

ARTÍCULOS

Simulación con Plaxis 2D del uso de wick drains y precarga en suelos arcillosos

Simulation with Plaxis 2D of wick drains and preloading in clayeysoils



Cristhian Alexi Macías-Loor¹, Wilson Andrés Cabezas-Panchana², Maybe Liliana Pérez-Párraga³



cmaciasl8@uteq.edu.ec

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Unidad de admisión y nivelación. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.



wacabeza@espol.edu.ec

² Escuela superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ciencias de la tierra. Guayaquil, Guayas, Ecuador.



maylilperez@hotmail.com

⁴ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

Modalidad: Continua

vol. 22, núm. 2, 2026

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 10 febrero 2026

Aprobación: 20 julio 2026

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v22i2.9663>

Autor de correspondencia:

cmaciasl8@uteq.edu.ec

RESUMEN

Los suelos arcillosos blandos representan un desafío frecuente en el diseño de cimentaciones en zonas industriales, dado que su baja capacidad portante limita las opciones constructivas convencionales. Este trabajo estudia el desempeño del sistema de drenes verticales (wick drains) con precarga escalonada como alternativa de mejoramiento en el sector Brisas de Procarisa, cantón Durán, Ecuador. Mediante el software Plaxis 2D se modeló el proceso de consolidación del terreno blando, comparando dos escenarios: con y sin drenes instalados. Se emplearon ensayos CPTu para obtener los parámetros geotécnicos de entrada y se desarrolló un modelo de elementos finitos. Los resultados indican que los wick drains redujeron el tiempo de consolidación de manera notable: con drenes, el suelo alcanzó más del 90 % de consolidación en aproximadamente 120 días, mientras que sin ellos el proceso tomó más de 500 días. Además, el asentamiento resultó más homogéneo y la distribución de esfuerzos verticales más eficiente. La modelación con Plaxis 2D confirma que esta combinación de técnicas es viable para acelerar la consolidación en suelos arcillosos, lo que puede contribuir directamente a mejorar la planificación de obras sobre terrenos blandos.

Palabras claves: consolidación; suelos blandos; wick drains; precarga; plaxis 2D

ABSTRACT

Clayey soft soils with low bearing capacity frequently pose challenges for foundation design in industrial areas, as conventional construction methods are often insufficient. This study evaluates the performance of a prefabricated vertical drain (wick drain) system combined with staged preloading as a ground improvement solution in the Brisas de Procarisa sector, Durán, Ecuador. The consolidation process was modeled using Plaxis 2D software, comparing two scenarios: with and without installed drains. CPTu field tests provided the geotechnical input parameters for the finite element model. Results show that wick drains substantially reduced consolidation time: the treated soil reached over 90% consolidation in roughly 120 days, compared to more than 500 days in the untreated case. Settlement was more uniform and vertical stress distribution more efficient in the drained scenario. The Plaxis 2D simulations confirm that this combined approach is technically feasible for accelerating consolidation in soft clayey soils, with direct implications for infrastructure planning on problematic ground.

Keywords: consolidation; soft soils; wick drains; preloading; plaxis 2D



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional
(CC BY 4.0)

Cómo citar:

Macías-Loor, C. A., Cabezas-Panchana, W. A. y Pérez-Párraga, M. L. (2026). Simulación con Plaxis 2D del uso de wick drains y precarga en suelos arcillosos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 22(2), e9663. <https://doi.org/10.29166/revfig.v22i2.9663>

INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos blandos representan una dificultad frecuente en proyectos de ingeniería civil, sobre todo en zonas costeras y deltaicas del litoral ecuatoriano. Debido a su alta compresibilidad, baja resistencia al corte y escasa permeabilidad, estos materiales suelen generar asentamientos prolongados y deformaciones diferenciales que afectan la estabilidad de las estructuras si el terreno no recibe un tratamiento adecuado (Terzaghi, Peck y Mesri, 1996).

Frente a estas condiciones, se han desarrollado distintas técnicas de mejoramiento de suelos. Entre las más utilizadas se encuentra la combinación de precarga con drenes verticales prefabricados (PVD o wick drains), sistema que favorece la expulsión del agua intersticial y acelera el proceso de consolidación mediante drenaje radial.

La eficacia de esta metodología está bien documentada en proyectos portuarios, aeroportuarios e industriales construidos sobre suelos blandos. Los trabajos de Hansbo (1981) y estudios recientes sobre consolidación acelerada mediante drenes verticales sirven como referencia técnica para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, en Ecuador la documentación local sobre estas aplicaciones es aún escasa, particularmente en zonas industriales emergentes como Durán o Monteverde, donde las restricciones geotécnicas frenan la expansión territorial.

Si bien existe esta limitación histórica en el registro de los datos a nivel regional las investigaciones recientes han comenzado a validar la efectividad de estos tratamientos en la costa ecuatoriana. Al respecto Cedeño-Palacios *et al.* (2024) probaron la aplicación conjunta de precarga y los drenes verticales prefabricados (wick drains) en el proyecto de Éxodo-Fertisa, localizado también en el cantón Durán. Los autores en su estudio demostraron que la aplicación de este sistema integrado no solo optimizó significativamente el comportamiento mecánico de los depósitos arcillosos blandos sino que también redujo drásticamente los tiempos requeridos para poder alcanzar la consolidación del terreno. Este antecedente local reafirma la conveniencia del analizar las soluciones del drenaje radial en la cuenca del Guayas afianzando así la factibilidad técnica de la técnica de precarga asistida para disminuir los riesgos ocasionados por la reducida capacidad portante de la zona.

En los últimos años, el ensayo CPTu y la modelación numérica han sido utilizados con mayor frecuencia en estudios sobre suelos blandos. Diversas investigaciones muestran que el CPTu permite caracterizar la estratigrafía del terreno y estimar parámetros geomecánicos empleados posteriormente en modelos de consolidación acelerada (Arévalo Ochoa y Muñoz Buestán, 2023).

El sector Brisas de Procarsa, en el cantón Durán, provincia del Guayas, se asienta sobre depósitos aluviales holocénicos formados por limos y arcillas poco consolidadas. Estos materiales presentan humedades naturales elevadas, baja permeabilidad y tiempos de consolidación muy prolongados, lo que hace inviable la construcción directa sin tratamiento previo del terreno. Debido a estas condiciones, resulta necesario prever el comportamiento del terreno antes de ejecutar cualquier intervención. Por ello, la modelación numérica representa un apoyo importante para evaluar distintas estrategias de mejora del suelo.

Plaxis 2D es una de las herramientas más utilizadas para este tipo de análisis, ya que permite simular procesos de consolidación acoplada y representar tanto el drenaje vertical como el radial mediante elementos finitos.

Con base en estas consideraciones, se plantea la siguiente interrogante: ¿Es posible acelerar de forma efectiva la consolidación de un suelo blando mediante la aplicación conjunta de precarga y drenes verticales, y puede verificarse ese comportamiento a través de modelación numérica en Plaxis 2D?

Para responderla, se construyó un modelo numérico del terreno en Brisas de Procarsa, con datos geotécnicos obtenidos en campo. Se plantearon dos escenarios con y sin tratamiento para comparar la evolución de asentamientos, presiones de poro y tiempos de consolidación.

Con ello, se busca aportar información técnica sobre el uso de wick drains en suelos ecuatorianos y reforzar el uso de herramientas de modelación numérica como apoyo al diseño geotécnico en terrenos blandos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el sector Brisas de Procarsa, cantón Durán, Ecuador, sobre suelos blandos de origen aluvial con baja resistencia al corte y permeabilidad muy reducida. Estas condiciones representan una limitación importante para estructuras de cimentación, por lo que el terreno requiere tratamiento previo antes de ejecutar obras de importancia.

La investigación siguió un enfoque cuantitativo de carácter aplicado, orientado a evaluar el comportamiento del suelo mediante modelación numérica y datos provenientes de ensayos geotécnicos CPTu. El estudio comprendió la recopilación de información de campo, la definición del perfil estratigráfico y la simulación de escenarios con y sin drenaje vertical.

La metodología se apoyó en antecedentes técnicos relacionados con consolidación acelerada, ensayos CPTu y sistemas de drenaje vertical. Los parámetros utilizados fueron seleccionados de acuerdo con las condiciones geotécnicas del sitio y la información disponible obtenida en campo.

Reconocimiento geotécnico del sitio

La caracterización del terreno se apoyó en información de estudios anteriores, complementada con ensayos de penetración cónica piezométrica (CPTu) ejecutados según la norma ISO 22476-1 (ISO, 2022). Mediante estos ensayos es posible evaluar la resistencia del suelo en profundidad, estimar parámetros de rigidez e identificar variaciones de presión intersticial.

La Figura 1 muestra el perfil estratigráfico del área de estudio. Se observa una secuencia predominantemente arcillosa de consistencia blanda a media que se extiende hasta aproximadamente 18 metros de profundidad. El material registra altos contenidos de humedad natural, baja permeabilidad y sobrepresiones de poro en estado natural, indicadores de su bajo grado de consolidación.

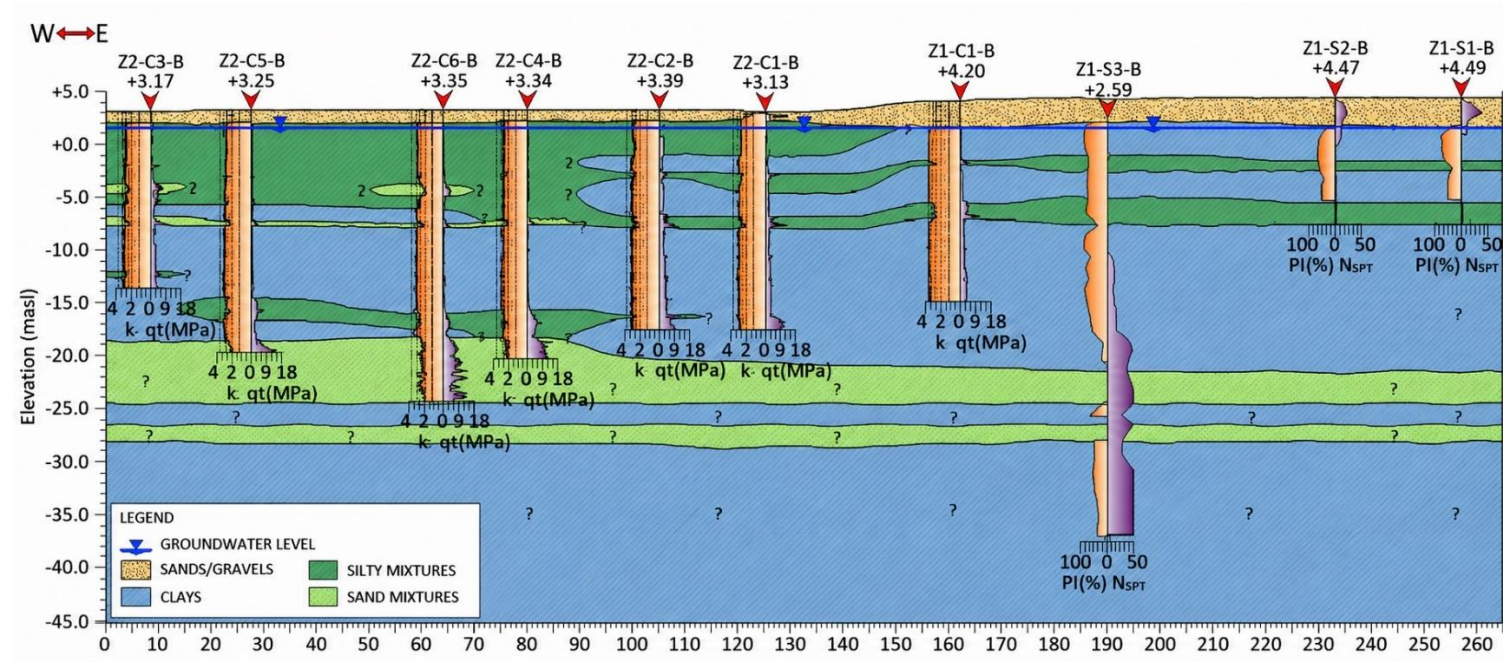


Figura 1
Estratigrafía del sitio
Arévalo Ochoa y Muñoz Buestán (2023)

Los ensayos CPTu (Figuras 2 y 3) revelaron zonas no drenadas con baja resistencia al corte ($C_u < 25$ kPa) y una respuesta mecánica homogénea en las capas arcillosas. Las variaciones entre CPTu 1 y CPTu 2 evidencian ligeras discontinuidades laterales, lo que refuerza la necesidad de intervenciones uniformes en superficie.

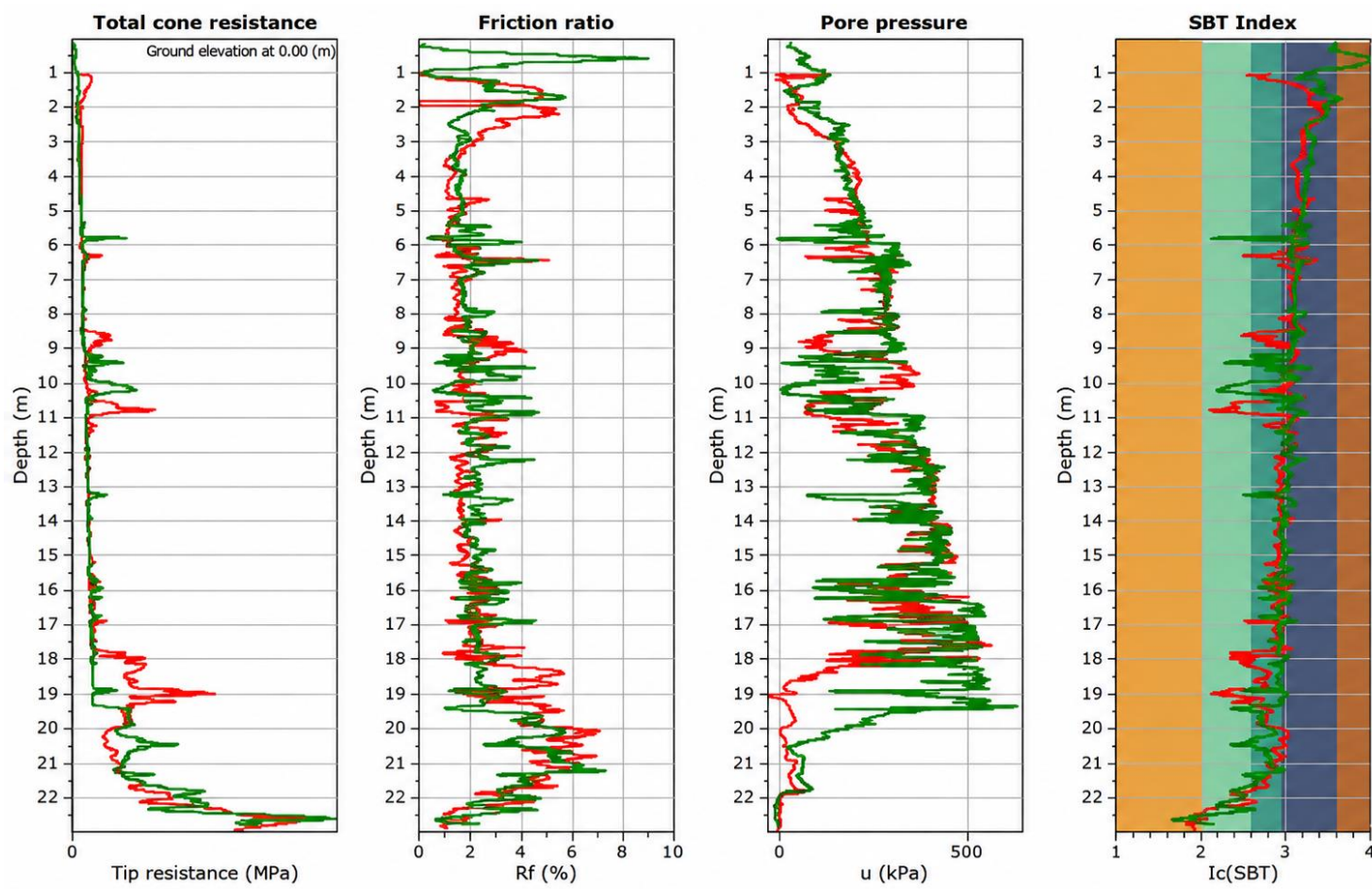


Figura 2
Gráficos comparativos de los ensayos CPTu 1 y CPTu 2

Adicionalmente, las capas de suelo fueron clasificadas según sus propiedades físicas y mecánicas, como densidad, índice de plasticidad y límites de Atterberg. La Tabla 1 resume los parámetros geotécnicos interpretados por estrato, que sirvieron de base para la modelación numérica.

TABLA 1
Parámetros geotécnicos por estrato

Estrato	(m)	C_u (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	k_v (m/s)	c_v (m ² /s)	ν	Descripción
Relleno superficial	0 – 1,5	15	22	6.000	1×10^{-7}	5×10^{-8}	0,35	Suelo arenoso limoso
Arcilla blanda	1,5 – 6,0	20	18	3.000	8×10^{-9}	1×10^{-8}	0,45	Alta plasticidad y humedad
Arcilla media	6,0 – 12,0	25	20	5.000	1×10^{-8}	2×10^{-8}	0,42	Menor compresibilidad
Arcilla arcillosa	12,0 – 18,0	30	28	10.000	5×10^{-7}	3×10^{-7}	0,30	Material de mejor drenaje

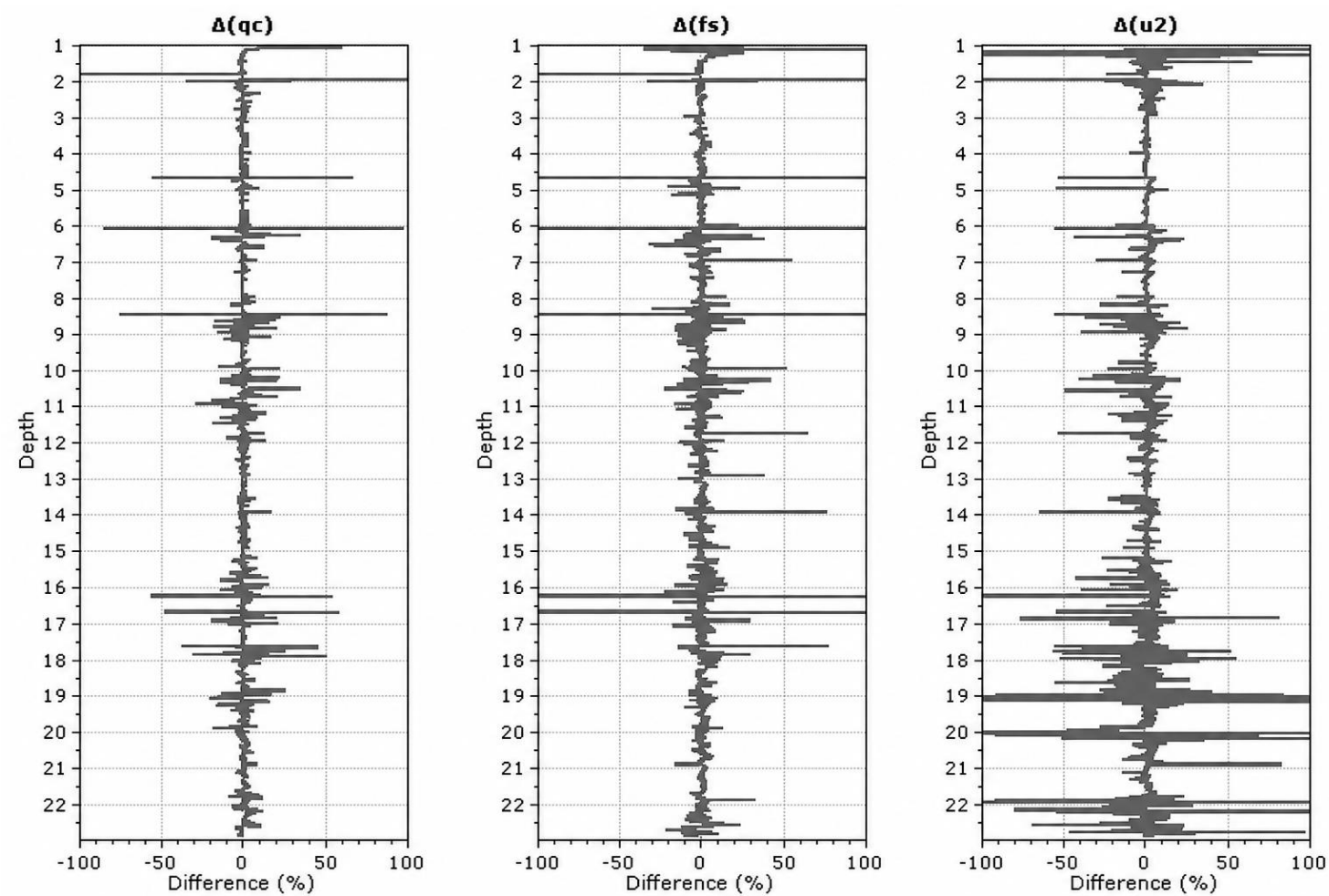


Figura 3

Variación en % entre los parámetros medidos para los ensayos CPTu 1 y CPTu 2

Diseño del tratamiento de mejora

Tomando en cuenta las condiciones del terreno, se optó por instalar drenes verticales prefabricados (wick drains) combinados con precarga escalonada. Esta solución acelera la consolidación al facilitar la evacuación del exceso de presión intersticial generado por la aplicación progresiva de cargas.

Los wick drains se instalaron en arreglo triangular con separación de 2 metros y profundidad de 12 metros. Esta disposición reduce la distancia de drenaje radial entre los drenes y el suelo circundante, favoreciendo una disipación más rápida de la presión de poro (Hansbo, 1981, pp. 677-682; Indraratna, Rujikiatkamjorn y Chu, 2015).

La precarga se aplicó en tres etapas sucesivas de 2 metros de altura cada una, hasta alcanzar una sobrecarga total equivalente a 6 metros (Ver Figura 4). Este esquema escalonado reduce los riesgos de inestabilidad inicial y permite monitorear con mayor precisión la respuesta del suelo a lo largo del proceso. Las fases constructivas se reprodujeron de forma secuencial en el modelo numérico, incluyendo periodos intermedios de consolidación.

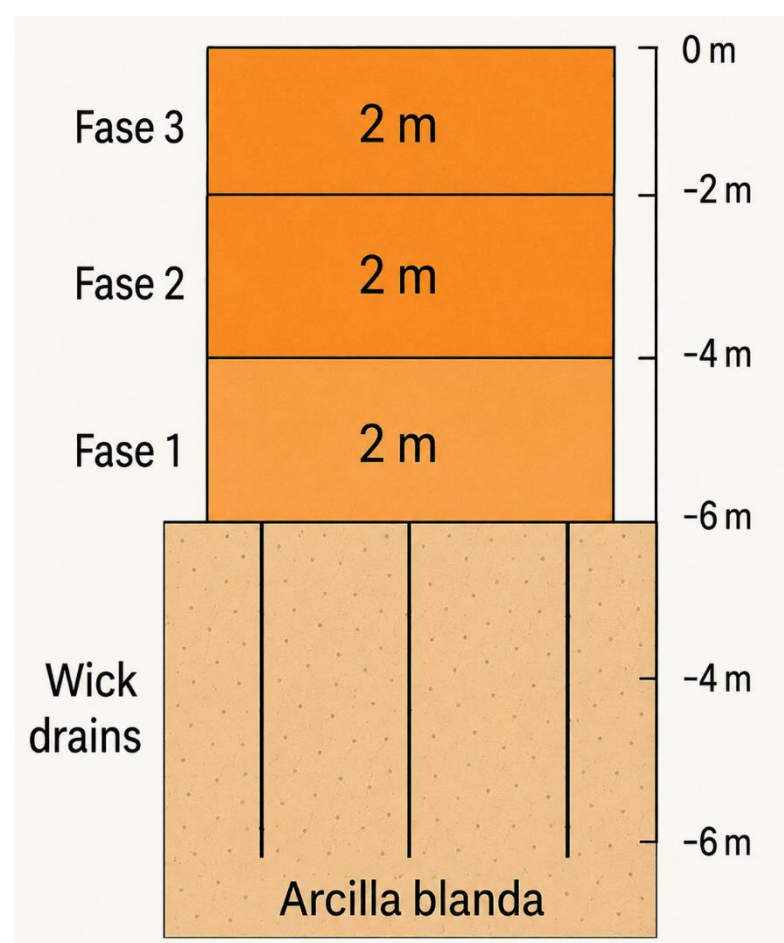


Figura 4

Fases de precarga

Modelación numérica

La definición de estos criterios geométricos y operativos se basa en la estrecha relación existente entre la distribución espacial de los drenos y el ritmo de la aplicación de las sobrecargas. En cuanto a esto Akan y Sert (2021) usaron el método de los elementos finitos para examinar el comportamiento de consolidación en los suelos blandos tratados con los drenes verticales y determinaron que tanto la distancia entre los PVD como la velocidad de aplicación de la sobrecarga son factores críticos que controlan la magnitud de los asentamientos y la velocidad de disipación de las presiones de poro. Su análisis numérico demostró que un espaciamiento óptimo combinado con una tasa de carga controlada, evita aumentos críticos de presión intersticial que pueden comprometer la estabilidad del depósito de baja permeabilidad. Esta evidencia teórica corrobora el planteamiento de una malla triangular de 2 metros y una precarga ejecutada en tres etapas sucesivas para el sector Brisas de Procarsa asegurando un equilibrio eficiente entre la aceleración del flujo radial y la seguridad del terreno durante la construcción.

La simulación se realizó con Plaxis 2D, versión 2020.2 (Plaxis BV, 2020), herramienta de elementos finitos ampliamente utilizada en ingeniería geotécnica. El modelo se construyó sobre un dominio bidimensional que representa el perfil del terreno, con restricciones en la base (sin desplazamientos verticales) y en los bordes laterales (sin desplazamientos horizontales).

Se utilizó un análisis de consolidación totalmente acoplada (Fully Coupled Consolidation), que simula simultáneamente el flujo de agua y la deformación del suelo en el tiempo. Este enfoque es especialmente adecuado para arcillas blandas de baja permeabilidad, ya que reproduce bien la generación y disipación de presiones de poro bajo carga.

La necesidad de combinar la simulación computacional con el comportamiento real del terreno ha sido ampliamente defendida en la práctica geotécnica actual. Kamal *et al.* (2025) realizaron un estudio de campo y numérico del desempeño de los drenos de tipo wick en las arcillas blandas mediante la combinación de la interpretación de las pruebas CPTu la instrumentación de campo y análisis de elementos finitos en dos y tres dimensiones (2D/3D). Los autores mostraron que si bien la modelación predictiva captura con precisión las tendencias del flujo radial y la deformación es indispensable contrastar y calibrar estos modelos numéricos con mediciones empíricas de campo para asegurar la validez de los parámetros de diseño. Esta integración metodológica justifica el enfoque del presente estudio que complementa el análisis numérico de la consolidación acoplada en Plaxis 2D con los registros de la instrumentación real obtenidos in situ.

La Figura 5 muestra el modelo generado, donde se aprecian el mallado del terreno, la disposición de los drenes verticales y el perfil estratigráfico simulado. La malla se refinó en las proximidades de los drenes, donde los gradientes hidráulicos son más pronunciados, para obtener resultados más precisos en términos de presión intersticial y deformación localizada.

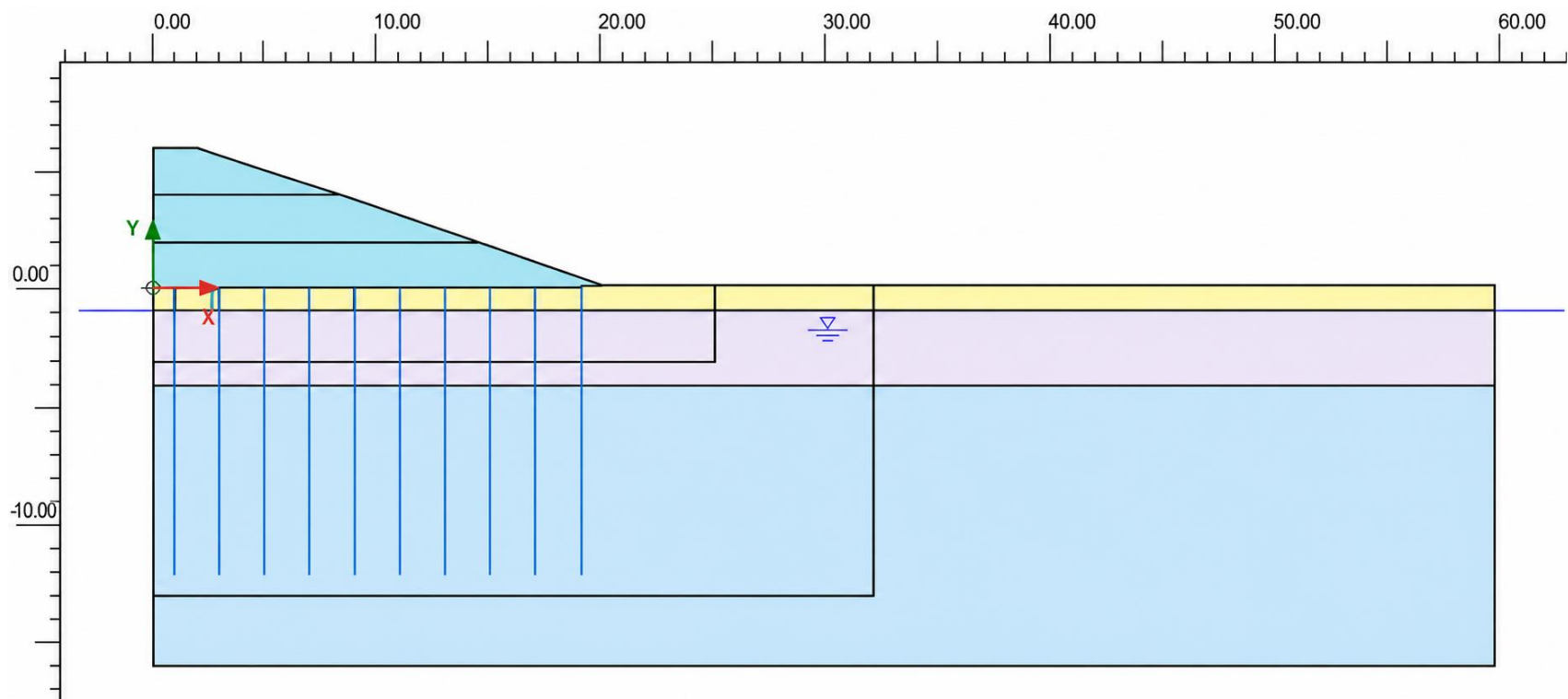


Figura 5
Modelo en Plaxis 2D

Los parámetros geotécnicos utilizados en el modelo se basaron en la interpretación de ensayos CPTu. Entre los parámetros empleados se incluyen:

- Módulo de elasticidad (E)
- Cohesión no drenada (Cu)
- Ángulo de fricción interna (ϕ)
- Coeficiente de permeabilidad vertical (kv)
- Coeficiente de consolidación (cv)
- Relación de Poisson (ν)

En todos los casos se adoptó comportamiento no drenado durante la fase de carga y flujo radial-vertical durante la consolidación. Se fijaron condiciones iniciales de presión de poro hidrostática y las fases constructivas y drenantes se activaron de forma secuencial.

Fundamento y selección del ensayo CPTu

A partir de las mediciones del CPTu se derivan parámetros como la cohesión no drenada (C_u), el módulo de elasticidad (E_s), el índice de sensibilidad (S_t), el coeficiente de consolidación (c_v) y la permeabilidad vertical (k_v), entre otros. La estimación de estos parámetros se realizó mediante correlaciones empíricas, principalmente las propuestas por Robertson (2009). Estudios recientes confirman también su utilidad para caracterizar perfiles estratigráficos en suelos blandos (Bol, 2023; Zhao, Wang y Xu, 2021).

Esta forma de hacer la caracterización mediante los ensayos piezocónicos se acaba de validar como uno de los métodos más seguros para obtener perfiles continuos de rigidez y de resistencia. Basarah *et al.* (2026) evaluaron la interpretación de la resistencia al corte no drenado. Los autores mostraron que la continuidad de los registros del CPTu elimina la incertidumbre asociada a los ensayos del laboratorio discretos proporcionando una base de datos de alta resolución espacial ideal para alimentar los modelos numéricos avanzados. El soporte técnico directo que se ofrece justifica la elección de los parámetros de la entrada empleados para los estratos arcillosos en el presente trabajo asegurando que la estratigrafía y las propiedades geomecánicas cargadas en Plaxis 2D reflejen fielmente la respuesta del terreno ante las solicitaciones de la precarga.

Además, el valor de los registros del piezocono no se reduce solamente a la definición de perfiles de resistencia, sino que también permite deducir el estado de esfuerzos históricos del depósito. En concordancia con este enfoque, Khodayari y Ahmadi (2022) Para determinar la resistencia al corte no drenada y la relación de sobreconsolidación en suelos arcillosos desarrollaron metodologías basadas en mediciones de CPTu y simulaciones por elementos finitos. Los autores destacaron que una estimación precisa del OCR a partir de la respuesta presiométrica y de punta del cono resulta imprescindible para parametrizar de manera realista los modelos numéricos de consolidación, ya que dicho indicador gobierna la transición del suelo a rangos de deformación puramente plástica bajo la influencia de una sobrecarga. Este soporte analítico confirma la metodología empleada para el sector Brisas de Procarsa, demostrando que el CPTu es una herramienta completa que permite obtener los parámetros mecánicos y de estado necesarios para reproducir fielmente el comportamiento hidromecánico del suelo en Plaxis 2D.

El CPTu también permite identificar variaciones en la resistencia del terreno y zonas con mayor acumulación de presión intersticial, aspecto importante en arcillas blandas saturadas como las del sitio estudiado (Moghadari Poor *et al.*, 2023).

En el presente estudio, el CPTu permitió definir con mayor detalle la estratigrafía del terreno y obtener parámetros de entrada para la modelación en Plaxis 2D.

Procedimiento constructivo de wick drains

Los drenes verticales prefabricados (wick drains) son una de las técnicas más efectivas para acelerar la consolidación en suelos finos saturados con permeabilidades muy bajas (Ver Figura 6). Están formados por un núcleo plástico corrugado o canalizado, generalmente de polipropileno, recubierto por un geotextil no tejido que actúa como filtro: deja pasar el agua e impide la intrusión de partículas de suelo.

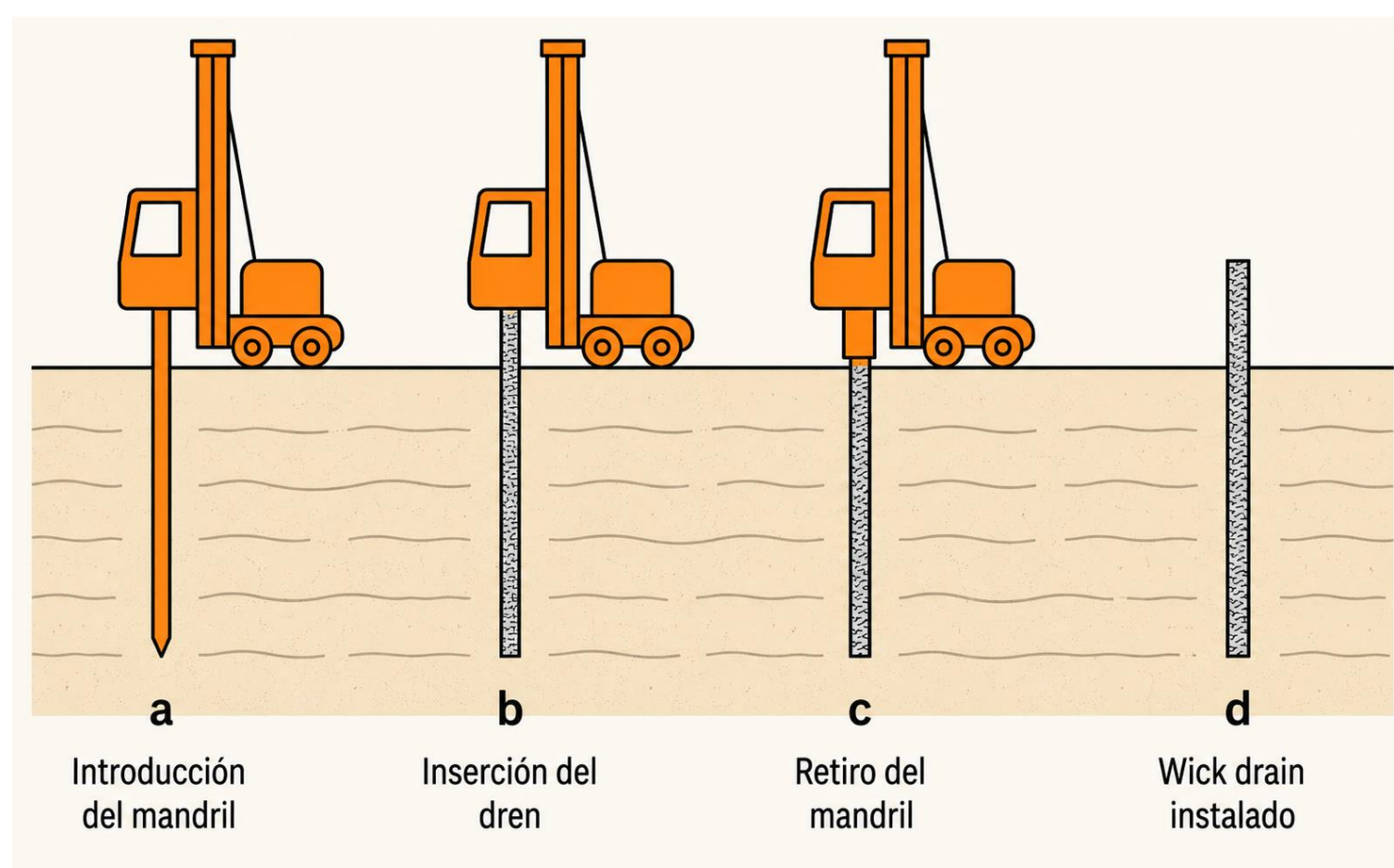


Figura 6
Instalación de Wick Drains

Según Hansbo (1981), la disposición triangular con separación de 2 metros genera un radio equivalente de drenaje de aproximadamente 1,15 metros, lo que reduce significativamente el tiempo de consolidación respecto al drenaje natural vertical. En la práctica, los wick drains pueden acortar los plazos de consolidación entre un 60 % y un 90 %, según las propiedades del suelo y la magnitud de la sobrecarga aplicada.

La configuración geométrica del sistema de drenaje es un factor sensible al tiempo como ha sido ampliamente constatado en los proyectos de la habilitación urbana sobre los estratos arcillosos muy compresibles. Siguiendo esto Hariati, Chayati y Jannah (2025) llevaron a cabo un estudio de caso del mejoramiento de los suelos blandos mediante los drenes verticales prefabricados evaluando la influencia directa de la variación del espaciamiento de la malla sobre las tasas de deformación temporal.

Sus resultados demostraron de una manera concluyente que la disminución controlada de las distancias de separación entre los PVD optimiza el gradiente hidráulico y reducen la distancia recorrida por el agua intersticial, acortando drásticamente los tiempos requeridos para alcanzar el porcentaje de consolidación deseado en depósitos saturados. Esta evidencia empírica confirma la eficiencia del patrón triangular a 2,0 metros proyectado para Brisas de Procarsa, validando que dicha densidad de perforación equilibra de manera adecuada la viabilidad técnico-económica en obra con la aceleración necesaria para estabilizar el terreno en los plazos constructivos requeridos.

El aceleramiento del flujo y la idoneidad del espaciamiento se complementan con la consideración de las limitantes hidráulicas intrínsecas de los materiales que componen el sistema. Con ello Zhang *et al.* (2024) extendieron la teoría de consolidación acoplada desarrollando así una solución analítica para los drenes verticales bajo las condiciones de fronteras de drenaje continuo incorporando explícitamente el efecto combinado de la zona de alteración (smear zone) y la resistencia del propio dren (well resistance). Los autores demostraron que la eficiencia en la disipación de las sobrepresiones del poro no está gobernada solamente por la proximidad geométrica entre los conductos artificiales sino también por la capacidad del núcleo plástico para evacuar el flujo acumulado sin saturarse y por la permeabilidad remanente del suelo remodelado a su alrededor.

El desempeño del sistema depende de una instalación adecuada, especialmente de la verticalidad del dren y de la integridad del geotextil durante la inserción. En suelos con alta resistencia a la penetración puede requerirse preperforación o equipos de mayor capacidad.

Modelo constitutivo y elementos numéricos

Para analizar la consolidación inducida por la precarga y los drenes verticales, se empleó Plaxis 2D. La simulación partió de los resultados de los ensayos CPTu, que definieron la estratigrafía y los parámetros geotécnicos del modelo.

El modelo fue representado mediante una malla de elementos finitos ajustada al perfil del terreno, con refinamiento en las zonas próximas a los drenes para representar mejor los gradientes hidráulicos y los desplazamientos verticales.

Para simplificar geométricamente un sistema de drenaje intrínsecamente tridimensional a un entorno bidimensional de deformación plana, hace falta rigor en las propiedades de flujo asignadas. Théodore, Demir y Yildiz (2024) estudiaron la simulación numérica en 2D de los drenes verticales prefabricados mediante los distintos matching methods y concluyeron que sí es técnicamente factible reproducir en un plano bidimensional el comportamiento tridimensional del drenaje radial siempre que se calibren adecuadamente los factores como la resistencia a la descarga del dren (well resistance) y el coeficiente de permeabilidad en la zona de alteración del suelo (smear zone). Los autores concluyen que la correcta aplicación de estas aproximaciones matemáticas permite que Plaxis 2D prediga con alta precisión la disipación del exceso de presión de poro y el desarrollo de asentamientos. Este fundamento justifica la validez del modelo bidimensional formulado para el sector Brisas de Procarsa asegurando que las condiciones hidráulicas introducidas capturen de manera confiable el mecanismo real de consolidación acelerada.

Para simular la respuesta del terreno se utilizó un modelo de consolidación acoplada tiempo-deformación, considerando tanto las fases de precarga como las condiciones de drenaje vertical inducidas por los drenes.

El comportamiento mecánico de las arcillas compresibles se modeló con el modelo constitutivo Soft Soil, adecuado para capturar la no linealidad de arcillas blandas durante la consolidación. Los parámetros de cada estrato se obtuvieron de los ensayos CPTu y se complementaron con valores de referencia de la literatura técnica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La modelación en Plaxis 2D evaluó la respuesta del terreno arcilloso ante dos escenarios: uno sin mejora (solo precarga) y otro con drenes verticales prefabricados. En ambos casos se aplicó una sobrecarga de 6 metros distribuida en tres fases constructivas de 2 metros, replicando la secuencia escalonada del diseño.

Las diferencias en la respuesta del suelo fueron importantes. Sin drenes, el tiempo para superar el 90 % de consolidación fue mayor a 500 días, limitado por la baja permeabilidad de las arcillas blandas. Con wick drains, ese mismo grado de consolidación se alcanzó en alrededor de 120 días, una reducción del 76 % en el plazo. Esto se debe a las trayectorias de flujo radial que generan los drenes, las cuales reducen las distancias de drenaje y aceleran la disipación de presión de poro. La respuesta observada es consistente con los mecanismos de consolidación acelerada reportados para suelos arcillosos blandos sometidos a drenaje radial.

La optimización de estos mecanismos hidráulicos por medio de la modificación del gradiente de flujo ha sido detalladamente caracterizada en recientes entornos deltaicos. Nguyen *et al.* (2025) estudiaron la consolidación radial de suelos blandos en el delta del río rojo, considerando el impacto del diámetro del dren y la trayectoria del flujo en muestras inalteradas y remodeladas. Su estudio demostró que la inserción de conductos artificiales de drenaje acorta drásticamente los trayectos que debe recorrer el agua intersticial para escapar de la matriz del suelo, lo que acelera de forma óptima la velocidad de disipación de las sobrepresiones de poro, incluso al considerar la pérdida de permeabilidad local inducida por el remodelado adyacente al dren. Esta base física explica el comportamiento observado en la simulación de Brisas de Procarsa, aportando el sustento teórico para entender por qué el paso de un esquema de drenaje vertical natural a uno predominantemente radial y asistido logra colapsar los tiempos de consolidación a una fracción del periodo original.

La Figura 7 muestra la evolución de las deformaciones verticales acumuladas en el tiempo para ambos modelos. Aunque el asentamiento total final es similar en los dos casos (alrededor de 39 cm), el modelo con drenes llega a ese valor de forma más rápida y continua, mientras que el modelo sin drenes presenta una curva más tendida que se extiende más allá de los 500 días.

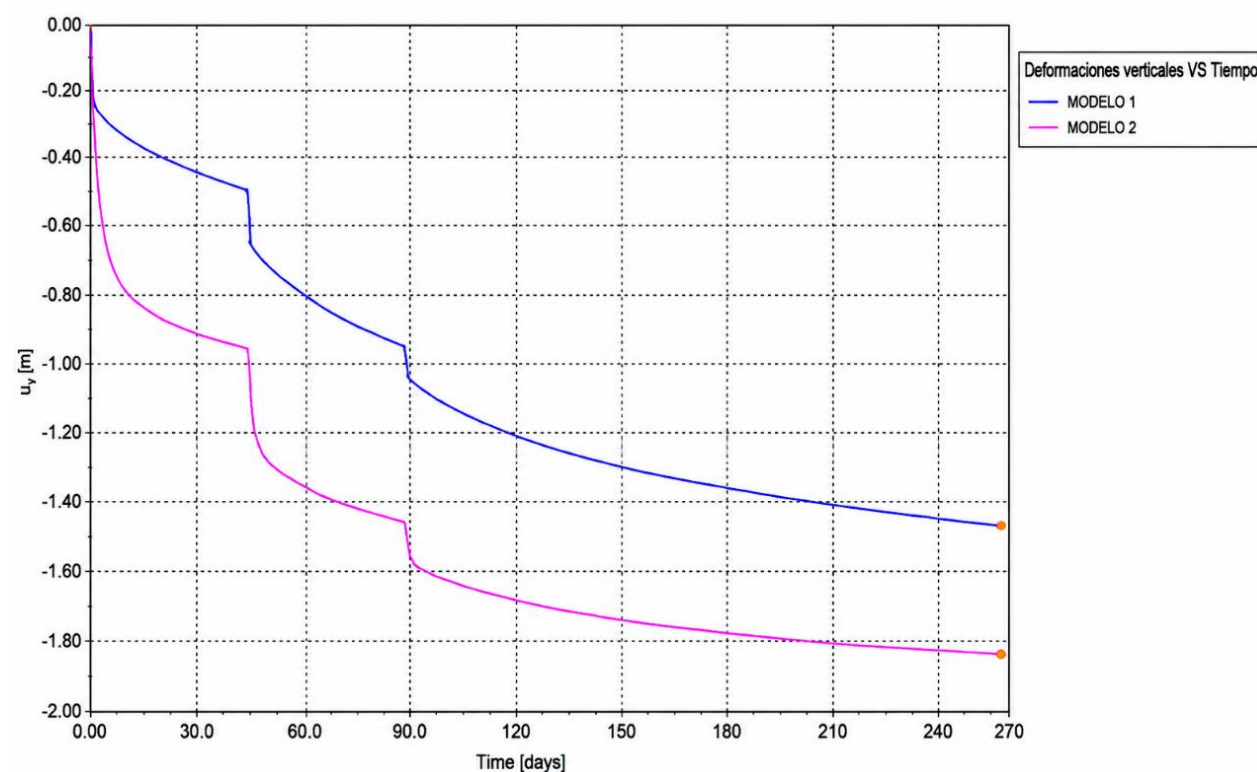


Figura 7
Deformaciones vs. Tiempo

Técnicamente, esto confirma que el sistema con drenes completa la consolidación dentro del período analizado, en tanto que el modelo sin mejora mantiene asentamientos remanentes por la lenta disipación de presiones intersticiales.

Esta diferencia en la evolución de las deformaciones pone de relieve la importancia de analizar el comportamiento del terreno más allá de la fase de la consolidación primaria. Al respecto Ibrahim *et al.* (2022) estudiaron el impacto de los drenes verticales y la precarga en el comportamiento de fluencia (creep) o la consolidación secundaria de las arcillas blandas concluyendo que la aceleración del drenaje radial no solo mejora la disipación de las presiones de los poro hidrostáticas sino que también atenúa notablemente los efectos de los asentamientos diferidos a largo plazo. En los suelos muy compresibles la falta de un tratamiento apropiado extiende la transmisión de las cargas sobre la estructura del suelo lo cual aumenta la magnitud de las deformaciones secundarias residuales. De esta manera el que el modelo con drenajes verticales alcance la consolidación primaria acelerada dentro del plazo analizado se constituye como un factor crítico de seguridad para mitigar estos riesgos de deformación plástica a largo plazo en el sector Brisas de Procarsa.

También se observó una mayor uniformidad del asentamiento en el modelo con drenes. Esta homogeneidad reduce la probabilidad de deformaciones diferenciales, lo que es crítico para garantizar la estabilidad de estructuras construidas sobre depósitos arcillosos blandos. El comportamiento es coherente con la eficiencia hidráulica descrita en la literatura para mallas en patrón triangular (Hansbo, 1981, pp. 677-682; Indraratna, Rujikiatkamjorn y Chu, 2015).

Respecto a la presión de poro, disipar el 50 % de esta tomó cerca de 180 días sin drenes, frente a solo 40 días con el sistema instalado. Esta diferencia confirma el efecto del drenaje acelerado sobre el comportamiento hidromecánico del terreno.

La reducción más rápida de la presión de poro favoreció además un incremento progresivo de la resistencia al corte durante las fases constructivas.

Este patrón de ganancia de resistencia y respuesta hidromecánica está íntimamente relacionado con las dinámicas de la transferencia de esfuerzos analizadas en estudios mundiales sobre consolidación. Fan *et al.* (2023) realizaron un estudio comparativo de caso para mejorar los suelos arcillosos mediante drenaje comparando los efectos de la precarga por vacío con la precarga convencional por sobrecarga mecánica. Su investigación reveló que aunque ambos métodos provocan grandes cantidades del asentamiento vertical disipación de sobrepresiones de poro y un aumento directo en la resistencia al corte no drenada del suelo la precarga por sobrecarga provoca gradientes de esfuerzos y patrones de movimiento horizontal distintos debido al confinamiento y al peso del material de relleno. Este análisis comparativo enriquece la interpretación del modelo en Brisas de Procarsa, confirmando que el empleo de un terraplén de 6 m no solo actúa como motor hidráulico para la expulsión del agua intersticial a través de los wick drains sino que reestructura la matriz del suelo blando consolidando el comportamiento del binomio esfuerzo-deformación.

Al comparar los resultados del modelo numérico con los registros de la placa de asentamiento en campo, las diferencias fueron inferiores al 10 %, lo que respalda la confiabilidad del modelo para representar el comportamiento real del suelo durante la consolidación.

El reducido margen de calibración y la capacidad predictiva coinciden con lo observado en proyectos de infraestructura a gran escala sobre depósitos cohesivos. En este contexto Kuganeswaran, Rahim y Ali (2021) realizaron un estudio de caso sobre la consolidación de los suelos blandos mejorados mediante drenes verticales prefabricados (wick drains) y precarga por sobrecarga comparando directamente los asentamientos simulados por la herramienta de elementos finitos PLAXIS frente a los desplazamientos verticales registrados por la instrumentación en obra. Sus resultados confirmaron que el análisis predictivo computacional exhibe una excelente correlación con el monitoreo físico de campo lo que ratifica que la modelación numérica acoplada es un método robusto y plenamente fiable para validar el progreso temporal de las deformaciones. Esta coincidencia metodológica confirma los resultados obtenidos para el sector Brisas de Procarsa lo que justifica el uso de Plaxis 2D como una herramienta de alta precisión para poder optimizar los diseños geotécnicos y poder predecir el comportamiento real de los asentamientos inducidos.

TABLA 2
Comparación de resultados de consolidación con y sin wick drains

Parámetro observado	Sin drenes	Con Wick Drains
Tiempo para alcanzar 90% de consolidación	> 500 días	120 días aprox.
Asentamiento total esperado	38,5 cm	39,2 cm
Tiempo para disipar 50% de presión de poro	180 días	40 días
Uniformidad del asentamiento	Baja (Gradual)	Alta (Más homogénea)
Eficiencia hidráulica del sistema	Baja	Alta

La Tabla 2 resume los principales indicadores. Los drenes verticales no solo aceleraron el proceso, sino que también mejoraron la distribución del asentamiento, aumentaron la eficiencia hidráulica y disminuyeron el riesgo de consolidaciones diferenciales. El asentamiento final fue marginalmente mayor en el caso con drenes (39,2 cm frente a 38,5 cm), lo que se explica por una consolidación más completa dentro del período analizado, sin que ello implique un incremento significativo en la magnitud total del asentamiento.

Este pequeño incremento en el asentamiento calculado bajo la configuración drenada refleja complejas dinámicas de compresión que perduran una vez que se ha completado la fase inicial de diseño. A ese respecto Kang, Kim y Yun (2021) se estudió el desempeño medido y el análisis de asentamiento residual en terreno blando marino mejorado con PVD, demostrando que aún después de una exitosa aceleración de la consolidación primaria coexisten componentes de deformación remanente asociados a la disipación tardía de presiones intersticiales atrapadas en microestratos y al reajuste viscoso de la estructura del suelo (compresión secundaria). Los autores afirman que si en las primeras fases se registra un mayor grado de deformación controlada, se reduce el riesgo de que haya las deformaciones imprevistas tras la construcción. Dentro del contexto Brisas de Procarisa esta conducta confirma que los 39.2 cm conseguidos en el terreno con wick drains representan una evacuación hidráulica más exhaustiva y eficiente de los excesos de presión, lo que reduce significativamente el margen de asentamientos residuales destructivos durante la vida útil de las futuras estructuras.

El análisis de estas deformaciones remanentes y la interacción hidráulica intradren pone de relieve la conveniencia del examinar las formulaciones numéricas que integren los fenómenos reológicos no lineales. Bajo esta línea Li et al. (2024) desarrollaron un modelo axilsimétrico de consolidación bajo las deformaciones finitas para suelos blandos con drenes verticales bajo cargas combinadas, incorporando simultáneamente el comportamiento de fluencia (creep) los efectos de la alteración por instalación y el flujo no lineal o no Darcy. Los autores mostraron que en arcillas muy compresibles la velocidad de filtración no es siempre estrictamente lineal con el gradiente hidráulico por las variaciones estructurales del suelo durante la carga y por ello son imprescindibles herramientas avanzadas como Soft Soil o Soft Soil Creep para capturar esa complejidad. Para el caso de Durán la correspondencia con este enfoque matemático avanzado permite ratificar que, si bien el modelo bilineal actual provee una aproximación práctica excelente para el diseño, la consideración explícita del flujo no Darcy y las deformaciones finitas en simulaciones subsecuentes, optimizaría la predicción de las tasas de disipación tardía de la presión intersticial.

Por su parte, la precarga escalonada contribuyó a controlar las deformaciones durante el proceso constructivo, limitando los picos de presión de poro y asegurando una respuesta progresiva y estable del terreno. En conjunto, los resultados muestran que esta combinación de técnicas puede aplicarse de manera efectiva en depósitos arcillosos blandos con condiciones similares a las del área estudiada.

La literatura geotécnica enfocada en infraestructuras costeras similares brinda un sólido respaldo al éxito de este comportamiento controlado bajo inducción de drenaje radial y cargas secuenciales. De acuerdo con estos resultados Wu, Liu y Xie (2023) estudiaron las características de la deformación y la resistencia de los suelos blandos de origen marino tratados con los drenes verticales prefabricados y construcciones con carga progresiva por etapas. Integrando el monitoreo in situ y modelación numérica los autores evidenciaron que la asistencia de los PVD durante la carga escalonada incrementa significativamente el grado de la consolidación del depósito blando controlando los desplazamientos laterales y facilitando un aumento progresivo de la resistencia al corte a medida que se expulsa el agua intersticial. Estos resultados corroboran la validez de la estrategia de diseño simulada para Brisas de Procarisa confirmando que el condicionamiento del ritmo de aplicación de la precarga no sólo mitiga el riesgo de una falla por cortante inicial sino que reestructura favorablemente las propiedades mecánicas finales del terreno arcilloso.

CONCLUSIONES

La modelación numérica realizada en Plaxis 2D muestra que la combinación de precarga escalonada y drenes verticales prefabricados (wick drains) permite acelerar de forma efectiva la consolidación de suelos arcillosos blandos con baja capacidad portante. Aplicada en el sector Brisas de Procarisa, cantón Durán, Ecuador, la técnica demostró reducir los tiempos de consolidación de manera considerable, mejorar la estabilidad del terreno y producir asentamientos más uniformes.

Sin drenes, el terreno tardó más de 500 días en alcanzar el 90 % de consolidación, reflejo directo de las limitaciones del drenaje vertical natural en suelos poco permeables. Con la incorporación de los drenes verticales, ese tiempo se redujo a aproximadamente 120 días, lo que representa una mejora superior al 75 %. Esto confirma que los wick drains abren vías preferentes para el flujo de agua, aceleran la disipación del exceso de presión de poro y acortan el tiempo de respuesta del terreno ante la carga.

Los drenes también favorecieron la uniformidad del asentamiento, lo cual es crítico para evitar deformaciones diferenciales que puedan afectar la integridad estructural de futuras obras civiles. El arreglo triangular con separación de 2 metros y profundidad de 12 metros mostró un comportamiento hidráulico adecuado, optimizando la distribución del flujo radial y maximizando la cobertura de drenaje en el área intervenida.

La precarga escalonada en tres fases permitió controlar mejor el proceso. Al cargar el suelo de forma gradual se redujeron las deformaciones inmediatas y se pudo monitorear el comportamiento entre etapas, lo que permitió evaluar la respuesta del terreno en cada etapa del proceso. Esta metodología es especialmente apropiada para suelos saturados de alta compresibilidad, como los de zonas aluviales costeras.

Plaxis 2D permitió representar el comportamiento del suelo durante las distintas fases de carga y consolidación, mostrando resultados coherentes con las condiciones observadas en campo. La modelación facilitó el análisis de asentamientos, presiones intersticiales y tiempos de consolidación bajo diferentes condiciones de drenaje.

En conjunto, los resultados muestran que la combinación de precarga y drenes verticales puede aplicarse de manera efectiva en depósitos arcillosos blandos con características semejantes a las del área estudiada. El estudio también demuestra que Plaxis 2D es adecuado para evaluar y predecir el comportamiento hidromecánico del suelo bajo este tipo de condiciones geotécnicas.

RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos y el comportamiento observado del terreno, se plantean las siguientes recomendaciones para proyectos desarrollados sobre suelos blandos en zonas costeras o aluviales:

El uso de wick drains puede reducir considerablemente los tiempos de consolidación en suelos arcillosos saturados de baja permeabilidad, especialmente en proyectos donde se requiere disminuir los tiempos de espera antes del inicio de la construcción definitiva.

La aplicación de precarga en fases progresivas, como la utilizada en este estudio, permitió un mejor control del comportamiento del terreno y redujo las deformaciones inmediatas durante el proceso constructivo. Este procedimiento puede resultar conveniente en proyectos desarrollados sobre suelos de alta compresibilidad.

Aunque el patrón triangular utilizado mostró un comportamiento hidráulico adecuado, podrían evaluarse otras configuraciones geométricas según las condiciones del terreno y las características de cada proyecto.

La modelación numérica con Plaxis 2D resulta útil para analizar el comportamiento del terreno, aunque la confiabilidad de los resultados depende directamente de la calidad de los datos geotécnicos obtenidos en campo.

El monitoreo de asentamientos y presión de poro durante la ejecución del tratamiento permite comparar el comportamiento real del terreno con los resultados obtenidos en la modelación numérica.

En estudios futuros podrían evaluarse modelos constitutivos más avanzados, como Soft Soil o Soft Soil Creep, para representar con mayor precisión el comportamiento de arcillas blandas sometidas a consolidación.

También resulta importante registrar y documentar los resultados obtenidos en cada proyecto, ya que esta información puede servir como referencia para futuras intervenciones en condiciones similares.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al M. Sc. Carlos Grau Sacoto y al M. Sc Davide Bezenson por haber sido guía permanente y haber proporcionado los insumos para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Contribución de los autores

Cristhian Alexi Macías Loor: conceptualización, análisis formal, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, software, validación.

Wilson Andrés Cabezas Panchana: curación de datos, análisis formal, software.

Maybe Liliana Pérez Párraga: supervisión, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Cesión de derechos y declaración de conflicto de intereses

La revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo conserva los derechos patrimoniales (copyright) de la obra publicada, al mismo tiempo que promueve y permite su reutilización. La obra se publica en edición electrónica bajo la licencia Creative Commons CC-BY 4.0, que permite a los usuarios compartir, copiar y redistribuir el contenido, siempre que se dé el debido reconocimiento a los autores.

(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es_ES)

Los autores declaran haber respetado los principios éticos de investigación y estar libre de cualquier conflicto de intereses.

Declaración de uso de Inteligencia Artificial Generativa

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron la herramienta ChatGPT para la corrección gramatical y de estilo del texto y generación de imágenes y gráficos (estimado en un 10% del trabajo). Tras el uso de esta herramienta, los autores revisaron, validaron y editaron críticamente el contenido para garantizar su precisión e integridad científica. La herramienta de IA no fue empleada en la definición de la metodología ni en el análisis de datos. Los autores asumen la plena responsabilidad por la veracidad, originalidad, integridad científica y autoría del contenido publicado.

REFERENCIAS

- Adimasu, A., Mekonnen, B., Guadu, T., Gizaw, Z. y Adane, T. (2016) "Bacteriological quality assessment of selected street foods and their public health importance in Gondar Town, North West Ethiopia", *Global veterinaria*, 17(3), pp. 255-264. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308918440_Bacteriological_Quality_Assessment_of_Selected_Street_Foods_and_Their_Public_Health_Importance_in_Gondar_Town_North_West_Ethiopia
- Akan, R. y Sert, S. (2021) "Investigation of the consolidation behavior of soft soil improved with vertical drains by finite element method", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(3), pp. 93–105. DOI: [10.24107/ijeas.1002115](https://doi.org/10.24107/ijeas.1002115)
- Arévalo Ochoa, J. y Muñoz Buestán, S. (2023) Geotechnical characterization of the soil profile before and after preloading, a case study of soft soils in Durán. Tesis de maestría. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63639> [Consultado 12 abril 2026].
- Basarah, Y. I., Salamah, M. D., Irsyam, M., Apriadi, D., Susila, E., Krisnanto, S. y Marvel, J. (2026) "Interpreting the undrained shear strength of soft clays using CPTu: Evaluation of cone bearing factor (N_{kt}) and related practical soil parameters at selected sites in Western Java", *Geotechnics*, 6(1). DOI: [10.3390/geotechnics6010023](https://doi.org/10.3390/geotechnics6010023)
- Bol, E. (2023) "A new approach to the correlation of SPT-CPT depending on the soil behavior type index", *Engineering Geology*, 314. DOI: [10.1016/j.enggeo.2023.106996](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.106996)
- Cedeño-Palacios, W., Zumba-Aguirre, J., Murillo-Urdánigo, J., Solórzano, J., Briones-Bitar, J. y Carrión-Mero, P. (2024) "Assessment of soil consolidation techniques in Ecuador: Preloading and wick drains in the Exodo-Fertisa Project", *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 19(4), pp. 1151–1165. DOI: [10.18280/ij dne.190406](https://doi.org/10.18280/ij dne.190406)
- Fan, L., Xun, Z. y Peng, S. (2023) "A comparative case study on drainage consolidation improvement of soft soil under vacuum preloading and surcharge preloading", *Applied Sciences*, 13(9). DOI: [10.3390/app13095782](https://doi.org/10.3390/app13095782)
- Hansbo, S. (1981) "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Ground Engineering", *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Stockholm: Soil Mechanics, Prefabricated Vertical Drains, pp. 677-682. Disponible en: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981_03_0132.pdf [Consultado 12 abril 2026].
- Hariati, F., Chayati, N. y Jannah, L. R. (2025) "Analysis of soft soil improvement using prefabricated vertical drains (PVD): A case study of Rorotan, Cilincing, North Jakarta", *ASTONJADRO*, 14(2), pp. 565–572. DOI: [10.32832/astonjadro.v14i2.17556](https://doi.org/10.32832/astonjadro.v14i2.17556)
- Ibrahim, N., Fayed, A. L., Ahmed, A. A. y Hammad, M. S. (2022) "Effect of vertical drains and preloading on the creep behavior of soft clay", *Innovative Infrastructure Solutions*, 7. DOI: [10.1007/s41062-022-00780-5](https://doi.org/10.1007/s41062-022-00780-5)
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C. y Chu, J. (2015) *Ground improvement: Case histories*. Butterworth-Heinemann. DOI: [10.1016/C2015-0-00462-2](https://doi.org/10.1016/C2015-0-00462-2)
- ISO (2022) *ISO 22476-1:2022: Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Cone penetration test (CPTU)*. Ginebra: Organización Internacional de Normalización. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:22476:-1:ed-2:v1:en> [Consultado 12 abril 2026]
- Kamal, M. A., Rabie, M. H., Hussein, H. M. y Mostafa, M. A. (2025) "Numerical and field study of wick drains performance in soft clay", *Innovative Infrastructure Solutions*, 10. DOI: [10.1007/s41062-025-01921-2](https://doi.org/10.1007/s41062-025-01921-2)
- Kang, G., Kim, T. H. y Yun, S.-K. (2021) "Measured performance and analysis of the residual settlement of a PVD-improved marine soft ground", *Journal of Ocean University of China*, 20, pp. 1055–1066. DOI: [10.1007/s11802-021-4625-3](https://doi.org/10.1007/s11802-021-4625-3)
- Khodayari, M. R. y Ahmadi, M. M. (2022) "Self CPTu measurements for determining s_u and OCR in clay soils: Simulation and practical applications", *International Journal of Geomechanics*, 22(11). DOI: [10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002567)
- Kuganeswaran, N., Rahim, A. y Ali, N. (2021) "Consolidation in soft soil—Case study on prefabricated vertical drains (PVDs)", *The Open Civil Engineering Journal*, 15, pp. 310–319. DOI: [10.2174/1874149502115010310](https://doi.org/10.2174/1874149502115010310)
- Li, P. L., Yin, Z. Y., Song, D. B., Yin, J. H. y Pan Y. (2024) "Axisymmetric finite strain consolidation model for soft soil consolidation with vertical drains under combined loading considering creep and non-Darcy flow", *Geotextiles and Geomembranes*, 52(3), pp. 241–259. DOI: [10.1016/j.geotexmem.2023.10.008](https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.10.008)
- Moghadari Poor, M., Azarafza, M. y Derakhshani, R. (2023) "A correlation based on pressuremeter, SPT and CPT tests for characterizing coastal alluvium: A study for phase 14 South Pars, Iran", *MethodsX*, 10. DOI: [10.1016/j.mex.2022.101938](https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101938)

- Nguyen, T. D., Nguyen, C. K. y Nguyen, T. T. (2025) "Radial consolidation of soft soils in Vietnam's Red River Delta: Effect of drain diameter on undisturbed and remolded samples", *Geotechnical and Geological Engineering*, 43. DOI: [10.1007/s10706-025-03178-z](https://doi.org/10.1007/s10706-025-03178-z)
- Plaxis BV (2020) *PLAXIS 2D – Reference Manual*. Delft: Bentley Systems. Disponible en: <https://www.plaxis.com> [Consultado 3 julio 2025]
- Robertson, P. K. (2009) "Interpretation of cone penetration tests - a unified approach", *Canadian Geotechnical Journal*, 46, pp. 1337–1355. Disponible en: <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/Robertson%202009%20CGJ.pdf>
- Terzaghi, K., Peck, R. B. y Mesri, G. (1996) *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. 3ª ed. USA: John Wiley y Sons, Inc. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2012/1/CI4402/1/material_docente/bajar?bajar=1&id=420409
- Théodore, A., Demir, A. y Yildiz, A. (2024) "2D numerical analysis of prefabricated vertical drains using different matching methods", *Applied Sciences*, 14(12). DOI: [10.3390/app14124970](https://doi.org/10.3390/app14124970)
- Wu, X. T., Liu, J. N. y Xie, Z. M. (2023) "Deformation and strength characteristics of marine soft soil treated by prefabricated vertical drain-assisted staged riprap under seawall construction", *Buildings*, 13(9). DOI: [10.3390/buildings13092322](https://doi.org/10.3390/buildings13092322)
- Zhang, Y., Hou, B., Ma, K., Zhang, J., Zong, M. y Kong, L. (2024) "Double drainage consolidation theory of vertical drains based on continuous drainage boundary conditions", *Buildings*, 14(4). DOI: [10.3390/buildings14041137](https://doi.org/10.3390/buildings14041137)
- Zhao, T., Wang, Y. y Xu, L. (2021) "Efficient CPT locations for characterizing spatial variability of soil properties within a multilayer vertical cross-section using information entropy and Bayesian compressive sensing", *Computers and Geotechnics*, 137. DOI: [10.1016/j.compgeo.2021.104260](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104260)