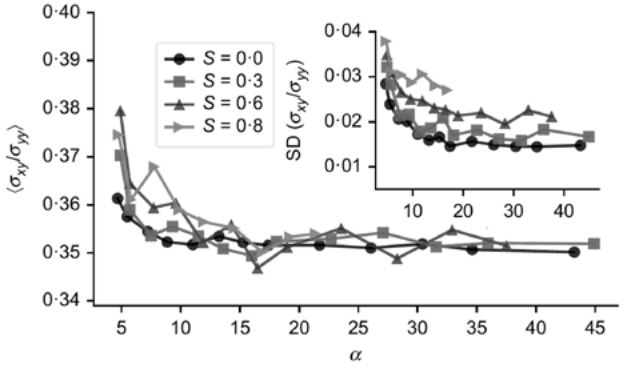


Fig. : Influencia de la razón entre tamaño máximo de partícula y diámetro de la probeta en la estimación de parámetros de resistencia al corte.

Geofísica

La geofísica es un método potente para entender la rigidez a muy bajas deformaciones y la estratigrafía conceptual de un terreno, pero carece de la resolución necesaria para resolver un problema de ingeniería a nivel de detalle. Adicionalmente, hay sitios altamente heterogéneos como salares o depósitos generados por la actividad humana donde las ondas viajan a través del medio más rígido por lo que es difícil caracterizar zonas locales con características degradadas.



Fotografía : Oquedad detectada a 13,4m de profundidad en sondaje en halita, que no fue detectada con geofísica.

Soluciones - Presiómetro

El presiómetro es un equipo que se desarrolló en Francia (Menard) en los años 50' y luego su diseño se refinó en Inglaterra (Cambridge) en los 70'. El ensayo consta en insertar dentro de un sondaje pre-perforado un equipo cilíndrico que tiene una longitud de aproximadamente 1m. El instrumento se baja hasta la profundidad a ensayar para luego aplicar presión contra las paredes del sondaje. El equipo registra la presión aplicada y la deformación del terreno generando una curva tensión-deformación.

Al ser un ensayo pre-perforado es ideal para terrenos duros. Su interpretación moderna no requiere de correlaciones, ya que para su análisis solo se utilizan principios fundamentales de física y mecánica de suelos. La curva medida permite obtener propiedades de resistencia pero también de pequeñas y grandes deformaciones. Finalmente, el presiómetro es ideal para la minería de Chile ya que moviliza un gran volumen del terreno. Un instrumento de 100mm de diámetro es equivalente a una probeta de 2m de diámetro, más del doble del instrumento más grande que existe en Chile.

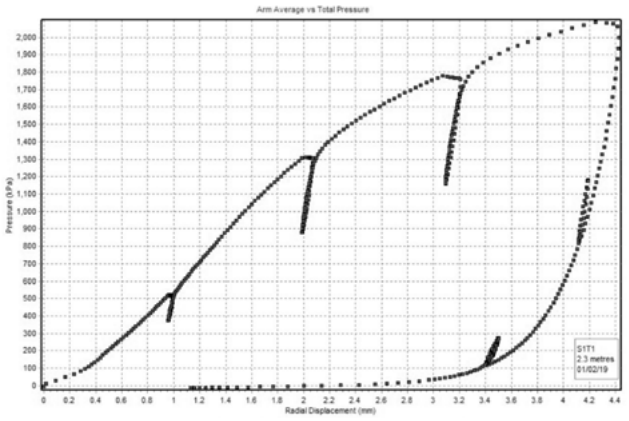
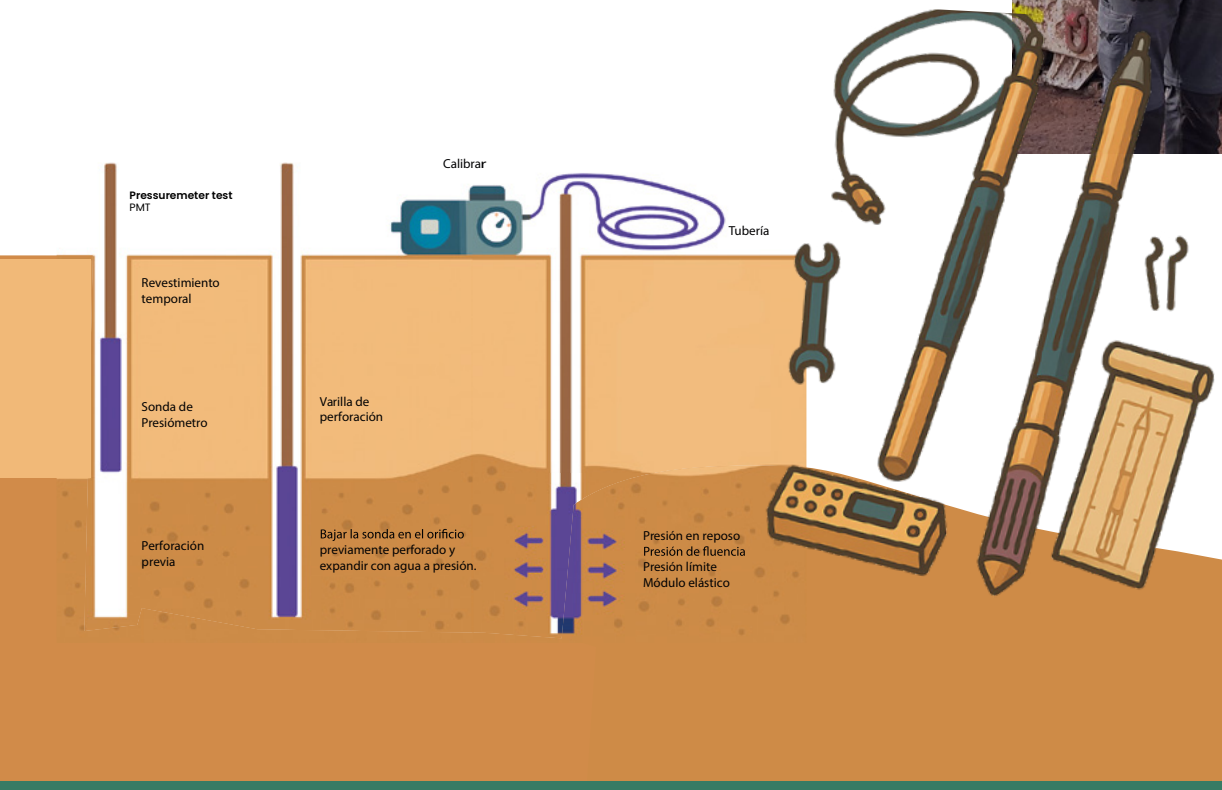


Fig. : Curva tensión-deformación típica de un presiómetro.





Presiómetro

1. Pre-perforado.
2. Sin correlaciones.
3. Resistencia y rigidez.
4. Moviliza un gran volumen (D = 100mm → 2.0m Triaxial)

¿Si el presiómetro es tan maravilloso, por qué es un ensayo tan poco común?

Creemos que el presiómetro es un ensayo maravilloso, pero la verdad es que su interpretación no es fácil. Esto ha frenado el uso masivo del instrumento.

En un ensayo triaxial se dice que las deformaciones y tensiones son homogéneas en toda la probeta. Esto quiere decir que las tensiones verticales son las mismas en cualquier sección horizontal y las tensiones radiales son las mismas en cualquier sección vertical. Lo mismo ocurre con las deformaciones. Si quisiéramos modelar un ensayo triaxial con elementos finitos bastaría 1 solo elemento.

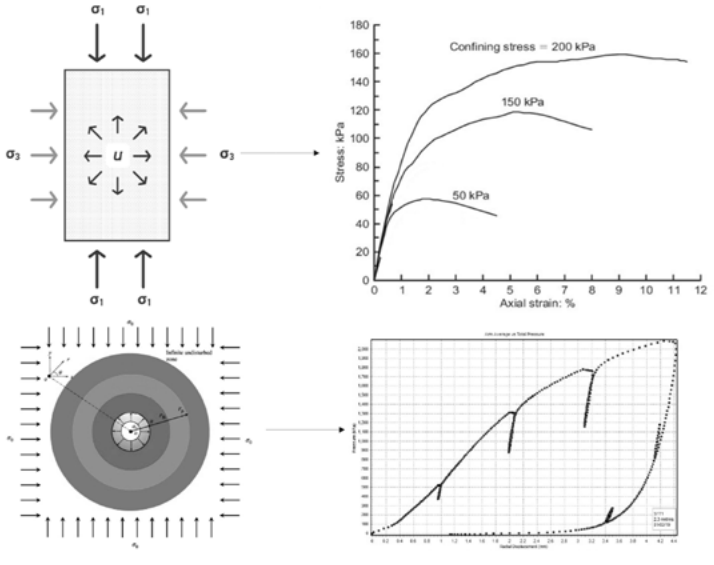
En un ensayo de presiómetro se conoce la presión en el borde la cavidad, pero esta presión cambia si se considera un elemento concéntrico alejado del centro. Lo mismo ocurre con las deformaciones: el ensayo mide la deformación de la cavidad, pero a una distancia suficiente existe deformación cero. Esto quiere decir que el ensayo de presiómetro, a diferencia del triaxial, moviliza varios elementos de suelo y no uno solo.

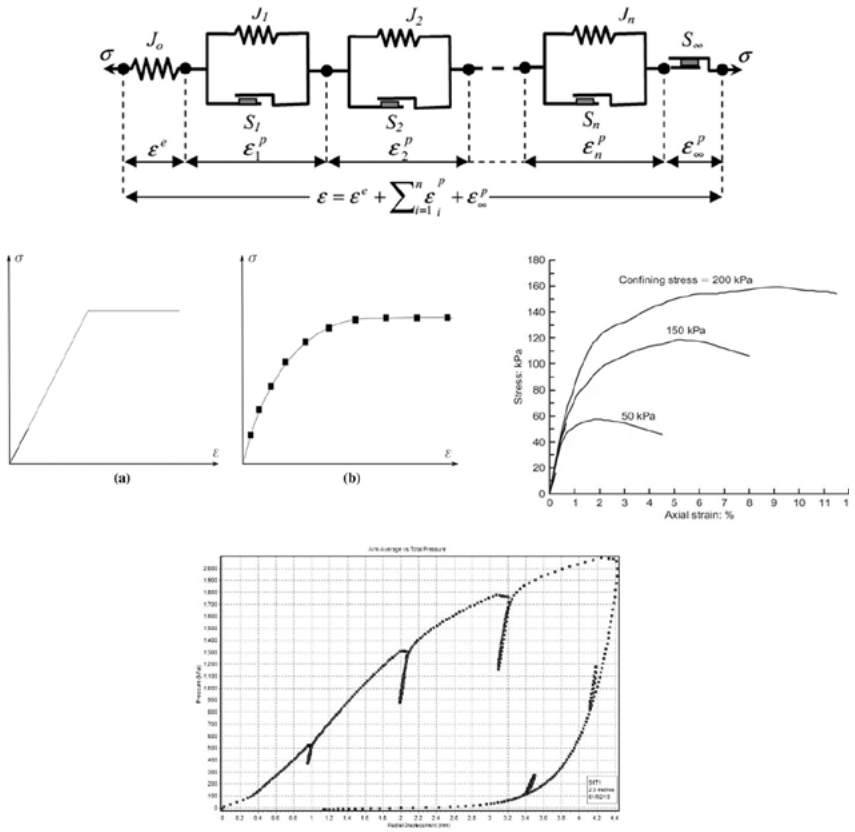
Lo anterior implica que si bien la curva tensión-deformación del presiómetro parece como la de un ensayo triaxial, ambas curvas son muy distintas. El desafío implica descubrir cómo es el comportamiento de 1 elemento de suelo que da origen a la curva del presiómetro. A esto se le conoce como problema de valor de frontera.

Un problema de valor de frontera

El ensayo de presiómetro puede asemejarse a una serie de resortes amortiguados que son cargados en un extremo por una fuerza conocida. La curva que entrega el presiómetro corresponde a la respuesta o deformación de la serie de resortes dada esa fuerza. A medida que la fuerza va variando, la deformación también lo hace. El desafío de interpretar un presiómetro implica determinar la **forma** y los **parámetros** de la curva tensión-deformación de uno de esos resortes, lo que se conoce como problema de valor de frontera. Una forma para resolver esto analíticamente es postular una forma genérica para el comportamiento tensión-deformación de un resorte y resolver las ecuaciones diferenciales que resultan del problema de valor de frontera.

Por ejemplo, Hughes (1977) postularon un comportamiento elástico, perfectamente plástico y encontraron expresiones analíticas para el módulo de elasticidad (E) y la resistencia del suelo (ϕ'). Como se sabe, el suelo no es elástico, por lo que generalmente al utilizar el método de Hughes (1977) no se obtienen parámetros precisos. Esto generó que otros investigadores postularan modelos más sofisticados para interpretar presiómetros, pero a medida que el modelo se complejiza se hace cada vez más complejo resolver las ecuaciones diferenciales del problema de valor de frontera. Lamentablemente, modelar el comportamiento real del suelo requiere emplear modelos constitutivos complejos que hacen imposible la resolución analítica de ecuaciones diferenciales y se debe recurrir a métodos numéricos.





Presiómetro – Desafíos

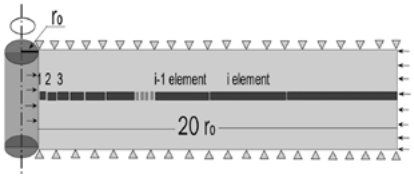
Interpretación mediante Elementos Finitos

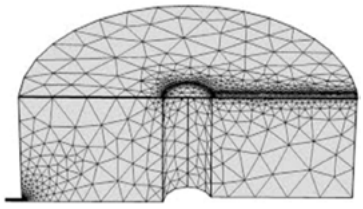
Actualmente ya no es necesario resolver ecuaciones diferenciales en forma analítica para interpretar presiómetros. El ensayo puede modelarse mediante elementos finitos y se pueden encontrar los parámetros que mejor asemejan la curva medida en terreno mediante iteración.

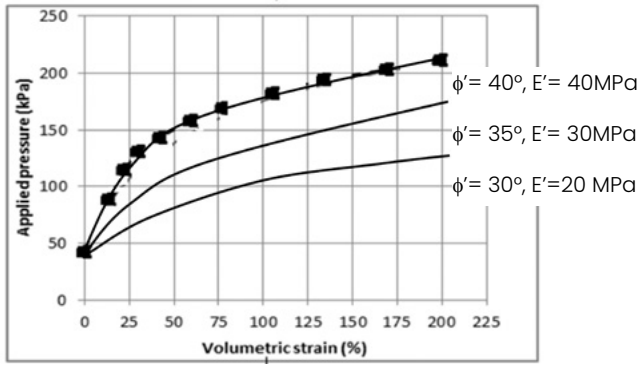
El problema es que los modelos constitutivos modernos más realistas requieren de muchos parámetros (8 o más), por lo que lograr convergencia en forma manual con la curva medida es un proceso tedioso y que demora normalmente 3 semanas para 1 solo ensayo. Además, debido a que muchos parámetros están relacionados entre sí, generalmente se obtiene que más de 1 set de parámetros reproducen la misma curva (No Unicidad).

En resumen

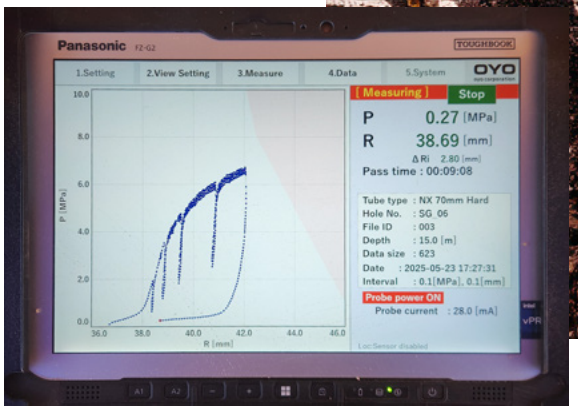
1. 3 semanas para un ensayo. (HSS)
2. No unicidad.











REFERENCIAS:

Fig. 1 : Modelo 3D de un ensayo de presiómetro en Plaxis.

Presiómetro – Inteligencia Artificial

Nuestra empresa ha trabajado con presiómetros durante más de 10 años, enfocándose en resolver el problema de interpretación de datos. En 2022, establecimos contacto con la empresa desarrolladora de DAARWIN, software orientado al retro-análisis para el método observacional, y comenzamos a colaborar estrechamente para aplicar esta tecnología a la interpretación de ensayos presiométricos.

PANGEA GEOTECNIA

Elementos Finitos + Inteligencia Artificial + Preguntas correctas = **Nuestro Método**

Como todo software de IA, éste solo funciona bien si le entrena con datos de calidad y se le hacen las preguntas correctas. Gracias a nuestros más de 10 años de esfuerzo hemos logrado combinar todos estos factores en un método único, actualmente con ***patente pendiente*** y los resultados son asombrosos:

- DAARWIN (algoritmos genéticos)
  Desarrollado por PhDs de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Uso de más de 200 licencias de Plaxis en paralelo.
- Cualquier modelo constitutivo de Plaxis puede ser utilizado para interpretar presiómetros.
- Aumento sustancial de la calidad predictiva debido al uso de Inteligencia Artificial para iterar.
- 3 semanas se reducen a 2 horas.
- El comportamiento del terreno se predice con diferencias de 1mm.

ISP8

Menard Award for Outstanding Papers Luxemburgo.





Pangea Geotecnia recibe el Menard Award for Outstanding Papers en ISP8 en Luxemburgo.

En el International Symposium for Pressuremeters (ISP8) realizado en Luxemburgo, durante lo días 2 al 5 de septiembre de 2025, el comité del evento reconoció nuestro trabajo con el Menard Award for Outstanding Papers por su contribución metodológica y aplicabilidad práctica.

Este reconocimiento nos impulsa a seguir investigando y aplicando metodologías que elevan el estándar de la geotecnia en Chile y la región, mejorando la trazabilidad técnica y la gestión del riesgo en cada proyecto.



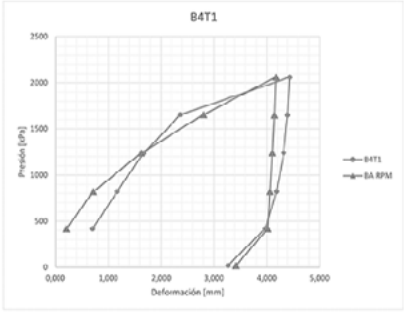
CASO I

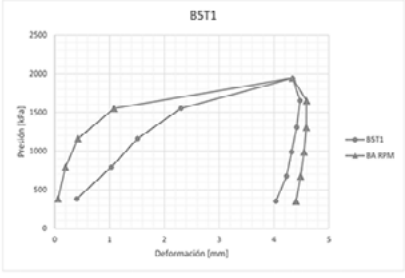
CASO 1

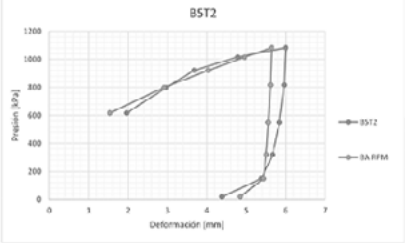
Muro de retención de 9m de profundidad[1]:

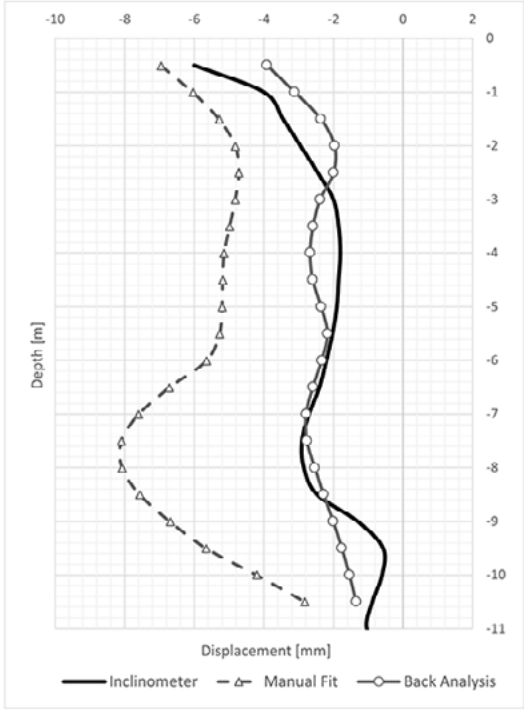
En el año 2018, se monitoreó con inclinómetros las deformaciones en un Muro Berlinés de 9m construido en Concepción. La campaña de exploración contaba con ensayos de presiómetro en cada estrato representativo. Sus resultados fueron interpretados con elementos finitos e inteligencia artificial, usando el modelo constitutivo Hardening Soil Small Strain (HSS). Luego el muro es modelado en Plaxis 2D, caracterizando los distintos estratos con los parámetros obtenidos del presiómetro y nuestro método.

La predicción de deformaciones obtenida difiere en menos de 1mm con respecto al monitoreo. Los resultados se obtuvieron en 1 día y superan ampliamente lo obtenido mediante una calibración manual de cada presiómetro que tomó 9 semanas en total para los 3 ensayos.









REFERENCIAS:

Fig. 1,2,3 : Curva tensión-deformación de ensayos de presiómetro en campaña de exploración y modelación en plaxis.
Fig. 4 : Deformación del muro berlinés medida con inclinómetro y predicciones con método tradicional y método de PANGEA GEOTECNIA.



CASO II

CASO 2

Monitoreo de dos edificios durante su construcción[2]:

En el 2021 se monitoreó el asentamiento de 2 edificios en distintas comunas de la región del Biobío durante su construcción. Los asentamientos se registraron después de la construcción de cada piso con mediciones de topografía.

Igualmente, se contaba con presiómetros antes de la construcción que fueron interpretados con nuestra metodología. Luego se utilizó Plaxis 3D para modelar el edificio y se le asignó a cada estrato las propiedades determinadas mediante presiómetros.

La predicción de asentamientos difiere en menos de 1mm con respecto a lo medido.

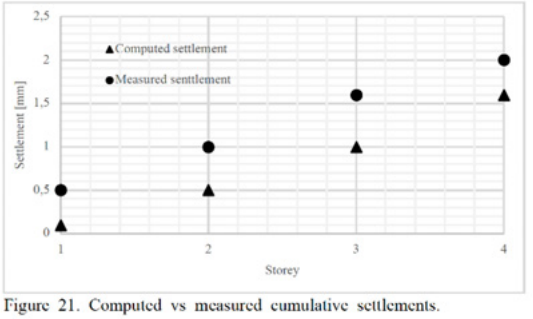


Figure 21. Computed vs measured cumulative settlements.

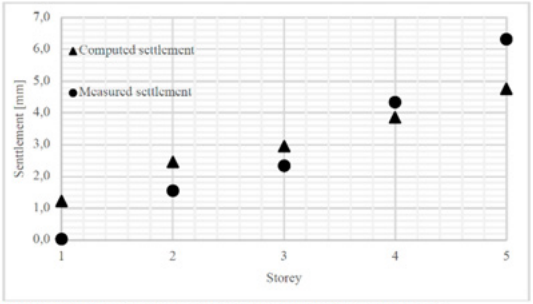


Figure 23. Computed vs measured cumulative settlements.

REFERENCIAS:

Fig. 1 y 2 : Asentamientos medidos y calculados.



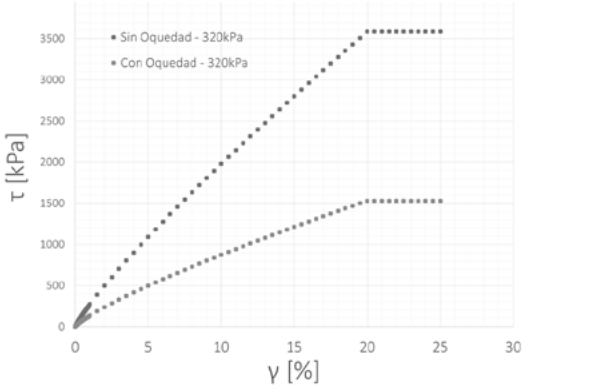
CASO III

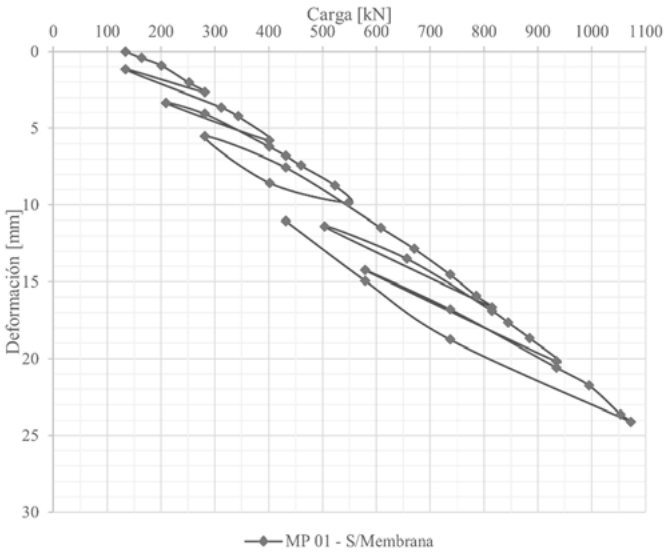
CASO 3

Predicción de capacidad portante de pilotes en minería:

Una operación minera ha requerido históricamente del uso de micropilotes para evitar el asentamiento de sus plantas producto de la disolución de sales. El terreno es una roca salina de muy difícil caracterización por métodos convencionales debido a su dureza relativa, tamaño de partículas, fracturamiento y existencia de cavidades. Por más de 15 años la operación ha trabajado con un valor de resistencia al fuste bajo (fu = 175 kPa). Pangea realiza una campaña de sondajes y presiómetros y predice una resistencia muchísimo mayor de fu = 660kPa.

Para zanjar esta gran discrepancia se realiza una campaña de pruebas de carga de micropilotes a escala real. Por limitaciones de espacio solo se puede utilizar una cantidad limitada de armadura que implica que los pilotes solo pueden ser cargados hasta un valor de fu = 560kPa. Así, los pilotes se cargan hasta este valor pero es evidente de la curva de carga-deformación que no muestra signos de plasticidad que éstos podrían haber alcanzado mayores cargas. **Se consigue una eficiencia de al menos 320%.**





REFERENCIAS:

Fig. 1 : Diferencia de rigidez de un MP en suelo sano y degradado por oquedades.
Fig. 2 : Curva de carga de MP en ensayos.



CASO 4

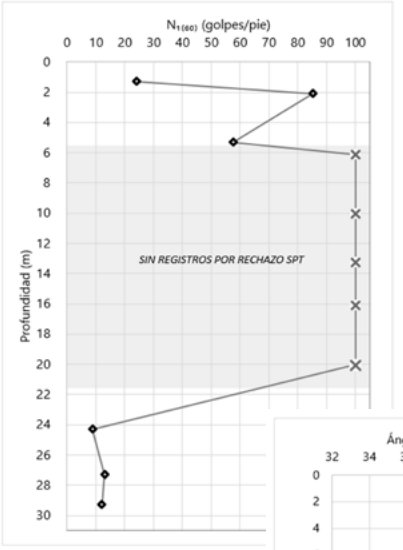
Campaña de exploración geotécnica en minería:

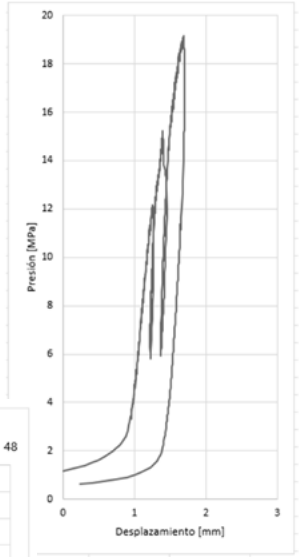
Durante el primer semestre de 2025, se ejecutó una campaña de exploración geotécnica en el desierto de Atacama, como parte del estudio para la ampliación de las operaciones mineras de un destacado cliente del sector.

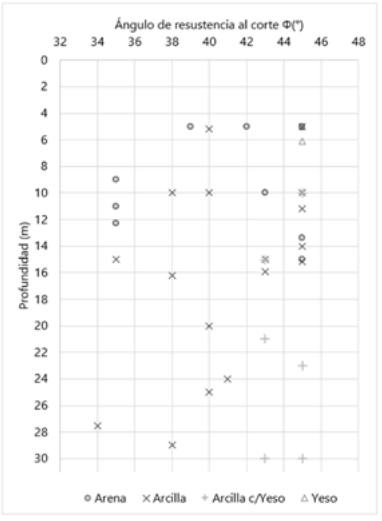
La campaña abarcó un área de 2km², e incluyó la ejecución de 32 calicatas, 32 mediciones geofísicas y 16 sondajes de 30 metros de profundidad, con ensayos SPT cada metro. Además, se realizaron 45 ensayos presiométricos distribuidos en los distintos sondajes.

El principal desafío fue el mismo que caracteriza gran parte del desierto chileno: la presencia de suelos duros, abundante grava e incluso la presencia de un grueso estrato de yeso mineral. Aunque estos materiales son competentes, su caracterización resulta compleja mediante métodos tradicionales. Tras los primeros metros de perforación, los ensayos SPT alcanzaban rechazo, impidiendo determinar parámetros fundamentales como el ángulo de fricción interna (**Φ**).

Gracias al uso de ensayos presiométricos y a nuestro método de interpretación, fue posible no solo estimar el ángulo de resistencia al corte del perfil completo del suelo, sino también obtener parámetros de deformación, como el módulo de elasticidad (E), incluso en los estratos más rígidos, como el yeso mineral.







REFERENCIAS:

Fig. 1 : Resultado de ensayo SPT en profundidad en sondajes realizados.
Fig. 2 : Curva tensión-deformación de ensayo de presiómetro en yeso mineral.
Fig. 3 : Estimación de **Φ** en profundidad con ensayos de presiómetro.



CASO V

CASO 5

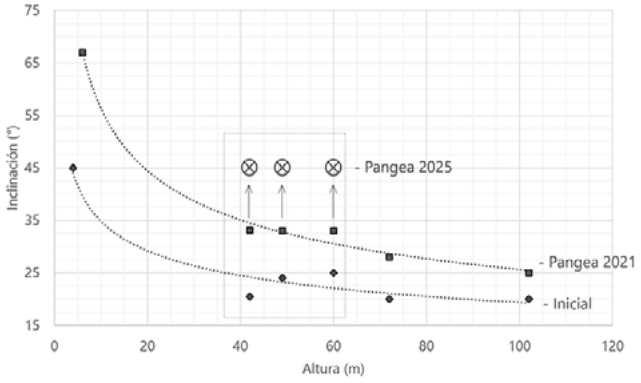
Optimización de diseño de pit mediante presiómetros de alta resolución:

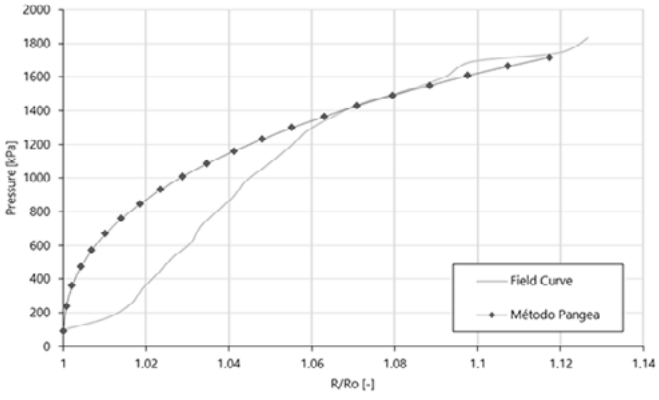
En una faena minera de rajo abierto en etapa previa a su entrada en operación, el diseño base de los pits de extracción –definido antes de la participación de Pangea Geotecnia– consideraba alturas de banco y pendientes globales conservadoras, a partir de parámetros geotécnicos obtenidos principalmente por métodos indirectos y muestreo superficial.

En este contexto, se ejecutó una campaña específica de sondajes con presiómetros orientada a caracterizar en detalle el comportamiento de rocas blandas meteorizadas in situ presentes en el sector.

La interpretación de estos ensayos permitió describir con mayor resolución la resistencia y rigidez del macizo, lo que hizo posible justificar un incremento promedio del orden de +8° en la pendiente global de las zonas de extracción, junto con ajustes en la altura e inclinación de los bancos, manteniendo los factores de seguridad requeridos en el diseño actualizado del pit.

En 2025 se realizó un reanálisis focalizado únicamente en los pits con alturas entre 40 y 60 m utilizando presiómetros de mayor capacidad y la metodología integrada de Pangea. Para este rango de alturas, el estudio mostró que era factible aumentar la pendiente global hasta aproximadamente 45°, manteniendo los factores de seguridad y las condiciones de operación establecidas.
Las estimaciones volumétricas internas indican que este ajuste se traduce en una reducción cercana al 50 % del material estéril a remover, con impacto positivo en movimientos de tierra, huella ambiental y costo por tonelada extraída.







CASO VI

CASO 6

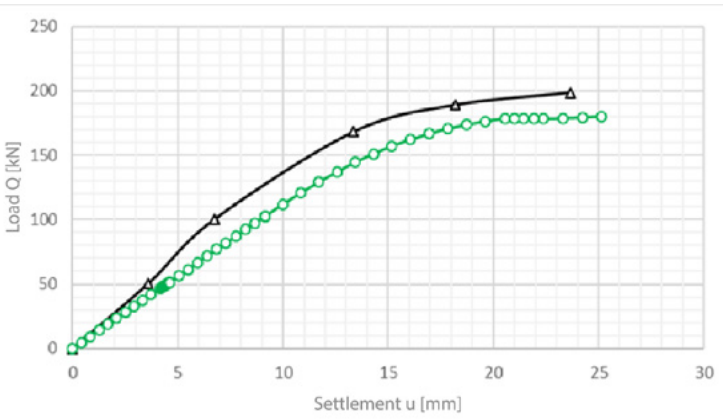
Benchmark internacional de predicción geotécnica en arcillas blandas:

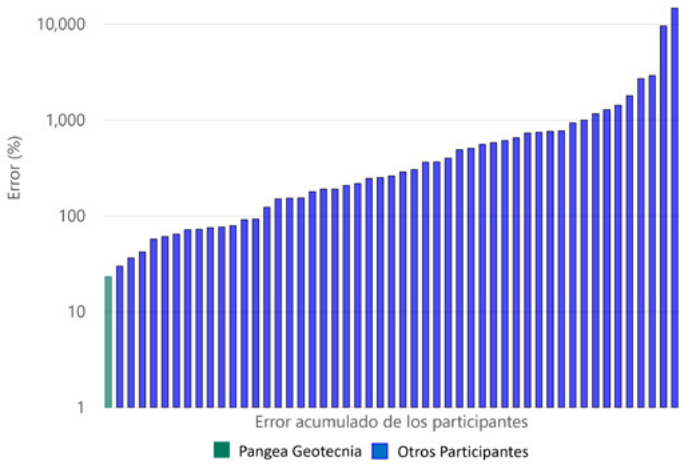
El proyecto Ballina, desarrollado por la Universidad de Western Australia, consistió en una competencia internacional para evaluar la capacidad de ingenieros geotécnicos para predecir el comportamiento de una fundación superficial sobre arcilla blanda. Participaron 88 ingenieros de 13 países, utilizando una base de datos geotécnica completa, que consideraba ensayos triaxiales, edométricos, geofísica, CPTu y presiómetros. A pesar de contar con información de alta calidad y una campaña de investigación geotécnica excepcionalmente completa, los resultados mostraron una alta dispersión, especialmente en la estimación de asentamientos.

A partir de este benchmark, en Pangea aplicamos nuestra propia metodología de interpretación geotécnica, utilizando solamente los datos de presiómetro disponibles.

Nuestra metodología alcanzó predicciones notablemente más cercanas al comportamiento real medido en terreno, obteniendo el menor error promedio, lo que nos hubiera dado por ganadores de la competencia.

Para el asentamiento final, nuestro error fue de solo 3 mm, mientras que el error asociado al promedio de los demás participantes fue más de 34 veces mayor. En carga última, el error fue de solo 12%, mientras que el error promedio fue cercano al 100%. Estos resultados reflejan el valor de una interpretación geotécnica precisa y rápida, capaz de entregar predicciones más confiables y eficientes para el diseño.





REFERENCIAS:

Fig. 1 : Predicción con el Método PANGEA.
Fig. 2 : Error medio de todas las variables consideradas del estudio.

Vídeo del proyecto

Publicación científica

Caso destacado

Caracterización avanzada de un depósito de ripios mediante presiómetro de alta resolución



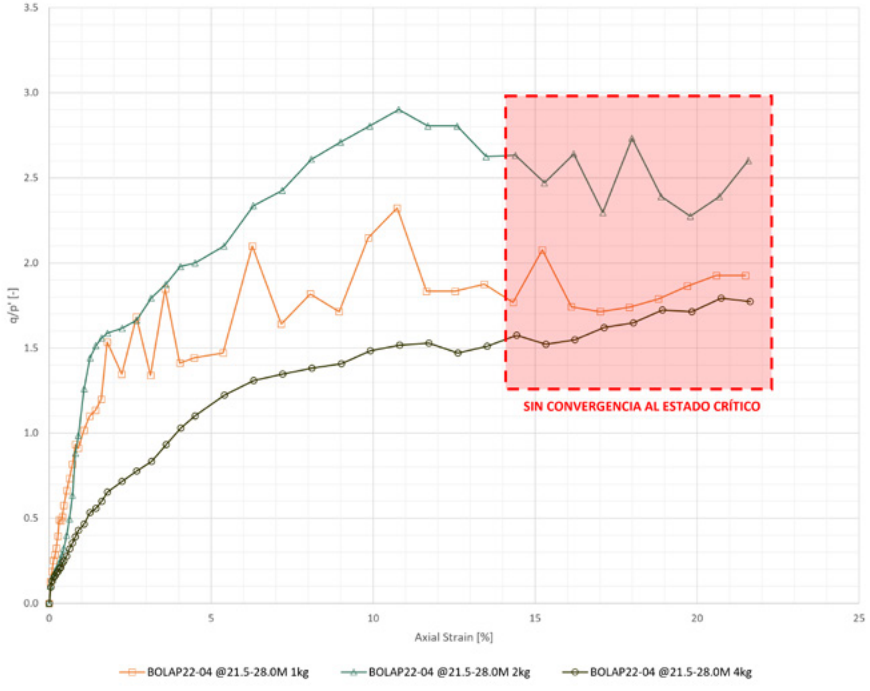
CASO VII

Una importante operación minera de la Región de Antofagasta registró en 2021 un deslizamiento en un depósito de ripios de aproximadamente 3 km² de superficie y hasta 43 m de altura. El material estaba constituido principalmente por gravas de hasta 3 pulgadas, contenidas en una matriz de arenas arcillosas. La aparición de grietas de varios centímetros de ancho en uno de los sectores del depósito generó una condición de riesgo operacional. Para definir medidas de estabilización adecuadas, era fundamental identificar el mecanismo de falla y caracterizar de manera confiable la resistencia y rigidez del material.



Para estudiar el origen de este deslizamiento, el cliente desarrolló en 2022 una amplia campaña de exploración, que incluía ensayos CPTu, sondajes sónicos y ensayos triaxiales CIU y CID en muestras "inalteradas". No obstante, los resultados presentaban una elevada dispersión y no permitían explicar satisfactoriamente el comportamiento observado en terreno. Los ensayos triaxiales entregaron ángulos de resistencia al corte en estado crítico comprendidos entre 24° y 59°, aun cuando el material provenía de un proceso minero relativamente uniforme.

Esta variabilidad se relacionó principalmente con las dimensiones de las probetas utilizadas (300mm x 150mm) que no eran las adecuadas para el tamaño de partícula del suelo (3"). La relación entre el diámetro de la probeta (D) y el tamaño máximo de partícula (Dmax) utilizado fue cercano a D/Dmax = 5, aún cuando las recomendaciones de normas internacionales (ASTM D7181-20) establecen una razón mínima de 6, mientras que publicaciones recientes recomiendan una razón igual a 15. [3] Esta condición produjo curvas tensión-deformación erráticas y aumentó considerablemente la incertidumbre de los parámetros obtenidos.



REFERENCIAS:

Imagen 1 : Grieta superficial producto del deslizamiento de botadero de ripio.
Imagen 2 : Gravas de botadero.
Fig. 1 : Ensayos triaxiales.

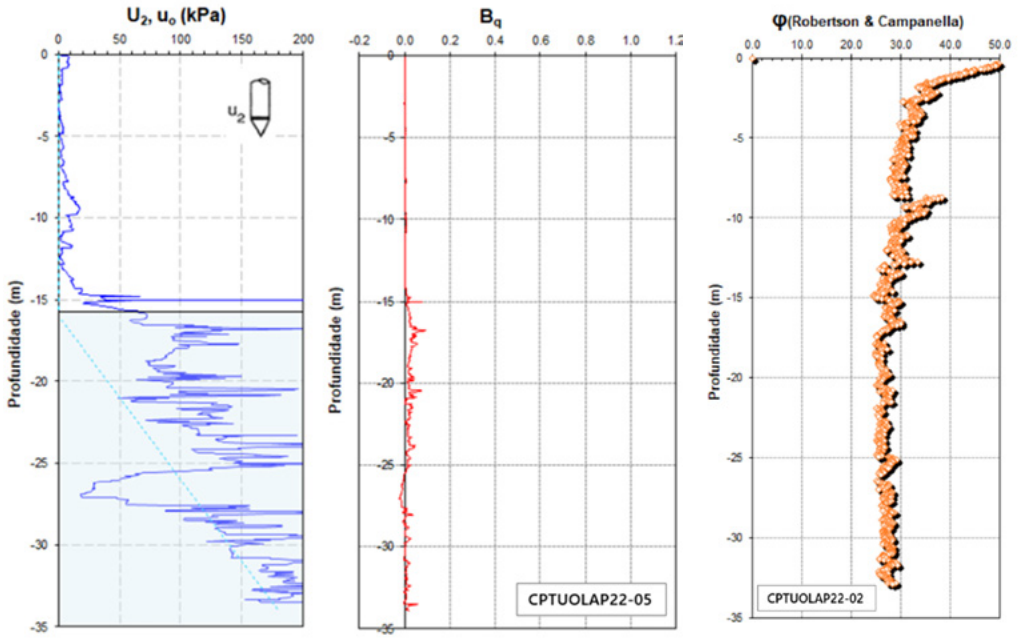
Caracterización avanzada de un depósito de ripios mediante presiómetro de alta resolución

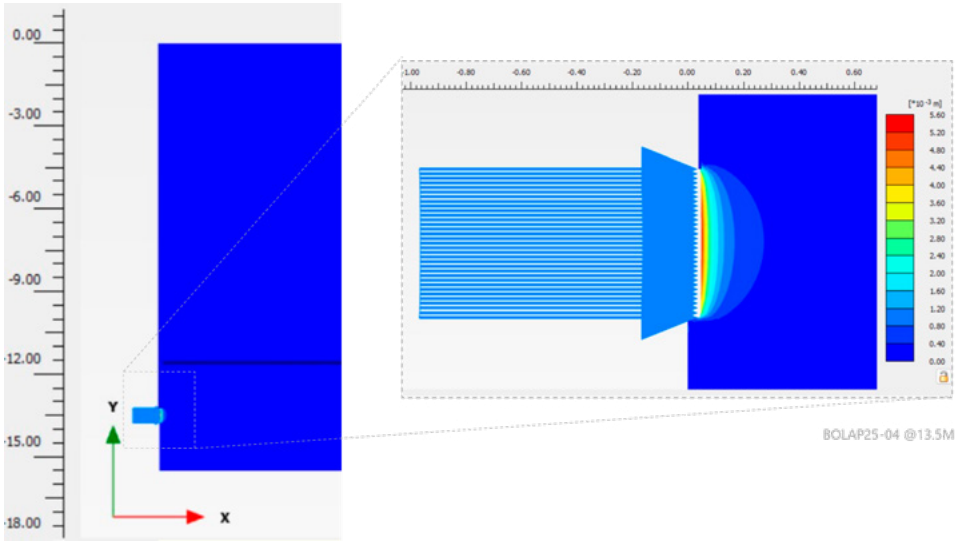
Los ensayos CPTu tampoco permitieron resolver adecuadamente la interpretación geotécnica. El parámetro normalizado de presión de poros, Bq, presentaba valores inferiores a 0,3, lo que sugería un comportamiento predominantemente drenado. Sin embargo, los registros mostraban acumulación de presión de poros durante la penetración.

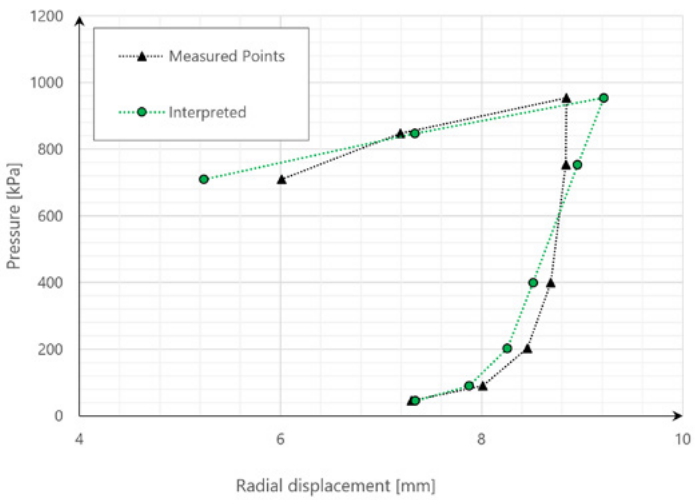
Las correlaciones convencionales entregaron ángulos de resistencia al corte del orden de 28° a 32°, inferiores a la inclinación de aproximadamente 39° observada en los taludes justo antes de fallar e inconsistente con los 30° de pendiente de diseño.

Asimismo, la elevada relación entre el módulo de corte a pequeñas deformaciones y la resistencia de punta, G0/qt, evidenciaba una combinación de alta rigidez inicial y resistencia limitada, característica de una estructura metaestable del suelo. Este comportamiento restringía la aplicación directa de correlaciones desarrolladas para suelos convencionales.

En 2026, Pangea ejecutó una campaña especializada mediante ensayos presiométricos de alta resolución a diferentes profundidades con un equipo de diámetro 70mm.







REFERENCIAS:

Fig. 1 : Presión de poro medido con CPTu.
Fig. 2 : Parámetro de presión de poro normalizado vs profundidad.
Fig. 3 : Estimación de ángulo de resistencia al corte estimado a partir de CPTu.
Fig. 4 : Modelo numérico en PLAXIS 2D de un ensayo presiométrico.
Fig. 5 : Resultados de la modelación numérica de un ensayo presiométrico.

Caracterización avanzada de un depósito de ripios mediante presiómetro de alta resolución

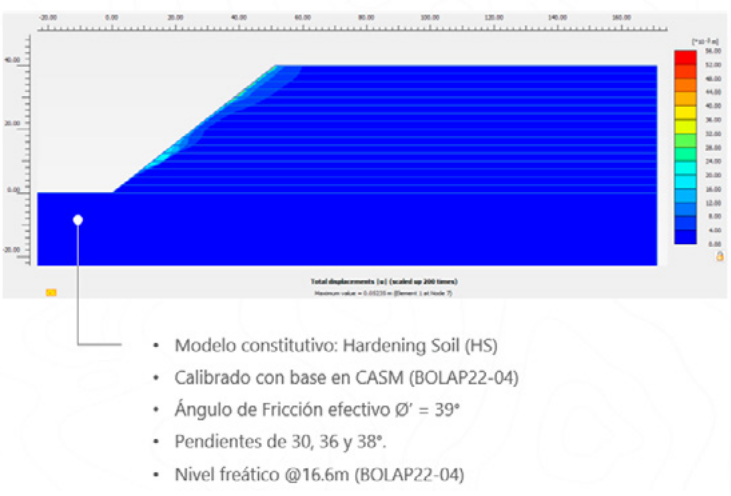
El volumen de suelo movilizado durante cada ensayo fue equivalente al de una probeta de aproximadamente 1,4 m de diámetro, permitiendo caracterizar adecuadamente materiales con partículas de hasta 3,5 pulgadas (considerando una razón D/Dmax = 15). De esta manera, se alcanzó una relación adecuada para el tamaño del volumen ensayado y el tamaño máximo de las partículas.

Los resultados fueron interpretados mediante una metodología integrada que combinó presiometros de alta resolución, modelación numérica en PLAXIS 2D, el modelo constitutivo CASM y herramientas de interpretación asistidas por inteligencia artificial. Esta metodología permitió reproducir la respuesta tensión-deformación del material dentro de un marco constitutivo capaz de incorporar variables de especial relevancia, como el coeficiente de empuje en reposo K0 y el parámetro de estado inicial $\psi 0$.

La interpretación entregó un ángulo de resistencia al corte de aproximadamente 39-40°, coherente con la geometría del talud y con el ángulo de reposo medido experimentalmente.

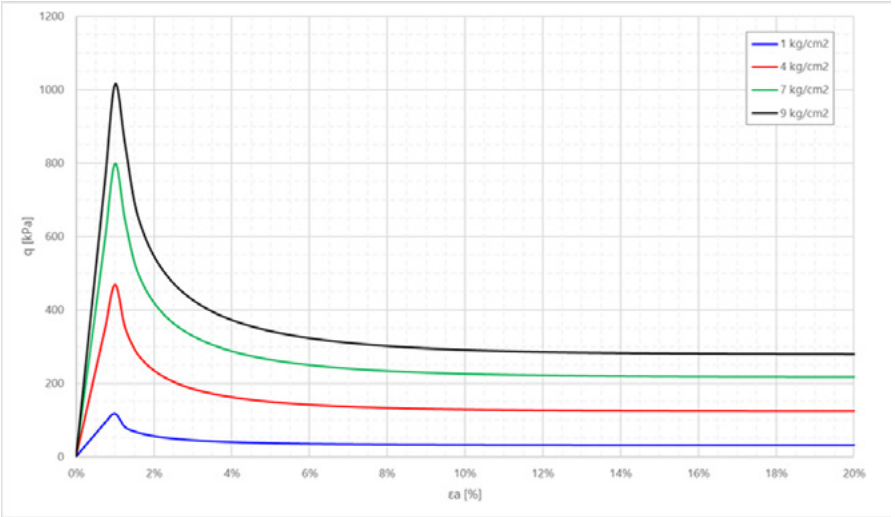
A diferencia de las campañas anteriores, los parámetros obtenidos mostraron una respuesta consistente entre los distintos ensayos y permitieron reducir significativamente la variabilidad y la incertidumbre del análisis. Además, la metodología incorporó directamente las condiciones in situ del depósito, incluyendo su granulometría y comportamiento parcialmente drenado, sin depender exclusivamente de correlaciones empíricas.

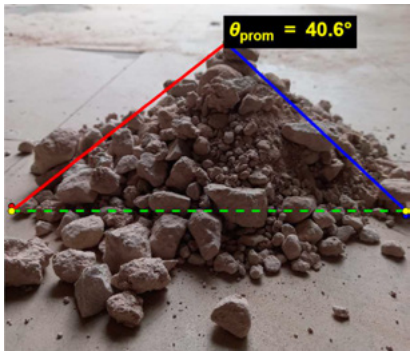
Con los parámetros obtenidos se desarrolló un análisis de estabilidad de la condición existente. El modelo entregó un factor de seguridad cercano a 1,0 para los taludes con pendientes de 39° y descartó la hipótesis de comportamiento no drenado postulada originalmente.



Adicionalmente, la simulación numérica de ensayos triaxiales permitió reproducir el comportamiento metaestable identificado en terreno.

La caracterización realizada permitió comprender el mecanismo de falla, definir parámetros geotécnicos representativos y formular recomendaciones para el tratamiento y estabilización del depósito de ripios.





Para zanjar la amplia diferencia de resultados, y en ausencia de equipos de laboratorio de gran tamaño, en 2026 se realizaron 10 ensayos de ángulo de reposo con el material seco, obteniéndose ángulos de reposo del orden de 40°.

El caso demuestra que los presiómetro de alta resolución puede superar algunas de las principales limitaciones asociadas a la caracterización de materiales gruesos y complejos.

Esta metodología permite ensayar un volumen de suelo representativo de su granulometría, reducir la dependencia de correlaciones empíricas, incorporar variables de estado y condiciones in situ, disminuir la incertidumbre en los parámetros de diseño y facilitar la implementación de los resultados en software comerciales de modelación numérica.

Cuando los métodos convencionales no logran explicar el comportamiento del terreno, una caracterización representativa puede marcar la diferencia entre asumir la incertidumbre y comprender el mecanismo real de falla.

Pangea integra exploración avanzada, interpretación constitutiva y modelación numérica para transformar mediciones in situ en decisiones geotécnicas confiables.

REFERENCIAS:

Fig. 1 : Modelo numérico de botadero de ripio.
Fig. 2 : Simulación de ensayos triaxiales con parámetros obtenidos de la interpretación de presiómetro.
Imagen : Determinación del ángulo de reposo del suelo.

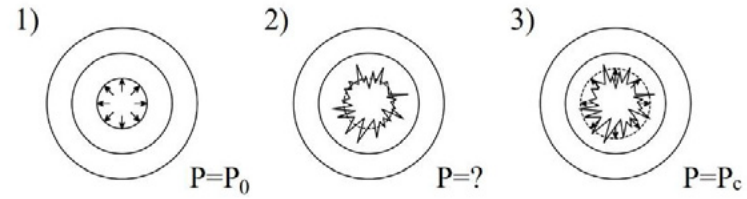
K_0 – Perturbación del sondaje

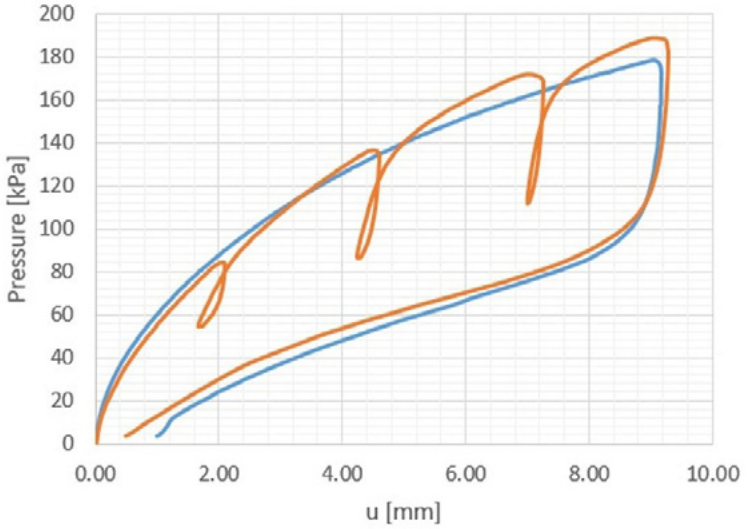
Una crítica histórica

Otra de las críticas históricas que se le realizan al presiómetro es la falta de veracidad de los datos debido a la perturbación que ocurre en la pared de la cavidad producto de la instalación mediante el sondaje. Si bien esta crítica es cierta, nuestro método también permite resolver esta situación.

Antes de perforar el sondaje el suelo presenta una tensión horizontal en reposo P_0. Al ejecutar el sondaje, el proceso de perforación impone tensiones erráticas, no homogéneas alrededor de la cavidad creando un campo de tensiones desconocido. Luego, al insertar el presiómetro, la presión en la cavidad es conocida.

A medida que se incrementa la presión en la cavidad hay zonas donde la tensión errática producida por la inserción son sobrepasadas por la presión de la cavidad y otras que quizás no. Los ciclos de carga y descarga que pueden ser realizados con presiómetros modernos permiten determinar si la perturbación de instalación ha sido "borrada" por la presión de cavidad, por lo tanto se puede determinar la parte de la curva que no está afectada por la perturbación.





K_0 – Cámara de Calibración

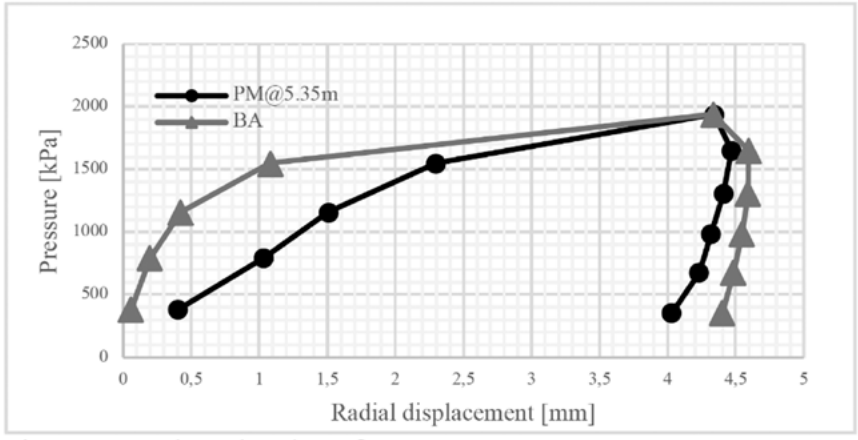
Un gran salto hacia adelante[4]

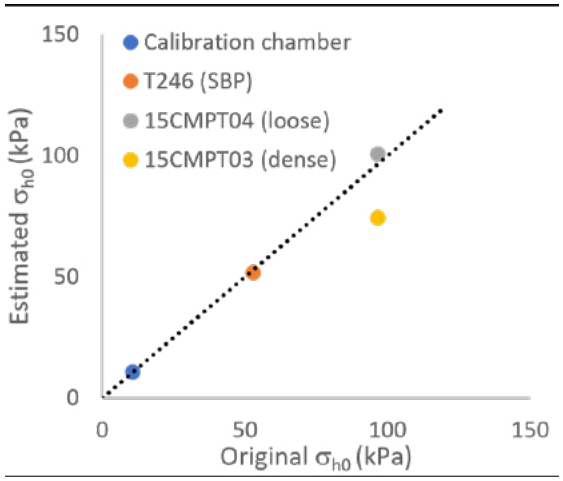
La posibilidad de interpretar únicamente los datos no perturbados —es decir, tener la capacidad de seleccionar qué datos se utilizarán para alimentar el algoritmo de inteligencia artificial en el retroanálisis de la curva de presiómetro— constituye una herramienta sumamente poderosa. Al aplicar este enfoque, se observa que la curva del terreno no coincide con la curva interpretada en la zona de los datos descartados (generalmente al inicio del ensayo), lo cual es correcto.

Esto se debe a que la curva medida está influenciada por el proceso de inserción del presiómetro, mientras que la curva interpretada representa lo que debería ocurrir al inicio del ensayo en el caso de una instalación perfectamente ejecutada.

Para demostrar este principio, Pangea construyó una cámara de calibración en la que se depositó una arena con propiedades conocidas. En dicha muestra, se midió la presión horizontal en reposo mediante un método alternativo e independiente. Posteriormente, se insertó el presiómetro utilizando un procedimiento similar al de un sondaje, y se aplicó el método combinado de elementos finitos e inteligencia artificial (EF + IA) para estimar el valor de la presión horizontal correspondiente a deformación cero.

Los resultados fueron excelentes, permitiendo predecir el valor de la presión horizontal en reposo con un error inferior al 1 %.





K_0 – Implicancias

Resistencia post-sísmica[5]

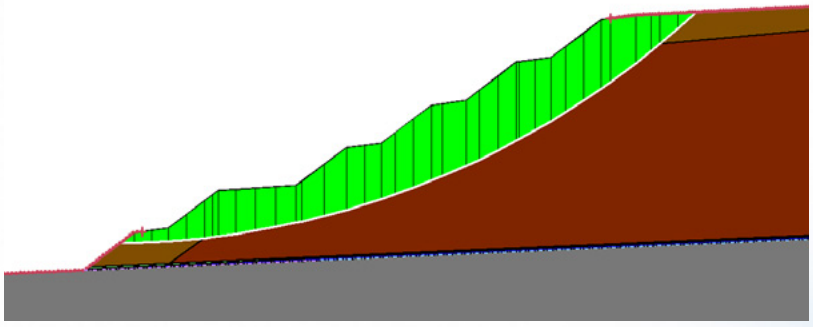
La posibilidad de medir directamente el valor de K_0 constituye un método único en el mundo (solicitud de patente ingresada) y abre un abanico de oportunidades para mejorar la caracterización geotécnica. Por ejemplo, en análisis de estabilidad no drenados en términos de tensiones totales —frecuentemente asociados a condiciones post-sísmicas—, es fundamental conocer K_0.

Los ensayos triaxiales no drenados suelen consolidarse isotrópicamente, asumiendo K_0 = 1.0. Sin embargo, los softwares de análisis requieren como entrada la razón $Su/\sigma v'$. Por lo tanto, es necesario suponer un nivel de confinamiento representativo del terreno natural para poder asociar adecuadamente la resistencia medida en laboratorio. En muchos casos, se asume de manera no conservadora un valor de K_0 = 1.0.

Para un material que sigue el modelo Modified Cam Clay y cuyo valor real de K_0 es 0.5, esta suposición implica una sobreestimación del factor de seguridad del orden del 16 %. En consecuencia, depósitos que muestran un factor de seguridad aparentemente adecuado —ligeramente superior a 1.10— podrían, en realidad, no ser seguros.

Table 2 Summary of FoS (all undrained)

Case ID	Loading	Ko	FoS
PG-04Ua	Post-seismic	0.5	0.986
PG-04Ub	Post-seismic	1.0	1.141
PG-04Uc	Post-seismic	2.0	1.767



Fotografía: Cámara de calibración - Pangea Geotecnia

Conclusiones

- El Presiómetro permite superar los desafíos de los materiales gruesos y duros de la minería chilena.
- Instrumento puede pre-perforarse y equivale a una probeta de D = 2.0m.
- Modelación con EF e IA abre las puertas para un uso revolucionario. (Patente en proceso)
- Es posible la calibración de modelos constitutivos complejos y determinación de parámetros como K_0 y el parámetro de estado.
- Nuestro método permite medir certeramente las propiedades geotécnicas del terreno disminuyendo costos y aumentando la seguridad.

Referencias

(1) Cantor & Ovalle (2023). Sample size effects on the critical state shear strength of granular materials with varied gradation and the role of column-like local structures. Géotechnique [https://doi.org/10.1680/jgeot.23.00032]

(2) Martínez & Jara (2024). The use of Artificial Intelligence, Finite Element Modelling and Pressuremeter tests for geotechnical characterisation. 17th Geotechnical Panamerican Conference.

(3) Cantor, D., & Ovalle, C. (2025). Sample size effects on the critical state shear strength of granular materials with varied gradation and the role of column-like local structures. Géotechnique, 75(1), 29–40. doi:10.1680/jgeot.23.00032

(4) Martínez, R., Jara, M., Schnaid, F., & Montalva, G. (2025). On the determination of the at-rest lateral earth pressure coefficient and the state parameter using pushed-in high-resolution Pressuremeters. In Proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters (Luxembourg, 2–5 September 2025).

(5) Martínez, Quiroz y Jara (2025). The use of Artificial Intelligence and Pressuremeter tests in Tailings design. 11th International Conference on Tailings Management.



Conoce más sobre esta investigación

Y otras soluciones de Pangea Geotecnia
escaneando el código QR.

PANGEA
GEOTECNIA

INGENIERÍA
MINERÍA
CONSTRUCCIÓN

El terreno habla,
nosotros lo interpretamos.

www.pangeageotecnia.com

