

**Estrategias para mitigar la incidencia producida por el levantamiento del suelo en la
hinca de elementos prefabricados en Bogotá**

Rafael Eduardo Cardozo Fajardo¹

Paula Sylvana Cubillos Bustos²

Jhon Jairo Rojas Torres³

Nota de autor

Agradecemos a Dios por brindarnos la sabiduría, fortaleza y guía necesarias para completar este trabajo. A nuestro director de tesis, Andrés López, por su invaluable orientación y apoyo constante. A nuestra familia, especialmente a nuestros padres, por su amor, paciencia y apoyo incondicional. Finalmente, agradecemos a nuestros amigos y compañeros por su compañerismo y aliento durante este proceso.

¹ Estudiante programa de Especialización en Gerencia, Universidad la gran Colombia, rcardozof@ulagrancolombia.edu.co

² Estudiante programa de Especialización en Gerencia, Universidad la gran Colombia, pcubillosb@ulagrancolombia.edu.co

³ Estudiante programa de Especialización en Gerencia, Universidad la gran Colombia, jrojast2@ulagrancolombia.edu.co

Resumen

El levantamiento del suelo es un parámetro crucial que se debe controlar en la hincada de prefabricados. La presente investigación tiene como objetivo analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hincada de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes.

El estudio se realiza mediante un enfoque mixto y es de tipo descriptivo, empleando los datos tomados del levantamiento topográfico. A través de una revisión detallada de estudios previos y literatura especializada (enfoque cualitativo) y el análisis de datos de levantamientos topográficos realizados en proyectos anteriores (enfoque cuantitativo), se busca identificar los factores que afectan este fenómeno en el contexto urbano de Bogotá. El estudio, que tiene un carácter descriptivo y exploratorio, tiene como objetivo identificar los retos técnicos, económicos, sociales y ambientales que presentan las estrategias para mitigar el levantamiento del suelo, además de proponer soluciones prácticas e innovadoras adaptadas a las condiciones geotécnicas de Bogotá. Con base en datos reales y análisis estadísticos, se pretende ofrecer recomendaciones sólidas para prevenir y abordar este problema en futuras obras de construcción en Bogotá.

En la investigación se evidencia que los suelos arcillosos son los más problemáticos y pueden aumentar los costos de construcción hasta un 30%. Se proponen distintas soluciones para mejorar la estabilidad del terreno y reducir los impactos sociales y económicos, adaptándose a las condiciones geotécnicas y urbanas de la ciudad.

Palabras clave: *Mitigar, impacto, levantamiento, cimentación, prefabricados.*

Abstract

Soil heave is a crucial parameter that must be controlled during the installation of prefabricated piles. This research aims to analyze the factors contributing to soil heave during the driving of prefabricated piles in urban contexts of Bogotá, through an extensive review of the literature and relevant case studies.

The study is conducted using a mixed-methods approach and is descriptive in nature, employing data from topographic surveys. By conducting a detailed review of previous studies and specialized literature (qualitative approach) and analyzing topographic survey data from previous projects (quantitative approach), the goal is to identify the factors that influence this phenomenon in the urban context of Bogotá. The study, which is both descriptive and exploratory, aims to identify the technical, economic, social, and environmental challenges related to strategies for mitigating soil heave, as well as to propose practical and innovative solutions adapted to Bogotá's geotechnical conditions. Based on real data and statistical analysis, the research intends to offer solid recommendations to prevent and address this issue in future construction projects in Bogotá.

The investigation shows that clayey soils are the most problematic and can increase construction costs by up to 30%. Various solutions are proposed to improve soil stability and reduce the social and economic impacts, adapting to the geotechnical and urban conditions of the city.

Keywords: *Mitigate, impact, heave, foundation, prefabricated.*

ESTRATEGIAS PARA MITIGAR LA INCIDENCIA PRODUCIDA POR EL LEVANTAMIENTO DEL SUELO EN LA HINCA DE ELEMENTOS PREFABRICADOS EN BOGOTÁ

El presente documento busca conocer y analizar el comportamiento que generan los suelos, este movimiento puede representar un riesgo crítico en el ámbito de la ingeniería civil, afectando tanto la durabilidad como la seguridad de diversas infraestructuras. Este fenómeno incluye procesos como asentamientos, deslizamientos de tierra, expansiones y contracciones del suelo, y licuefacción, los cuales son provocados por factores geológicos, climáticos y por las propias actividades humanas, como la construcción o la explotación de recursos. Cada tipo de movimiento tiene sus propias consecuencias: los asentamientos diferenciales pueden generar grietas y deformaciones en las edificaciones; los deslizamientos pueden ocasionar colapsos de terrenos en laderas; la licuefacción, activada durante terremotos o vibraciones, puede hacer que suelos saturados pierdan su capacidad portante; mientras que la expansión y contracción de suelos arcillosos pueden alterar los cimientos y generar inestabilidad.

Además, el movimiento de los suelos no solo afecta edificaciones, sino que también puede causar interrupciones en las redes de servicios públicos, como gasoductos, acueductos y líneas eléctricas, incrementando los costos de mantenimiento y reparación. En zonas urbanas o regiones con alta sismicidad, la planificación geotécnica y las soluciones de ingeniería deben abordar estos desafíos de manera integral para minimizar los daños potenciales y garantizar la seguridad a largo plazo.

Teniendo en cuenta lo anterior el estudio contribuye con la identificación de los riesgos geotécnicos asociados al movimiento de suelos en Bogotá y la importancia de un estudio

detallado para mejorar la planificación urbana. El estudio proporcionará recomendaciones técnicas para la construcción, ayudará a prevenir riesgos en infraestructuras y apoyará el desarrollo de normativas geotécnicas específicas para la ciudad, contribuyendo a una mayor seguridad y sostenibilidad en las obras civiles.

Bogotá, al ser una de las principales ciudades de América Latina, experimenta un rápido crecimiento urbano que requiere la construcción constante de nuevas edificaciones e infraestructuras. Este desarrollo urbano es fundamental para satisfacer las necesidades de vivienda, comercio e industria de una población en constante aumento. Sin embargo, la expansión de la ciudad también trae consigo desafíos significativos relacionados con la construcción en suelos con características geotécnicas complejas.

La investigación sobre la mitigación del levantamiento del suelo en la hincada de pilotes no solo tiene una importancia práctica, sino que también contribuye al conocimiento académico y científico en el campo de la ingeniería geotécnica. Los resultados y hallazgos del estudio pueden servir como referencia para futuras investigaciones y proyectos en áreas con condiciones geotécnicas similares, tanto en Colombia como en otras partes del mundo.

Por tal razón esta investigación tiene como objetivo general analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hincada de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes.

De igual manera propone como objetivos específicos Identificar las principales implicaciones y desafíos en la implementación de las estrategias propuestas, incluyendo

consideraciones técnicas, económicas, sociales y ambientales, con el fin de ofrecer una visión integral de su viabilidad y potencial impacto en el contexto urbano de Bogotá y Proponer estrategias innovadoras y prácticas para prevenir y mitigar el levantamiento del suelo durante el proceso de hincas de pilotes prefabricados, considerando las condiciones geotécnicas y urbanas específicas de Bogotá.

Planteamiento de la problemática de la investigación

Bogotá es una ciudad en constante expansión y desarrollo urbano. Su crecimiento acelerado ha llevado a la construcción de numerosas edificaciones de gran envergadura, muchas de las cuales requieren cimentaciones profundas debido a la variabilidad y complejidad de los suelos en la región. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la población de Bogotá creció a un ritmo del 1.5% anual en la última década, lo que impulsa la necesidad de nuevas construcciones e infraestructuras. Los suelos de Bogotá son altamente heterogéneos, con presencia de materiales aluviales, arcillas expansivas y otros tipos de suelo que presentan desafíos significativos para la ingeniería geotécnica.

La hincas de pilotes prefabricados, una técnica comúnmente utilizada para cimentaciones profundas está siendo implementada cada vez más en la ciudad. Esta técnica, que consiste en la inserción de pilotes de concreto o acero en el suelo mediante golpes de martillo, vibración o presión, es efectiva para alcanzar capas de suelo con suficiente capacidad de carga. Sin embargo, el proceso puede provocar problemas geotécnicos, siendo el levantamiento del suelo uno de los más críticos. En Bogotá, debido a la composición geotécnica de la ciudad, los suelos tienden a expandirse, convirtiéndose en un problema significativo durante la implementación de esta técnica.

El levantamiento del suelo ocurre cuando el suelo es desplazado hacia arriba durante la hincada de pilotes. Este fenómeno puede ser causado por diversos factores, como el desplazamiento lateral del suelo, la expansión del suelo, o la presión hidrostática. Por ejemplo, estudios han demostrado que, en áreas con suelos arcillosos expansivos, el proceso de hincada puede inducir una expansión del material, provocando el levantamiento. Un informe del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) indica que aproximadamente el 40% de los suelos en Bogotá son arcillas expansivas, lo que agrava este problema.

Este levantamiento presenta una problemática significativa para las edificaciones y urbanizaciones circundantes. Puede causar deformaciones y grietas en las estructuras cercanas, afectando su integridad y estabilidad. Además, puede desajustar infraestructuras subterráneas como sistemas de alcantarillado, redes de agua, gas y otros servicios, comprometiendo su funcionalidad y seguridad. Los asentamientos diferenciales resultantes generan tensiones adicionales en las edificaciones, aumentando el riesgo de daños estructurales. Los costos económicos asociados a las reparaciones necesarias, interrupciones de servicios y posibles demandas legales pueden ser elevados. Según un estudio reciente, los costos de reparación derivados del levantamiento del suelo en proyectos de construcción pueden superar el 5% del presupuesto total del proyecto.

Mitigar el levantamiento del suelo es un desafío complejo que requiere un enfoque multifacético. Las soluciones deben adaptarse a las condiciones específicas del suelo y del entorno construido, equilibrando la efectividad técnica con consideraciones económicas y prácticas. Esto incluye el desarrollo de técnicas de hincada menos invasivas, la utilización de equipos de hincada avanzados, la implementación de medidas de monitoreo en tiempo real, y la formación adecuada del personal encargado de estos proyectos.

Dada la creciente densidad urbana y la construcción continua en Bogotá, es imperativo realizar investigaciones que proporcionen soluciones prácticas y efectivas para mitigar el impacto del levantamiento del suelo. Estas investigaciones deben enfocarse en desarrollar nuevas técnicas y mejorar las existentes, basándose en un entendimiento profundo de las características geotécnicas locales y las dinámicas del proceso de hinca. El desplazamiento del terreno plantea un desafío significativo en términos de seguridad estructural, y es crucial identificar estrategias efectivas para prevenir daños a las edificaciones y urbanizaciones aledañas, garantizando así un entorno urbano seguro y estable.

Marco teórico y estado del arte

La ciudad de Bogotá se encuentra sobre una sábana aluvial que presenta una gran variabilidad geotécnica. Los suelos de esta región están compuestos principalmente por arcillas blandas, limos, arenas y materiales orgánicos, lo que los hace particularmente sensibles a las cargas y movimientos inducidos por la construcción. Esta variabilidad puede dar lugar a desafíos significativos en la ingeniería geotécnica, como el asentamiento diferencial, la licuefacción y el levantamiento del suelo.

Para cualquier proyecto de construcción en Bogotá, es esencial realizar estudios geotécnicos detallados. Estos estudios incluyen la exploración del subsuelo mediante sondeos, ensayos de penetración estándar (SPT), ensayos de penetración con cono (CPT) y análisis de laboratorio de muestras de suelo. Estos datos permiten caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad (Ruiz, A. 2021).

- Proceso constructivo de pilotes prefabricados.

Los pilotes prefabricados son elementos estructurales pre construidos de concreto, acero o madera que se insertan en el suelo para transferir cargas desde la superestructura hasta las capas de suelo más competentes. Existen varios tipos de pilotes, como los pilotes hincados, los pilotes de desplazamiento y los pilotes de fricción.

Según Acerlum (2023), existen diferentes procesos de hinca de pilotes prefabricados y pueden realizarse mediante diversos métodos, entre los cuales se destacan: Martillo de hinca o hinca por impacto (utiliza un martillo mecánico o hidráulico para golpear la cabeza del pilote y empujarlo hacia el suelo). Vibración (emplea vibradores para reducir la resistencia del suelo alrededor del pilote, facilitando su inserción). Y presión estática (aplica una fuerza constante y controlada para insertar el pilote en el suelo, minimizando el impacto y las vibraciones).

La selección del método de hinca depende de las características del suelo, la profundidad requerida y la capacidad de carga del pilote. Es crucial asegurar una alineación adecuada y controlar las fuerzas aplicadas para evitar daños al pilote y al suelo circundante.

- Mecanismos de levantamiento de suelo y estrategias de mitigación

El levantamiento del suelo es un fenómeno en el que el suelo se desplaza hacia arriba debido a diversas causas, tales como: expansión de arcillas (las arcillas expansivas aumentan de volumen al absorber agua), el desplazamiento del suelo por hinca (la inserción de pilotes desplaza el suelo lateralmente y hacia arriba) y la congelación y descongelación (en climas fríos, el agua en el suelo puede congelarse y expandirse).

Existen diversas estrategias de mitigación, para mitigar el levantamiento del suelo durante la hinca de pilotes, se puede: Realizar pre-perforación (perforaciones previas para reducir la resistencia del suelo y facilitar la hinca), uso de pilotes de diámetro reducido (pilotes más delgados pueden minimizar el desplazamiento del suelo), monitorización y control (utilizar equipos de monitoreo para medir los desplazamientos del suelo en tiempo real y ajustar el proceso de hinca en consecuencia) y desplazamiento controlado del suelo (implementar técnicas para redistribuir el suelo desplazado de manera controlada).

- Normativas y regulación

En Bogotá, la construcción de cimentaciones profundas, incluyendo pilotes prefabricados, está regulada por diversas normativas y códigos de construcción que buscan garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras. Algunas de las normativas más relevantes incluyen la NSR-10 (Norma Sismo Resistente Colombiana) la cual establece los requisitos para el diseño y construcción de estructuras sismo-resistentes, incluyendo cimentaciones profundas.

Para el tema de regulación ambiental los proyectos de construcción en Bogotá deben cumplir con regulaciones ambientales que protejan el entorno natural y minimicen el impacto de las actividades constructivas. Esto incluye la gestión adecuada de residuos, la protección de cuerpos de agua y la minimización del ruido y las vibraciones.

Por último, los permisos y licencias deben estar antes de iniciar la construcción, es necesario obtener permisos y licencias de las autoridades pertinentes. Estos permisos aseguran que el proyecto cumple con todas las normativas de seguridad, técnicas y ambientales vigentes.

Los pilotes hincados son una opción común en el diseño de cimentaciones profundas, ofreciendo una serie de ventajas y desventajas que deben considerarse cuidadosamente en el proceso de selección y diseño de la cimentación. Según Urbina (2004), los pilotes hincados presentan varias ventajas importantes que los hacen atractivos para ciertas aplicaciones:

- Ventajas
 - El material del pilote puede ser inspeccionado antes de introducirlo en el suelo, lo que permite una evaluación exhaustiva de su calidad y resistencia potencial.
 - Son estables en suelos exprimibles, lo que garantiza una base sólida y confiable para la estructura sobre la cimentación.
 - No se dañan con el levantamiento del terreno ocasionado por el hincado de pilotes adyacentes, lo que reduce el riesgo de daños estructurales.
 - El procedimiento de construcción no se ve afectado por el agua subterránea, lo que facilita la ejecución de la cimentación en condiciones húmedas o inundadas.
 - Pueden ser llevados fácilmente por encima del nivel del terreno, especialmente en estructuras marítimas, lo que simplifica el proceso de instalación.
 - Pueden ser hincados en longitudes muy largas, lo que permite su aplicación en proyectos que requieren cimentaciones profundas.

Sin embargo, los pilotes hincados también presentan algunas desventajas que deben tenerse en cuenta:

- Desventajas
 - Se pueden romper durante hincamientos difíciles, o peor aún, pueden sufrir daños mayores no visibles en condiciones difíciles de hincamiento, lo que compromete su integridad estructural.
 - No son económicos si la cantidad de material en el pilote depende de los esfuerzos de manejo y hincamiento más que de los esfuerzos de la carga permanente, lo que puede aumentar los costos de construcción.
 - El ruido y la vibración durante el hincado pueden causar molestias o daños, especialmente en áreas urbanas o sensibles al ruido.
 - El desplazamiento de suelo durante el hincado de pilotes en grupo puede dañar estructuras adyacentes o causar levantamiento de pilotes adyacentes al levantar el suelo, lo que puede afectar la estabilidad de la cimentación.
 - No pueden ser hincados en diámetros muy grandes ni en condiciones de poco espacio, lo que limita su aplicabilidad en ciertos proyectos.

En resumen, los pilotes hincados ofrecen una serie de ventajas en términos de estabilidad y facilidad de instalación, pero también presentan desventajas que deben ser consideradas cuidadosamente en el diseño y la selección de cimentaciones profundas.

Estado de arte

El artículo de Asefa S.A., titulado "Patologías en Pilotes Prefabricados Hincados", se enfoca en identificar y comprender las principales patologías que afectan a los pilotes prefabricados, comparándolos con los pilotes in situ. Su objetivo es proporcionar una visión integral sobre la identificación, evaluación, prevención y reparación de daños en los pilotes prefabricados hincados.

El artículo comienza diferenciando entre pilotes in situ y prefabricados, explorando sus aplicaciones en distintos terrenos y destacando sus características y funcionamiento. Evalúa las ventajas de los pilotes prefabricados, como la rapidez en la ejecución y la capacidad de alcanzar grandes profundidades, pero también aborda sus limitaciones, como los problemas en terrenos heterogéneos y el impacto de las vibraciones y el ruido.

Se profundiza en las patologías que pueden afectar a los pilotes prefabricados, como la desviación o ruptura debido a bolos o rocas, fallos del material que pueden causar fisuras o roturas, y asentos inesperados que afectan la estabilidad estructural. Para prevenir estos daños, el artículo resalta la importancia de conocer el terreno, realizar ensayos no destructivos, y llevar a cabo una planificación y control adecuados durante la hinca. También se detallan métodos de reparación, como la sustitución y el recalce de pilotes dañados, y se enfatiza la detección temprana y corrección de defectos.

Finalmente, el artículo concluye que la elección del sistema de pilotaje debe adaptarse a las características del terreno para evitar fallos. Subraya que los daños pueden surgir tanto durante la ejecución como después de ocultar la cimentación, siendo la planificación y el control rigurosos esenciales para garantizar la integridad y durabilidad de las estructuras cimentadas con pilotes prefabricados hincados.

Por otro otra parte se analiza, el estudio de Jhon Fernando Palacios se centra en el proceso de instalación de pilotes por presión estática, buscando desarrollar un estado del arte que analice su comportamiento, características y ventajas técnicas. La investigación evalúa la viabilidad de este método innovador en comparación con las técnicas tradicionales, dado que la información disponible es limitada y dispersa. El estudio pretende consolidar un estado del arte

que permita entender mejor los pilotes a presión estática y evaluar su aplicabilidad como solución de cimentación profunda en Colombia.

Los objetivos del estudio incluyen recopilar información global y local, comparar la eficiencia de los pilotes a presión estática con métodos tradicionales, investigar herramientas y materiales utilizados, y proponer condiciones geotécnicas, económicas y sociales para su implementación en distintas regiones de Colombia. El estudio destaca la capacidad del método de presión estática para minimizar perturbaciones medioambientales, como el ruido y las vibraciones, comunes en métodos convencionales.

En cuanto a la hincada de pilotes prefabricados, a pesar de su efectividad, presenta desventajas significativas en terrenos complejos como los de Bogotá. Los problemas incluyen el peso y tamaño de las plataformas de hincado, que pueden causar hundimientos en terrenos blandos y afectar la estabilidad del equipo. También, la presión estática aplicada durante la inserción del pilote puede causar daños si no se maneja adecuadamente, lo que puede resultar en costos adicionales y retrasos. El monitoreo cercano del efecto de los agarres sobre el pilote es crucial para detectar y corregir desalineaciones o excesos de fuerza, aunque esto requiere tiempo y recursos adicionales, complicando la logística del proyecto y aumentando los costos operativos.

También y como parte del estado del arte se estudiamos la investigación desarrollada por Jorge Rodríguez y David Quiros en esta se destaca que su objetivo es evaluar el impacto del levantamiento del terreno causado por la hincada de pilotes en suelos arcillosos en Bogotá, mediante el análisis del perfil estratigráfico, el monitoreo de desplazamientos y niveles piezométricos, y la comparación de métodos analíticos para predecir y gestionar estos efectos

en la cimentación y en las edificaciones circundantes, generando así un enfoque centrado en analizar el impacto del levantamiento del terreno causado por la hincada de pilotes en suelos arcillosos, específicamente en un proyecto de cimentación en Bogotá. El estudio examina cómo la hincada de pilotes, ya sea por percusión o presión hidráulica, afecta la presión de poros en el suelo y el levantamiento del terreno tanto en el área de pilotaje como en sus alrededores. Se evalúa el perfil estratigráfico del terreno, destacando la transición de depósitos lacustres de arcillas de alta plasticidad a depósitos aluviales, para entender mejor las condiciones del suelo y su influencia en el proceso de hincada.

El proyecto se diseñó utilizando pilotes hincados de diversas longitudes, y se implementó una instrumentación para monitorear desplazamientos verticales y niveles piezométricos durante y después de la hincada. Se compararon métodos analíticos, como los de Rehman y Sagaseta y Whittle, para predecir el levantamiento del terreno, validando su precisión con datos reales del proyecto. Además, se monitorea el comportamiento del terreno y los pilotes después de la hincada, observando la recuperación de los levantamientos y la necesidad de realizar re-hincadas para asegurar la capacidad de carga de los pilotes. Las conclusiones destacan la precisión de los métodos analíticos y ofrecen recomendaciones para futuros proyectos en suelos similares, sugiriendo prácticas para gestionar el levantamiento del terreno y planificar acciones correctivas adecuadas.

No obstante, para nuestra investigación es relevante analizar el comportamiento del suelo para la técnica constructiva mencionada como parte principal de este desarrollo investigativo por lo cual Jhon Sebastián Gómez Catillo que tiene por título “Predicción del comportamiento dinámico del suelo en la instalación de pilotes hincados a través de la aplicación de metodologías computacionales”. propone una investigación que se enfoca y

detalla la validación de métodos numéricos para analizar el comportamiento del suelo durante la hinca de pilotes. La investigación se centra en modelar matemáticamente este proceso usando ecuaciones en derivadas parciales y el método de elementos finitos, y para ello se emplea la herramienta FEniCS en simulaciones computacionales. El objetivo principal es entender cómo responde el suelo en diferentes condiciones durante la hinca de pilotes, proporcionando una visión detallada del comportamiento mecánico del terreno.

El enfoque computacional adoptado sigue una metodología iterativa, que incluye la creación de modelos, simplificación y validación de las soluciones numéricas. Para asegurar la precisión y aplicabilidad de los modelos, se utilizan casos de prueba reconocidos, como el caso de consolidación de Terzaghi, para comparar las soluciones numéricas con resultados analíticos y experimentales. Este proceso de validación es crucial para garantizar que los modelos desarrollados sean precisos y útiles.

Además, el estudio se sitúa en el contexto específico de la mecánica de suelos y la geotécnica en Bogotá, teniendo en cuenta características particulares del terreno, como el comportamiento de la arcilla y el incremento de la presión de poros. Se examina cómo estos factores afectan el suelo durante la hinca y cómo distintas condiciones pueden influir en los resultados de las simulaciones.

En conclusión, la investigación emplea un enfoque cuantitativo y computacional avanzado para comprender el comportamiento del suelo durante la hinca de pilotes. Se pone un fuerte énfasis en la validación y comparación de los resultados numéricos con datos experimentales y teóricos, lo que permite una comprensión más profunda y precisa del fenómeno en cuestión, adaptada a las condiciones geotécnicas locales.

Metodología

La presente investigación tiene un enfoque mixto, un enfoque mixto combina de manera integrada y sistemática los métodos cuantitativos y cualitativos dentro de una misma investigación. Esto permite analizar de forma conjunta tanto los datos numéricos como los descriptivos, ofreciendo una perspectiva más completa y enriquecida del fenómeno en estudio. Al combinar ambos tipos de información, las conclusiones obtenidas son más robustas y permiten un entendimiento más profundo y detallado, aprovechando las fortalezas de cada enfoque para superar las limitaciones que podrían presentarse si se utilizara solo uno de ellos. (Herrera, 2017).

Con base en lo anterior la presente investigación busca analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hincada de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes.

De esta manera y con respecto al enfoque cualitativo, este se orienta hacia la comprensión de los procesos sociales que dan forma a las interacciones humanas. Se enfoca en captar la complejidad de las situaciones, describiendo en detalle eventos, personas, comportamientos y sus significados. A través de la observación profunda y la recolección de datos no numéricos, permite explorar y afinar preguntas de investigación, sin estar limitado a mediciones cuantitativas. Este enfoque ofrece una flexibilidad metodológica que va más allá de lo estrictamente observable y medible, proporcionando una visión más holística y subjetiva de los fenómenos sociales. (Herrera, 2017).

Con base en lo anterior la presente investigación busca analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hinca de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes.

Ahora bien, desde el enfoque cuantitativo en la investigación se caracteriza por trabajar con fenómenos que pueden ser medidos numéricamente, como es el caso de variables tales como edad, peso, altura, velocidad, masa o incluso niveles de ciertas sustancias en el cuerpo. Este tipo de estudio utiliza técnicas estadísticas para analizar los datos recopilados, con el propósito de describir, explicar, predecir y controlar de manera objetiva las causas de los fenómenos observados, así como anticipar su posible repetición. Las conclusiones de este enfoque se sustentan en el uso meticuloso de la cuantificación, tanto en la recolección como en el análisis y la interpretación de los resultados, siguiendo el método hipotético-deductivo. Por lo general, tiene una amplia aplicación en disciplinas como las ciencias naturales, entre ellas biología, química, física y psicología, entre otras. (Kerlinger, 2002).

Ahora bien, desde el enfoque de esta investigación se basa en el análisis de datos recolectados durante levantamientos topográficos de obras de hinca de pilotes prefabricados en Bogotá. Estos datos proporcionan una representación precisa del comportamiento del suelo, particularmente en cuanto al fenómeno de levantamiento durante el proceso de hincado. A través del análisis de estas mediciones, se podrán identificar patrones clave y comportamientos recurrentes del suelo en diferentes contextos urbanos de la ciudad.

La fortaleza de este enfoque radica en el uso de datos confiables y reales, generados a partir de proyectos ya ejecutados, lo que garantiza que las conclusiones sean relevantes y

aplicables al contexto local. Los análisis estadísticos permitirán explorar cómo las diferentes condiciones geotécnicas y urbanas influyen en la respuesta del suelo, y cómo estas variaciones afectan el proceso de hincado de pilotes. Además, este enfoque cuantitativo no solo permitirá entender mejor las dinámicas involucradas, sino que proporcionará la base para evaluar y validar las estrategias que se propongan para mitigar el levantamiento del suelo.

Así mismo el tipo de estudio corresponde al descriptivo, el tipo de investigación descriptivo, como su nombre lo sugiere, tiene el propósito de describir de manera detallada el estado y el comportamiento de las variables que se analizan. No se enfoca en establecer relaciones causales ni en hacer predicciones, sino en observar y registrar cómo se manifiestan las características de un fenómeno en un contexto específico. Su objetivo principal es proporcionar una representación precisa y objetiva, permitiendo generar un panorama claro y fundamentado que puede servir como base para investigaciones posteriores o para la toma de decisiones informadas. Para esto, la idea principal es identificar principales implicaciones y desafíos en la implementación de las estrategias propuestas, incluyendo consideraciones técnicas, económicas, sociales y ambientales, con el fin de ofrecer una visión integral de su viabilidad y potencial impacto en el contexto urbano de Bogotá.

Por otro lado, la investigación se puede clasificar de tipo exploratorio, el tipo de tipo de investigación exploratorio se utiliza cuando nos enfrentamos a un problema que aún no está bien definido, ya sea porque se tiene poco conocimiento sobre el tema o porque ha sido escasamente investigado. Este tipo de estudio busca explorar y familiarizarse con el fenómeno en cuestión, proporcionando una visión general inicial. A partir de este conocimiento preliminar, es posible orientar investigaciones futuras con un enfoque más preciso y específico, ayudando a identificar preguntas clave y a establecer las bases para estudios más profundos. (Cimec,

2019). Lo anterior en concordancia con la idea de proponer estrategias innovadoras y prácticas para prevenir y mitigar el levantamiento del suelo durante el proceso de hinca de pilotes prefabricados, considerando las condiciones geotécnicas y urbanas específicas de Bogotá.

Las fuentes de información para la presente investigación, tanto para el enfoque cuantitativo como el cualitativo se apoyan en fuentes secundarias, ya que no se han recogido datos directamente en campo por parte de los investigadores. En su lugar, se utilizan levantamientos topográficos previamente realizados durante proyectos de hinca de pilotes prefabricados en Bogotá. Estos levantamientos ofrecen mediciones detalladas y precisas que permiten comprender mejor el fenómeno del levantamiento del suelo en diferentes áreas urbanas.

En el caso del enfoque cuantitativo, las bases de datos ya existentes brindan la oportunidad de aplicar análisis estadísticos rigurosos sin la necesidad de realizar nuevas mediciones, facilitando el estudio de patrones y tendencias. Por otro lado, en el enfoque cualitativo, se hace una revisión exhaustiva de estudios de caso y literatura, lo que permite interpretar los factores geotécnicos y urbanos que afectan el comportamiento del suelo durante el proceso de hinca. Así, se aprovecha la información disponible para obtener una visión más completa y fundamentada del problema, sin la necesidad de realizar un muestreo adicional.

Para el enfoque cuantitativo, la base de datos utilizada se compone de carteras topográficas que recogen información detallada sobre los asentamientos y levantamientos que se generan durante el proceso de hinca de pilotes prefabricados en Bogotá. Estas carteras incluyen mediciones precisas de diversas variables del suelo, lo que permite un análisis riguroso de los datos mediante técnicas estadísticas. Este enfoque ofrece la oportunidad de

identificar patrones y tendencias en el comportamiento del suelo en diferentes contextos urbanos.

En lo que respecta al enfoque cualitativo, se llevará a cabo una revisión exhaustiva de aproximadamente 10 a 15 textos, que abarcan tanto estudios de caso relevantes como literatura académica sobre las dinámicas geotécnicas y urbanas. Esta revisión permitirá explorar en profundidad las interpretaciones y significados asociados a los factores que influyen en el levantamiento del suelo durante la hinca de pilotes. Al combinar ambos enfoques, se obtiene una visión integral del fenómeno, fundamentada tanto en datos cuantitativos como en perspectivas cualitativas.

Así las cosas para el objetivo específico uno: Identificar las principales implicaciones y desafíos en la implementación de las estrategias propuestas, incluyendo consideraciones técnicas, económicas, sociales y ambientales, con el fin de ofrecer una visión integral de su viabilidad y potencial impacto en el contexto urbano de Bogotá, Primero, se realizará una revisión exhaustiva de 10 a 15 textos relevantes, lo que permitirá establecer un marco teórico sólido sobre el fenómeno y las dinámicas geotécnicas en juego. A continuación, se utilizarán carteras topográficas como base de datos para analizar información sobre asentamientos y levantamientos en obras previas, facilitando la identificación de patrones y tendencias en el comportamiento del suelo. Posteriormente, se evaluarán las implicaciones técnicas, económicas, sociales y ambientales de las estrategias propuestas, integrando los hallazgos del análisis cuantitativo con las interpretaciones derivadas del análisis cualitativo. Este proceso culminará en la redacción de conclusiones que ofrezcan una visión integral sobre la viabilidad y el potencial impacto de las estrategias en el contexto urbano de Bogotá

para el caso del objetivo específico dos: Proponer estrategias innovadoras y prácticas para prevenir y mitigar el levantamiento del suelo durante el proceso de hinca de pilotes prefabricados, considerando las condiciones geotécnicas y urbanas específicas de Bogotá, para ello se llevará a cabo un análisis detallado de la información recopilada de levantamientos topográficos y estudios anteriores. Este proceso comenzará con la identificación de tendencias y patrones en el comportamiento del suelo en distintas condiciones geotécnicas y urbanas, lo que permitirá contextualizar los desafíos específicos que se enfrentan en la ciudad. A partir de este análisis, se desarrollarán recomendaciones innovadoras basadas en la efectividad de métodos y técnicas aplicadas en proyectos previos.

Reflexión

En este apartado se muestran los principales hallazgos de la investigación la cual tiene por objetivo: analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hinca de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes

Con relación al objetivo específico uno: Identificar las principales implicaciones y desafíos en la implementación de las estrategias propuestas, incluyendo consideraciones técnicas, económicas, sociales y ambientales, con el fin de ofrecer una visión integral de su viabilidad y potencial impacto en el contexto urbano de Bogotá se realizó un análisis de datos extraídos de levantamientos topográficos y estudios previos. Se observaron tendencias significativas en el comportamiento del suelo que destacan cómo diferentes tipos de suelo influyen en el levantamiento. Por ejemplo, en el análisis de 5 obras en diferentes sectores de Bogotá, se encontró que el 60% de las intervenciones en suelos arcillosos mostraron un levantamiento superior al 5% de lo esperado por la técnica constructiva, mientras que, en

suelos con presencia de lentes de arena, solo el 20% presentó un levantamiento similar (ver Tabla 1)., donde se presenta la relación entre el tipo de suelo y el porcentaje de levantamiento observado.

Tipo de Suelo	Porcentaje de Levantamiento > 5%
Arcilloso	60%
Suelo con presencia de lentes de arena	20%

*Tabla 1: Porcentaje de levantamiento del suelo según tipo de suelo
(Fuente: Propia)*

Además, el análisis reveló que los costos de construcción en suelos problemáticos podrían incrementarse hasta un 30% si no se implementan adecuadamente las estrategias que minimicen los levantamientos producidos por esta técnica constructiva, lo que subraya la importancia de considerar factores económicos en la planificación de proyectos desde la perspectiva del análisis de riesgos. También se evidencian las implicaciones sociales de no abordar el levantamiento del suelo de manera efectiva. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una estrategia integral que contemple las variaciones geotécnicas y urbanas en Bogotá, así como sus impactos técnicos, económicos y sociales, para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de las obras en el contexto urbano.

Para el objetivo dos: Proponer estrategias innovadoras y prácticas para prevenir y mitigar el levantamiento del suelo durante el proceso de hincado de pilotes prefabricados, considerando las condiciones geotécnicas y urbanas específicas de Bogotá se han identificado varias soluciones efectivas que consideran las condiciones geotécnicas y urbanas específicas de la región. Un enfoque prometedor es la generación de rutas de hincado estratégicamente planificadas. En lugar de concentrar la hincado de pilotes en una única área, se sugiere

distribuirlos a lo largo de toda la extensión del proyecto. Esta dispersión no solo reduce la carga sobre el suelo en un punto específico, sino que también permite una distribución más uniforme de las tensiones, minimizando así el levantamiento del terreno.

Otra estrategia innovadora es la implementación de técnicas para reducir la presión de poros en el suelo. Esto se puede lograr mediante el uso de mechas drenantes, que facilitan la evacuación del agua acumulada en el suelo, ayudando a estabilizar la estructura antes y durante el proceso de hincas. Además, el uso de cortinas de huecos preexcavados puede ser efectivo para consolidar el suelo circundante, lo que contribuye a disminuir los riesgos de levantamiento.

Un estudio del estado del arte muestra que estas técnicas han sido utilizadas con éxito en diversas ciudades con condiciones geotécnicas similares, donde el levantamiento del suelo ha representado un desafío significativo. Implementar estas estrategias no solo tiene el potencial de mejorar la estabilidad del terreno, sino que también puede optimizar los costos de construcción y minimizar el impacto en las comunidades aledañas, contribuyendo a un desarrollo urbano más sostenible y responsable.

Estas propuestas se sustentan en la necesidad de adaptar las intervenciones a las características particulares del terreno bogotano, donde la variabilidad de los suelos y la presión urbana requieren soluciones innovadoras y adaptadas. De este modo, se busca ofrecer un enfoque integral que garantice la viabilidad de las obras de hincas de pilotes prefabricados, al tiempo que se protege el entorno urbano y se considera el bienestar de las comunidades afectadas.

Conclusión

La presente investigación tuvo como objetivo analizar los factores que contribuyen al levantamiento del suelo durante la hincada de pilotes prefabricados en contextos urbanos de Bogotá, mediante un análisis exhaustivo de la literatura y estudios de casos relevantes. Frente a los hallazgos del estudio, llama la atención que el comportamiento del suelo varía considerablemente dependiendo del tipo y de las características geotécnicas de la ciudad. En particular, se observó que los suelos arcillosos tienden a mostrar un levantamiento significativamente mayor; en un 60% de los casos analizados, el levantamiento en estos suelos superó el 5% de lo esperado. En contraste, los suelos con lentes de arena mostraron un comportamiento mucho más estable, con solo un 20% de incidencia en levantamientos de la misma magnitud, lo que indica que las características de los diferentes tipos de suelo deben ser cuidadosamente estudiadas para mitigar efectos no deseados en futuras obras.

Otro factor importante es el impacto económico derivado del levantamiento del suelo en zonas problemáticas. Según los datos analizados, el costo de construcción en estas áreas podría aumentar hasta un 30% si no se implementan estrategias de mitigación adecuadas, lo cual evidencia la necesidad de tomar en cuenta factores económicos desde las etapas iniciales de planificación del proyecto. Este incremento de costos puede incluir gastos en reparaciones de infraestructura adyacente, mantenimiento de servicios subterráneos y otras intervenciones necesarias para reducir los riesgos asociados. Además, el levantamiento del suelo tiene implicaciones sociales y urbanas significativas, ya que puede afectar la calidad de vida en las áreas cercanas a las construcciones, además de poner en riesgo la seguridad estructural de edificaciones e infraestructuras públicas.

Para abordar estos desafíos, el estudio identificó varias estrategias innovadoras que han demostrado efectividad en la prevención y mitigación del levantamiento del suelo. Una de las soluciones propuestas es la distribución estratégica de la hinca de pilotes en todo el proyecto, lo cual permite que las tensiones generadas se repartan de manera uniforme, reduciendo el impacto en puntos específicos del terreno. Otra estrategia prometedora es el uso de mechas drenantes, que facilitan la evacuación de agua acumulada y ayudan a estabilizar el suelo antes de iniciar la hinca de pilotes, disminuyendo así la presión de poros. También se sugiere la incorporación de cámaras de alivio (cortinas de perforaciones preexcavadas) alrededor del área de hinca para minimizar la consolidación del terreno, lo que contribuye a minimizar los riesgos de levantamiento y permite que las obras se desarrollen en condiciones más seguras.

Estas estrategias, además de demostrar viabilidad técnica, tienen el potencial de optimizar costos y de mejorar la sostenibilidad de los proyectos en Bogotá. La necesidad de adaptar las intervenciones a las condiciones geotécnicas particulares de la ciudad es clara, y este estudio resalta la importancia de considerar soluciones que se ajusten a los suelos de alta variabilidad, ya que la presión urbana y las características del terreno bogotano demandan un enfoque que contemple tanto la estabilidad del terreno como la protección del entorno y el bienestar de las comunidades aledañas.

Lista de Referencia o Bibliografía

Visor de Datos Geográficos. (s. f.). Servicio Geológico Colombiano. Recuperado 17 de mayo de 2024, de https://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Visor_Integrado_Geoportal/

Asefa S.A. Seguros y Reaseguros. Patologías en pilotes prefabricados hincados. (2008, octubre). <https://www.asefa.es/images/stories/asefa/pdf/patologias/patologia56.pdf>

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR-10: Vol. Tomo 1. (2010). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. https://www.andi.com.co/Uploads/Reglamento_colombiano_construccion_sismo_resistente_636536179523160220.pdf

Palacios, J. (2019). Estado del arte del proceso de instalación de pilotes por presión estática, analizando las técnicas y características que permitan establecer su potencial de uso como alternativa de cimentación profunda en Colombia. [Trabajo de Grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32182/PalaciosGaviriaJhonFernando2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rodriguez, Jorge & David, Y & Quiros, Leonardo. (2020). Efecto de levantamiento del terreno por hinca de pilotes. <https://www.issmge.org/publications/publication/efecto-de-levantamiento-del-terreno-por-hinca-de-pilotes-en-suelos-blandos-de-bogota>

Urbina, R. (2004). Guía para el diseño de pilotes [Tesis, Universidad de PIURA].

<https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/68c8ccf5-49f8-4a6b-a685-9ac16aaab6c0/content>

CHACON, D. (2020). DISEÑO GEOTÉCNICO DE CUATRO OBRAS ASOCIADAS A: CIMENTACIONES PROFUNDAS HINCADAS, PANTALLAS DE TABLESTACAS ANCLADAS, MICRO TÚNELES Y RESPUESTA DINÁMICA DE RELLENOS DE RECLAMACIÓN [Tesis, UNIVERSIDAD DE COSTA RICA].

https://kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/82344/TFIA_A81649_Danny%20Chacon%20R.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gómez, J. (2022). Predicción del comportamiento dinámico del suelo en la instalación de pilotes hincados a través de la aplicación de metodologías computacionales [Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia].

https://www.researchgate.net/profile/Jhon_Gomez3/publication/368568368_Prediccion_del_comportamiento_dinamico_del_suelo_en_la_instalacion_de_pilotes_hincados_a_traves_de_la_aplicacion_de_metodologias_computacionales/links/6422319866f8522c38da1779/Prediccion-del-comportamiento-dinamico-del-suelo-en-la-instalacion-de-pilotes-hincados-a-traves-de-la-aplicacion-de-metodologias-computacionales.pdf

RODRIGUEZ, J., & QUIROS, D. (2019). Efecto de Levantamiento del Terreno por Hincado de Pilotes en Suelos Blandos de Bogotá. The International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.3233/STAL190121>

Hugo, L. C. M. (1991). Influencia del hincado de pilotes sobre suelo y sobre estructuras circundantes.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_80a36bd456be84360371861e8c753c0b/Details

Acerlum-Esc. (2023, 11 noviembre). Diferentes Tipos de Cimientos de Pilotes Utilizados en La Construcción. ESC Mexico. <https://www.acerlum-esc.com/single-post/diferentes-tipos-de-cimientos-de-pilotes-utilizados-en-la-construccion>

Ruiz, A. (2021). EVALUACIÓN DE PILOTES SOMETIDOS A CARGA LATERAL [Tesis, Universidad de caratagena].

<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/14618/TRABAJO%20DE%20GRADUACION%20DE%20INGENIERIA%20CIVIL%20EN%20CONSTRUCCION%20DE%20OBRAS%20DE%20INFRAESTRUCTURA%20URBANA%20Y%20RURALE%20EN%20EL%20CARRIBE%20Y%20SU%20ZONA%20DE%20INFLUENCIA%20EN%20EL%20MUNDO%20LATINOAMERICANO%20Y%20CARIBE%20EN%20EL%20SIGLO%20XXI.pdf?sequence=1#:~>

Sagaseta, C., & Whittle, A. (2001, enero). Prediction of Ground Movements due to Pile Driving in Clay. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering. https://www.researchgate.net/publication/245293540_Prediction_of_Ground_Movements_due_to_Pile_Driving_in_Clay

Vytiniotis, A., Casey, B., & Sykora, D. W. (2018). Lateral soil movements due to pile driving: A case study in soft clays. In Proceedings of the Geotechnical Special Publication (Vol. 230, pp. 1-16). American Society of Civil Engineers <https://doi.org/10.1061/9780784481622.010>

Rodríguez-Rebolledo, J. F., Auvinet-Guichard, G. Y., & Martínez-Carvajal, H. E. (2015). Settlement analysis of friction piles in consolidating soft soils. *DYNA*, 82(192), 211-220.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.47752>

Tong, Y. X., Chen, Q. H., & Chen, X. L. (1981). Pile foundations in soft soils. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 8(58), 869-872. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/35/1981_1,2,3,4.pdf

Rodriguez, J. A., & Quiros, D. L. (2019). Edificio con Cajón Hincado como Solución de Excavación en Suelos Blandos de Bogotá.

<https://www.issmge.org/publications/publication/edificio-con-cajon-hincado-como-solucion-de-excavacion-en-suelos-blandos-de-bogota>

Brown, M. J., Bransby, F., Brennan, A. J., Knappett, J., & Geotechnical Engineering Research Group, Department of Civil Engineering, University of Dundee. (2008). FOUNDATIONS. In *Proceedings of the Second British Geotechnical Association International Conference on Foundations, ICOF 2008: Vol. VOLUME ONE–VOLUME ONE*. IHS BRE Press.

<https://www.researchgate.net/publication/262012156>

Atlantis Press. (2015). *Proceedings of the 15th European Modeling & Simulation Symposium (EMCS 2015)*. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/emcs-15/16531>

Verumandy, K., Arulrajah, A., Mirzababaei, M., & Rajeev, P. (2024). Static load testing of instrumented screw piles in soft soil deposits. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 10(10). <https://doi.org/10.1007/s40891-023-00519-x>