

Assessment of Geotechnical Hazard due to Deep Excavations in Bogota Clays: A Contribution for Sustainability in Urban Environments

Jorge-Arturo Pineda-Jaimes; César-Augusto García-Ubaque; Rodrigo-
Elías Esquivel-Ramírez

Citación: J.-A. Pineda-Jaimes, C.-A. García-Ubaque, and R.-E. Esquivel-Ramírez, “Assessment of Geotechnical Hazard due to Deep Excavations in Bogota Clays: A Contribution for Sustainability in Urban Environments,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e11373, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11373>

Recibido: Junio 12, 2020; **Aceptado:** Julio 26, 2020;

Publicado: Julio 27, 2020

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Assessment of Geotechnical Hazard due to Deep Excavations in Bogota Clays: A Contribution for Sustainability in Urban Environments

Jorge-Arturo Pineda-Jaimes¹
César-Augusto García-Ubaque²
Rodrigo-Elías Esquivel-Ramírez³

Abstract

The development of resilient and sustainable cities considers the construction of infrastructure projects that involve deep excavations. During excavations, surface displacements frequently occur that may be inadmissible for previously constructed elements of the urban environment, threatening the sustainability of already consolidated sectors. In this article, we present an approximation to the estimation of the geotechnical hazard by deep excavations in soft lacustrine soils of Bogotá, DC, using parametric numerical simulations that sought to establish the probability of occurrence of base bottom heave, and the estimation of surface displacements for variable excavation geometries. A database was consolidated from 85 projects found in geotechnical zones having soft soils in the city. From this base, statistically representative values of shear strength and stiffness were determined, and a statistically representative geotechnical profile of the lacustrine clays was prepared for parametric analyzes. The hazard estimation was developed in three stages: construction of the geotechnical model, approach of hazard scenarios and

¹ Ph. D. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). japinedaj@udistrital.edu.co. ORCID: [0000-0002-0953-9745](https://orcid.org/0000-0002-0953-9745)

² Ph. D. Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). cagarciau@udistrital.edu.co. ORCID: [0000-0002-1825-0097](https://orcid.org/0000-0002-1825-0097)

³ M. Sc. (c). Universidad Distrital “Francisco José de Caldas” (Bogotá-Distrito Capital, Colombia). resquivel@udistrital.edu.co. ORCID: [0000-0002-6048-7098](https://orcid.org/0000-0002-6048-7098)

determination of the hazard level. The following parameters were considered: excavation geometry (base and height), safety factor, failure probability and vertical ground displacements (settlements). Finally, a matrix is presented to determine the hazard level by excavations in the soft soils of Bogotá, whose data provide a prior assessment that contributes to promoting resilience and sustainability of already developed areas.

Keywords: angular distortion; bottom heave; deep excavations; failure probability; geotechnical hazard; ground settlements; lacustrine soils; safety factor; soft clays; subsidence.

Aproximación a la estimación de la amenaza geotécnica originada por excavaciones profundas en arcillas de Bogotá: Una contribución a la sustentabilidad en entornos urbanos

Resumen

El desarrollo de ciudades resilientes y sustentables considera la construcción de proyectos de infraestructura que involucran excavaciones profundas. Durante las excavaciones, frecuentemente, se producen desplazamientos en la superficie que pueden ser inadmisibles para los elementos previamente construidos del entorno urbano, amenazando la sustentabilidad de sectores ya consolidados. En este artículo, se presenta una aproximación a la estimación de la amenaza geotécnica originada por excavaciones profundas en suelos blandos lacustres de Bogotá, D.C., mediante simulaciones numéricas paramétricas que buscaron establecer la probabilidad de ocurrencia de falla de fondo y la estimación de desplazamientos en superficie para geometrías variables de la excavación. Se consolidó una base de datos a partir de 85 proyectos localizados en zonas geotécnicas que contienen suelos blandos en la ciudad. A partir de esta base, se determinaron valores estadísticamente representativos de las propiedades *de resistencia y rigidez* y se elaboró un perfil geotécnico de las arcillas lacustres para los análisis paramétricos. La estimación de la amenaza se desarrolló en tres fases: construcción del modelo geotécnico, planteamiento de los escenarios de amenaza y determinación del nivel de amenaza. Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: geometría de la

excavación (base y altura), factor de seguridad, probabilidad de falla y desplazamientos verticales en superficie (asentamientos). Finalmente, se presenta una matriz de aproximación para determinar las implicaciones y el nivel de amenaza que presentan las excavaciones en los suelos blandos de Bogotá, cuyos datos proporcionan una valoración previa en las etapas de factibilidad de un proyecto de excavación que contribuye a favorecer la resiliencia y sustentabilidad de las zonas ya desarrolladas.

Palabras clave: amenaza geotécnica; arcillas blandas; asentamientos; distorsión angular; excavaciones profundas; factor de seguridad; falla de fondo; probabilidad de falla; subsidencia; suelos lacustres.

Aproximação à estimação da ameaça geotécnica originada por escavações profundas em argilas de Bogotá: Uma contribuição à sustentabilidade em entornos urbanos

Resumo

O desenvolvimento de cidades resilientes e sustentáveis considera a construção de projetos de infraestrutura que envolvem escavações profundas. Durante as escavações, frequentemente, produzem-se deslocamentos na superfície que podem ser inadmissíveis para os elementos previamente construídos do entorno urbano, ameaçando a sustentabilidade de setores já consolidados. Neste artigo, apresenta-se uma aproximação à estimação da ameaça geotécnica originada por escavações profundas em solos brandos lacustres de Bogotá, D.C., mediante simulações numéricas paramétricas que buscaram estabelecer a probabilidade de ocorrência de falha de fundo e a estimação de deslocamentos em superfície para geometrias variáveis da escavação. Consolidou-se uma base de dados a partir de 85 projetos localizados em zonas geotécnicas que contêm solos brandos na cidade. A partir desta base, determinaram-se valores estatisticamente representativos das propriedades de resistência e rigidez e elaborou-se um perfil geotécnico das argilas lacustres para as análises paramétricas. A estimação da ameaça desenvolveu-se em três fases: construção do modelo geotécnico, abordagem dos cenários de ameaça e determinação do nível de ameaça. Tiveram-se em conta os seguintes

parâmetros: geometria da escavação (base e altura), fator de segurança, probabilidade de falha e deslocamentos verticais em superfície (assentamentos). Finalmente, apresenta-se uma matriz de aproximação para determinar as implicações e o nível de ameaça que apresentam as escavações nos solos brandos de Bogotá, cujos dados proporcionam uma valoração prévia nas etapas de factibilidade de um projeto de escavação que contribui a favorecer a resiliência e a sustentabilidade das zonas já desenvolvidas.

Palavras chave: ameaça geotécnica; argilas brandas; assentamentos; distorção angular; escavações profundas; fator de segurança; falha de fundo; probabilidade de falha; subsidência; solos lacustres.

I. INTRODUCCIÓN

La ejecución de excavaciones profundas, en el ámbito internacional, se entiende como un proceso fundamental en el marco de proyectos interdisciplinarios para el aprovechamiento del espacio subterráneo [1-2] que contribuyen al desarrollo sustentable de centros urbanos. En las excavaciones confluyen diversos aspectos geotécnicos, tales como el comportamiento y la variabilidad de los geomateriales involucrados, la rigidez de los sistemas estructurales de soporte, el flujo de agua establecido durante la construcción, la generación de desplazamientos en superficie a corto y largo plazo y aspectos de contaminación ambiental o supresión de acuíferos que impactan las relaciones costo-beneficio de estos proyectos y la sustentabilidad de los mismos desde los enfoques técnico, económico, ambiental y social, entre otros. Los sistemas que conforman las excavaciones profundas forman parte fundamental de la gestión sostenible del uso del suelo en ciudades y conforman, por tanto, sistemas fundamentales del desarrollo de ciudades resilientes [1, 3-4].

En Bogotá D. C. predominan, particularmente, suelos sedimentarios arcillosos de origen lacustre en las zonas de expansión de la ciudad durante las últimas tres décadas; la complejidad en el análisis, el diseño y la construcción de sistemas para excavaciones profundas se ha incrementado, principalmente por el desarrollo de proyectos cada vez más grandes y complejos en función de su concepción (multisótanos para proyectos de edificios, optimización y renovación de líneas vitales como acueductos y colectores de alcantarillado para el tratamiento de aguas residuales y conformación de cruces viales deprimidos urbanos) [5-7].

Entre los aspectos en los cuales se requiere un mayor entendimiento en proyectos de excavación se encuentran la estimación de desplazamientos en superficie del terreno, la amenaza y probabilidad de daño de los elementos en superficie [7-8]. A pesar del grado de sofisticación de los modelos de simulación y la implementación de análisis estocásticos para mejorar la predicción de la probabilidad de daños en superficie que han sido implementados paulatinamente en nuestro medio [6,8-9], son pocos los intentos que se han realizado para evaluar la amenaza geotécnica, de origen antrópico, que causan tanto los desplazamientos inducidos por los

procesos constructivos de estructuras subterráneas, como los procesos de movilización de resistencia al corte de las arcillas durante las excavaciones, sobre diferentes elementos del entorno urbano.

Este artículo presenta una contribución a la evaluación del nivel de amenaza originada por excavaciones de las zonas de suelos arcillosos blandos de Bogotá, principalmente, en las zonas norte y noroccidental de la ciudad, para las zonas geotécnicas definidas en el marco de la microzonificación sísmica de Bogotá del 2010, a partir de simulaciones numéricas realizadas paramétricamente para establecer, de manera simplificada, cómo evolucionan la probabilidad de ocurrencia de falla de fondo (Estado Límite Último-ELU) y los desplazamientos en superficie (Estados Límite de Servicio-ELS) para modelos sintéticos de excavaciones, cuyas dimensiones de ancho, profundidad y secuencia de excavación son variables dentro de valores en intervalos típicos de proyectos que se han ejecutado en la ciudad.

II. METODOLOGÍA

Para la estimación del nivel de amenaza geotécnica causada por la ejecución de excavaciones profundas en arcillas blandas de Bogotá, se consideraron diferentes criterios relacionados con la estabilidad y las deformaciones inducidas por los cambios en los estados de esfuerzos, a partir de una revisión de la literatura técnica existente y los resultados de experiencias locales. Para este fin, se implementaron cinco etapas en los análisis, cuyas particularidades se presentan en esta sección.

A. Zonas de geotécnicas, base de datos y perfil promedio

La zona de interés para la realización de los análisis paramétricos corresponde a zona Lacustre A, definida en el Decreto 523 de 2010 de la ciudad de Bogotá, en la cual se localizan depósitos lacustres de espesores superiores a los 100 m de profundidad en la zonas norte y noroccidental de la ciudad [5, 7-8]. Para realizar el análisis paramétrico de las excavaciones sobre un intervalo amplio de datos, se recopiló información en entidades públicas y privadas de reconocida confiabilidad para consolidar una base de datos que permitiera elaborar un perfil estratigráfico representativo con parámetros de las secuencias de arcillas [5, 7-8].

La base de datos permitió recopilar propiedades índices de las arcillas y limos lacustres, parámetros de resistencia no drenados a partir de ensayos de corte directo rápidos, triaxiales consolidados no-drenados y algunos provenientes de ensayos CPTU; y parámetros de rigidez elásticos (módulos elásticos no drenados) y algunos datos de resistencia y rigidez en condiciones drenadas a partir de la información de más de 85 proyectos ejecutados en la zona geotécnica considerada, con datos hasta profundidades de 50 m. En la Tabla 1, se presentan las variables más importantes de la base de datos elaborada y la discretización del modelo de análisis geotécnico.

Tabla 1. Perfil de análisis geotécnico promedio de las arcillas blandas de la sabana de Bogotá.

Material y profundidades	Espesor (m)	IP	Peso Unitario total (γ_t) KN/m ³	Cohesión No Drenada – Möhr Coulomb	Ángulo de Resistencia no drenado (ϕ_u)°	Módulo de Elasticidad No drenado Eu (kPa)
				Cu (Kpa)		
Arcilla limosa, alta compresibilidad (CH) 1-6 m	5	Max 55.69	Máx 17.84	Max 32.1	Max 23.6	Max 11550
		Prom 44.905	Prom 16.74	Prom 22.3	Prom 21.35	Prom 10604
		Min 34.12	Min 15.65	Min 12.5	Min 19.1	Min 9658
Arcilla limosa/Limo arcilloso. Alta plasticidad (CH/MH) 6-12 m	6	Max 95.36	Máx 16.65	Max 22.6	Max 19.42	Max 9758
		Prom 80.58	Prom 15.80	Prom 19.11	Prom 17.39	Prom 9373
		Min 65.8	Min 14.95	Min 15.62	Min 15.36	Min 8987
Arcilla alta compresibilidad (CH) 12-20 m	8	Max 125.4	Máx 15.88	Max 12.65	Max 14.65	Max 7896
		Prom 112.38	Prom 15.41	Prom 9.585	Prom 12.505	Prom 6566
		Min 99.36	Mín 14.95	Min 6.52	Min 10.36	Min 5236
Arcillas y limos de alta compresibilidad (CH/MH) 20-50 m	30	Max 156.3	Máx 16.20	Max 18.69	Max 15.69	Max 15698
		Prom 127.83	Prom 14.60	Prom 16.17	Prom 13.67	Prom 14198
		Min 99.36	Min 15.40	Min 13.65	Min 11.65	Min 12698

B. Parametrización de los modelos de análisis

Para la realización de los análisis paramétricos de estabilidad de la excavación y estimación de desplazamientos en la superficie del terreno, se plantearon modelos de simulación para excavaciones de anchos variables entre 5 m, 10 m, 15 m, 20 m y 40 m con profundidades de 3 m, 6 m, 9 m y 12 m, para cada caso. Así mismo, se

definió que las excavaciones incluyen como sistema de apuntalamiento muros-pantalla en concreto de 0.5 m de espesor, construidos a partir de técnicas convencionales de pre-excavación y fundición en el sitio (Figura 1).

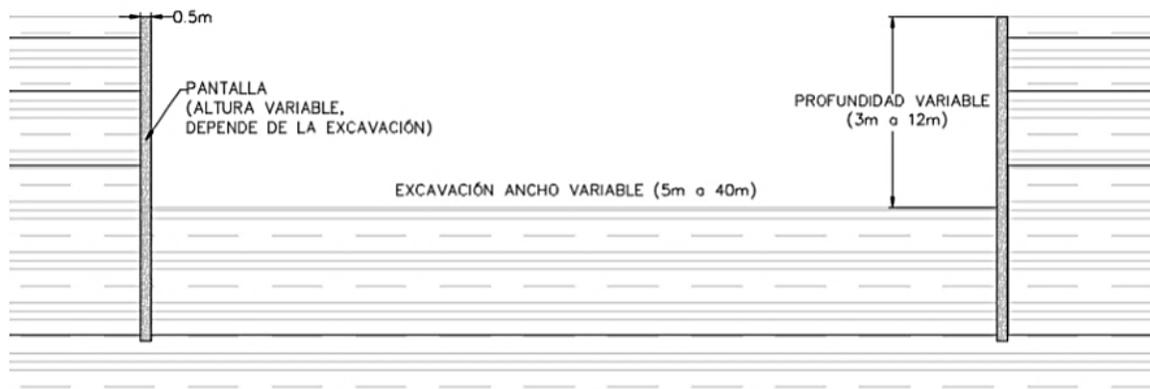


Fig. 1. Esquema sintético de la excavación analizada. Adaptado de [8].

Para simular los sistemas de apuntalamiento temporales y definitivos en escenarios de excavaciones para sótanos, se configuraron columnas cuadradas de 0.8 m de lado, para anchos de excavación mayores de 5 m, que, a su vez, se ubicaron sobre una cimentación profunda constituida por grupos de cuatro pilotes cilíndricos con longitud de 30 m y diámetro de 0.6 m, con separación entre ejes de 1.8 m en un mismo grupo. Este sistema se configuró como el apoyo de vigas perimetrales que ejercen la función de apuntalamientos durante la excavación y que, posteriormente, se convierten en placas de entrepiso definitivas en los sótanos.

La sobrecarga equivalente en el fondo de las excavaciones (q_{sf}) se estimó en 10 kPa, de manera conservativa. La profundidad del empotramiento de las pantallas para garantizar la estabilidad del sistema se estableció en $1.5 H$, en donde H es la sumatoria de las alturas de los sótanos, o profundidad total de excavación. Las fronteras de los modelos de simulación se extendieron hasta 50 m de profundidad y longitudes iguales al ancho de base (B) a partir de los paramentos de las pantallas. Se incluyeron sobrecargas en superficie de 10 kPa y 20 kPa uniformemente distribuidas, que representan de manera simplificada la presencia de estructuras y elementos aledaños propios del entorno urbano.

El modelo de comportamiento mecánico empleado para la simulación de las arcillas corresponde a un modelo Mohr-Coulomb en la resistencia al corte, y a un modelo constitutivo tipo elástico incremental, considerando módulos de elasticidad no drenados normalizados a deformaciones unitarias normales cercanas a 0.01 %, para relaciones de poisson de 0.48. A pesar de que los modelos de simulación del comportamiento son relativamente básicos y convencionales, se ajustan a la práctica ingenieril en Bogotá. Los análisis paramétricos se realizaron para condiciones de deformación plana de los sistemas de excavación.

C. Análisis determinístico y probabilístico de la falla de fondo – Estado Límite Último (ELU)

El estado límite último que representa la falla de fondo para las geometrías analizadas en las excavaciones fue estimado a partir de análisis de equilibrio límite deterministas y probabilistas, empleando el programa Slide V6 y el método de GLE/Morgenstern-Price. Para el análisis probabilístico, las variables que consideraron variaciones de acuerdo con una distribución normal fueron el peso unitario total y la cohesión no drenada y el ángulo de resistencia no drenado; la probabilidad de falla se halló empleando la aproximación estocástica de Montecarlo. El margen de seguridad Z, conocido también como función de comportamiento es una función que puede indicar el colapso de una estructura o la pérdida de funcionamiento correcto. Se define como la diferencia entre la resistencia R y la carga L en un sistema. Si las variables de este sistema son X_i , entonces se obtiene la ecuación (1).

$$Z(X_i) = R(X_i) - L(X_i) \quad (1)$$

Cuando Z es menor que cero, la falla de fondo ocurre. El fin del análisis de confiabilidad es asegurar la seguridad y esta solamente puede obtenerse en términos de la probabilidad de falla, tal como se presenta en la ecuación (2).

$$P_f = P[Z(X_i) < 0] = P[R(X_i) < L(X_i)] \quad (2)$$

Si la resistencia y la carga siguen distribuciones normales, entonces la probabilidad de falla puede calcularse mediante la ecuación (3).

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

Donde (ϕ) es la distribución estándar normal y β es un parámetro útil para caracterizar el grado de seguridad, llamado índice de confiabilidad, ecuación (4).

$$\beta = \frac{\mu_{FS}-1}{\sigma_{FS}} \quad (4)$$

Una vez calculado el índice de confiabilidad y la probabilidad de falla, el nivel de seguridad puede compararse cualitativamente de acuerdo con la Tabla 2. Para los estados límite últimos (ELU) de las excavaciones en el contexto del análisis paramétrico realizado, se consideró adecuado un índice de confiabilidad normal mayor a 3.

Tabla 2. Niveles de seguridad estimados a partir del índice de confiabilidad normal (β) y la probabilidad de falla (P_f). Adaptado de [10-11].

Nivel de seguridad	Índice de confiabilidad normal (β)	Probabilidad de Falla (P_f)
Alto	5.0	0.0000003
Bueno	4.0	0.0003
Por encima del promedio	3.0	0.001
Por debajo del promedio	2.5	0.006
Pobre	2.0	0.023
Insatisfactorio	1.5	0.07
Peligroso	1.0	0.16

Los análisis deterministas y probabilistas del ELU fueron realizados considerando condiciones de flujo de agua establecido en las arcillas para el sistema de excavación, por lo cual, se incluyeron líneas piezométricas derivadas del análisis de flujo bidimensional para una posición del nivel freático de 3.5 m bajo la superficie del terreno. En la Figura 2 se presenta un ejemplo de la evaluación del factor de seguridad y la probabilidad de falla para una excavación de 3 m de profundidad con ancho de base 10 m, y en la Figura 3 se presenta la evaluación del (ELU) para una excavación de 6 m de profundidad y 10 m de ancho de base. En la Tabla 3 se presentan los valores de las variables estadísticas asociadas al análisis probabilista de los estados límite últimos para las excavaciones analizadas, para cada uno de los materiales de la Tabla 1.

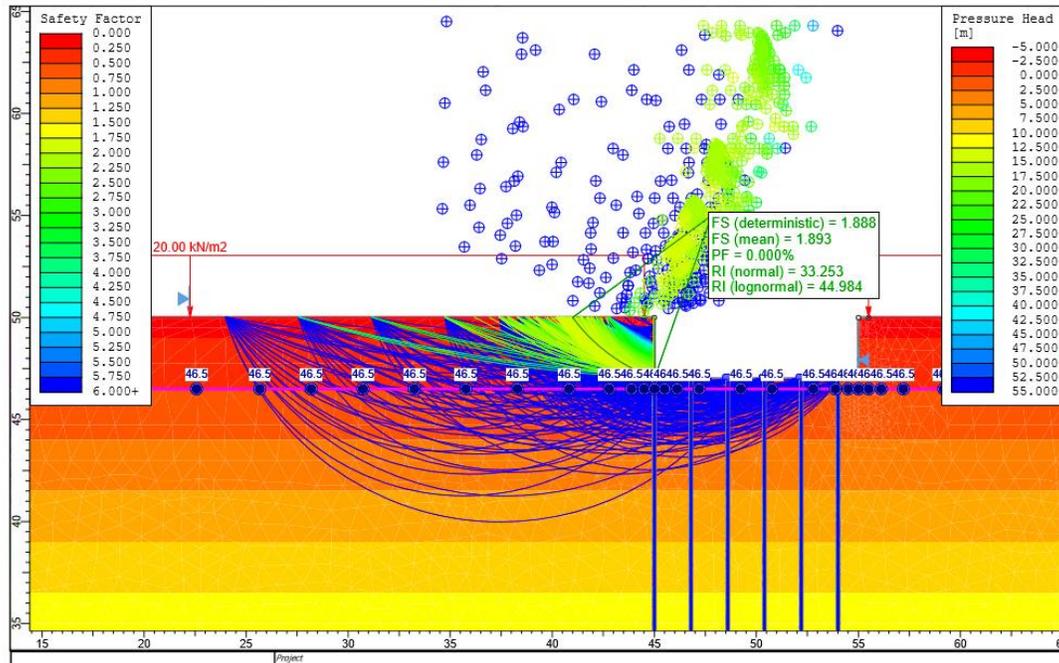


Fig. 2. Evaluación de la estabilidad por falla de fondo determinista y probabilista para una excavación de 3 m de profundidad y 10 m de ancho de base, con una sobrecarga en superficie de 10 kPa - SlideV6®.

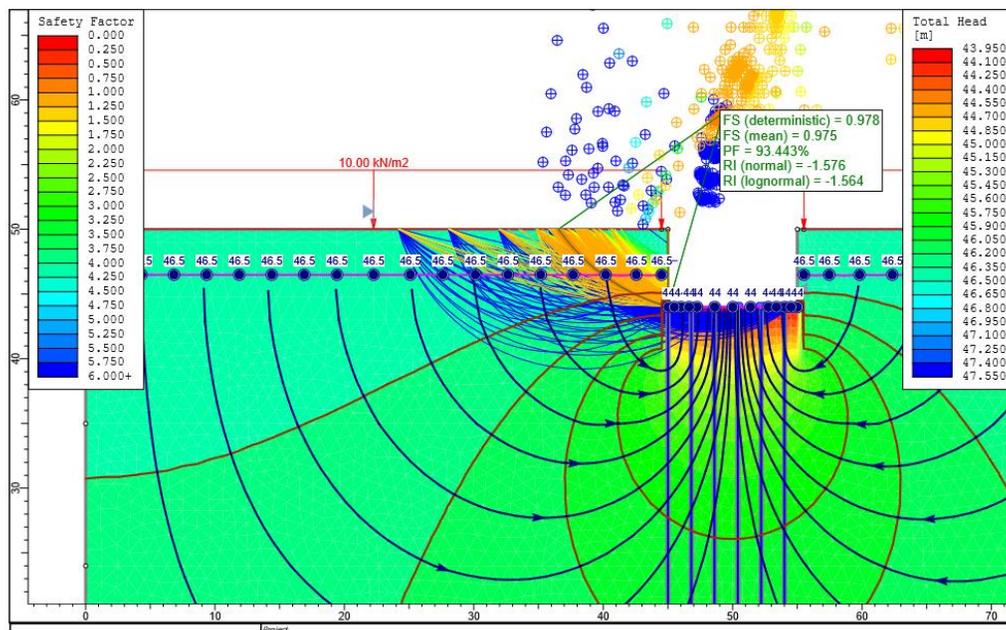


Fig. 3. Evaluación de la estabilidad por falla de fondo determinista y probabilista para una excavación de 6 m de profundidad y 10 de ancho de base, con una sobrecarga en superficie de 10 kPa empleando el programa SlideV6®.

Tabla 3. Valores asociados al análisis por confiabilidad de la falla de fondo.

Cohesión		Ángulo de fricción		Peso unitario	
Coefficiente de Variación CV	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación CV	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación CV	Desviación Estándar
40%	1,19	9%	2,10	6%	0,12
40%	0,82	9%	1,86	6%	0,11
40%	0,74	9%	1,65	6%	0,11
40%	0,71	9%	1,81	6%	0,10

D. Predicción de desplazamientos en superficie

Para predicción de desplazamientos en la superficie del terreno para las excavaciones analizadas se utilizó el programa Phase2® y los parámetros promedio del perfil estratigráfico, para el criterio de falla Möhr-Coulomb y el modelo constitutivo elástico. En las Figuras 4 y 5 se presentan algunos ejemplos de simulación de desplazamientos para dos excavaciones de 20 m de ancho y profundidades de 3 m y 6 m. Los desplazamientos máximos y mínimos en superficie, para el análisis de la amenaza, fueron procesadas a partir de los datos de salida del programa [2], en la cual la distorsión angular equivalente (Θ) se calculó en función del máximo desplazamiento de la deformadas del terreno en la superficie normalizada con la longitud de la zona deformada (L), ecuación (5).

$$\theta = (\delta v_{max})/L \quad (5)$$

Donde δv_{max} es el desplazamiento vertical máximo de la deformada de la superficie del terreno y L la longitud de la deformada en la superficie.

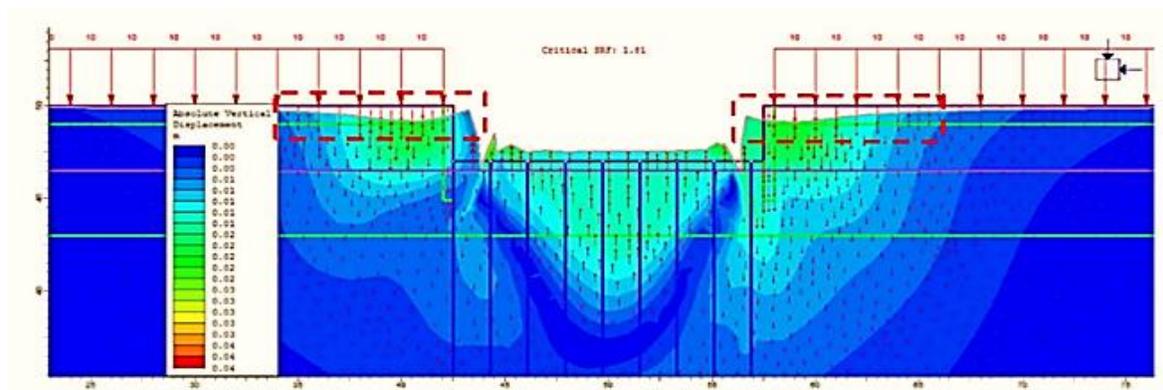


Fig. 4. Estimación de desplazamientos verticales para una excavación de 3 m de profundidad y 20 m de ancho de base con una sobrecarga en superficie de 10 kPa empleando el programa Phase2V6®.

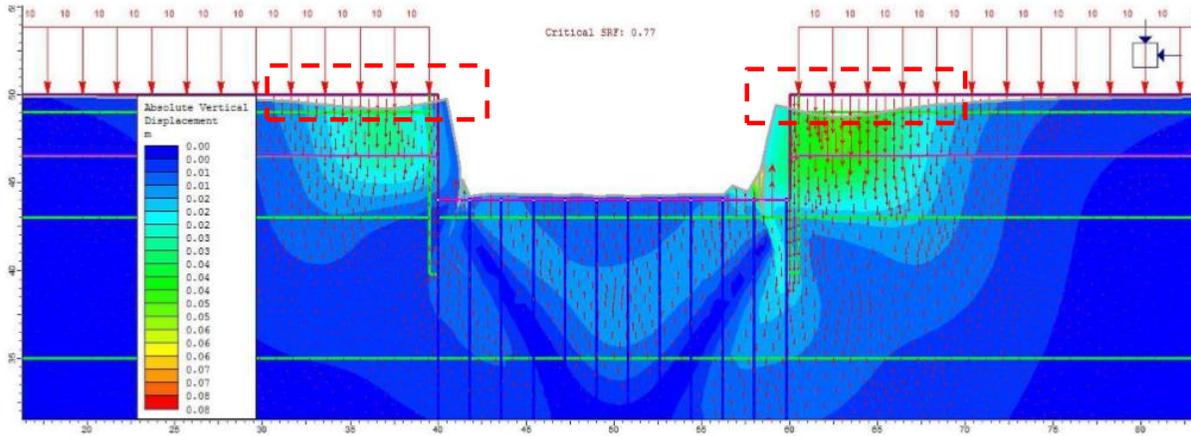


Fig. 5. Estimación de desplazamientos verticales para una excavación de 6 m de profundidad y 20 m ancho de base en superficie de 10 kPa empleando el programa Phase2V6®.

E. Determinación de la amenaza geotécnica

Para determinar el nivel de amenaza para los estados ELU, se siguieron los procedimientos reportados en [12-17, 20]. En la Tabla 4 se presentan intervalos de valores que definen los escenarios de amenaza baja, media y alta para los estados ELU y la probabilidad de falla.

Tabla 4. Clasificación de la amenaza a partir del factor de seguridad determinista establecido para la falla de fondo.

Nivel de amenaza	Factor de seguridad	Probabilidad anual de falla
Baja	> 1.5	< 0.001
Media	1.5 – 1.1	0.001 – 0.023
Alta	< 1.1	> 0.023

Para la estimación de los escenarios de amenaza por desplazamientos verticales en superficie, se empleó una categorización aproximada de los daños probables de elementos en superficie debidos a la magnitud de los giros asociados a la distorsión angular equivalente (Θ). En este sentido, luego de la revisión de diversas propuestas de autores como [14, 16-20], y en contraste con la propuesta de [2], en la Tabla 5 se presentan los umbrales que definen el daño probable en los estados límite de servicio (ELS) de estructuras y otros elementos del entorno urbano en superficie, a partir de los valores de la distorsión angular equivalente (Θ).

Tabla 5. Criterio para la clasificación de la amenaza en función de la distorsión angular equivalente en superficie (Θ).

Nivel de amenaza	Distorsión angular equivalente (Θ)
Baja	< 0.03
Media	0.03 – 0.1
Alta	> 0.1

III. RESULTADOS

En las Figuras 6 y 7, se presentan los resultados de los factores de seguridad determinísticos contra falla de fondo establecidos para las excavaciones analizadas con sobrecarga en superficie de 10 kPa, y de 20 kPa, respectivamente. En las gráficas, también se presentan los resultados de los factores de seguridad estimados con y sin sobrecarga en el fondo de la excavación (q_{sf}) de 10 kPa, la cual se relaciona con el efecto combinado de la carga equivalente que absorben los pilotes incluidos en el análisis paramétrico. En las mismas figuras, se presenta el valor límite del factor de seguridad de 1. Los resultados muestran que las excavaciones con anchos de base entre 5 m y 40 m y profundidades de 3 m con y sin sobrecarga en el fondo, para los dos escenarios analizados de sobrecarga en superficie, presentan factores de seguridad superiores a 1 y algunas excavaciones de 5 m y 10 m de ancho y 6 m de profundidad pueden considerarse seguras, principalmente por el efecto de la sobrecarga en el fondo de la excavación. Los resultados sugieren que el efecto de la sobrecarga en el fondo contribuye con un aumento del factor de seguridad entre el 18 y el 23% para todos aquellos casos en los cuales este factor es superior a 1.

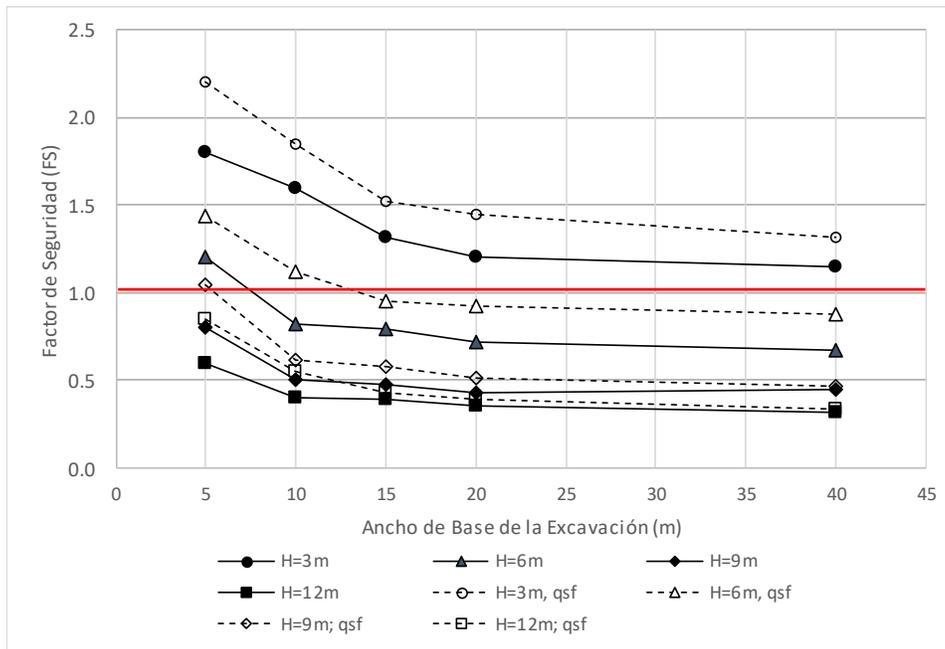


Fig. 6. Resultados del factor de seguridad contra la falla de fondo, en escenarios con sobrecarga en superficie de 10 kPa, con y sin sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

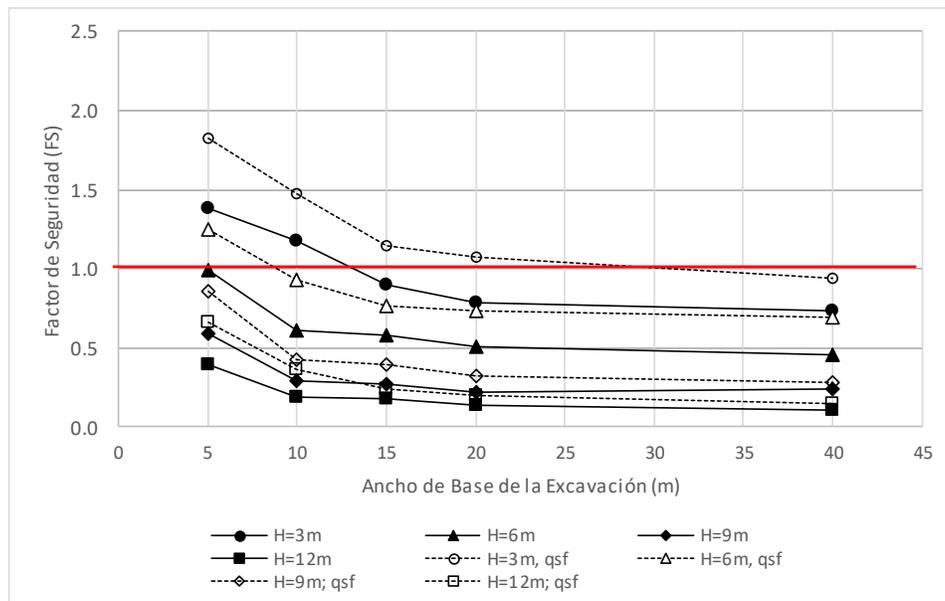


Fig. 7. Resultados del factor de seguridad contra la falla de fondo, en escenarios con sobrecarga en superficie de 20 kPa con y sin sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

En las Figuras 8 y 9 se presentan los resultados de la probabilidad de falla P_f por falla de fondo para los escenarios analizados con sobrecarga en superficie de 10kPa

y 20 kPa, respectivamente, incorporando el efecto de la sobrecarga equivalente en el fondo de la excavación q_{sf} . En las dos figuras, se puede observar que, para todos los anchos analizados, la excavación de 3 m de profundidad presenta valores de probabilidad de falla que oscilan entre 3% y 15%, aproximadamente. En este sentido, varios autores [10, 18-19] mencionan que una probabilidad de falla superior al 10 % puede asociarse a estados indeseables de seguridad, en especial porque el índice de confiabilidad (β), puede ser inferior a 3. Estas condiciones se cumplen para valores de P_f mayores a 9 %, en los modelos de simulación analizados. Para las demás profundidades, la P_f oscila entre el 88 y el 100%, lo cual indica claramente que las excavaciones de mayor profundidad, para todos los anchos de base analizados, poseen criterios de estabilidad geotécnica inaceptables.

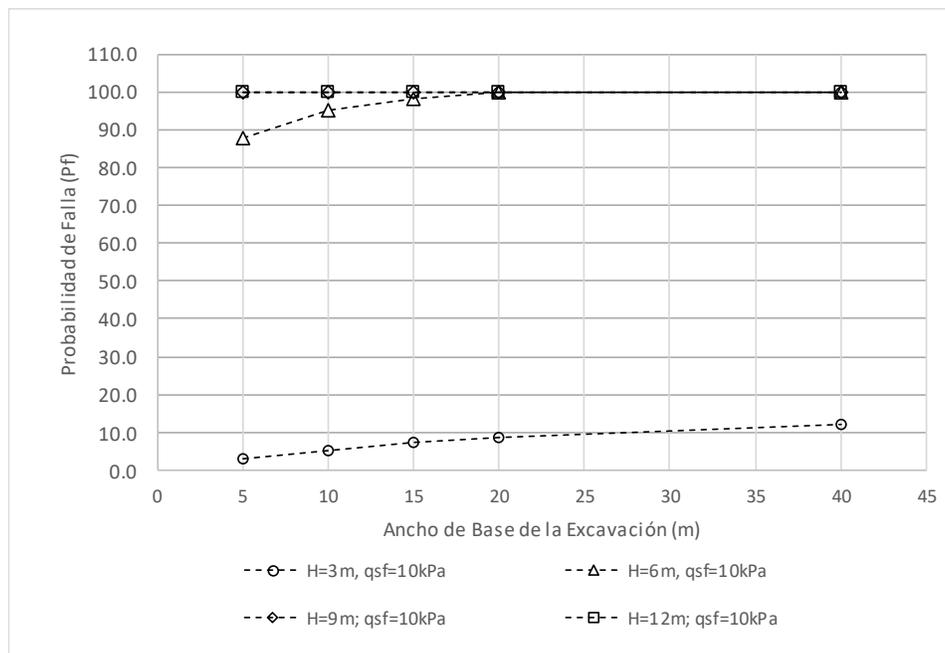


Fig. 8. Resultados del factor de seguridad contra la falla de fondo, en escenarios con sobrecarga en superficie de 10 kPa, con y sin sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

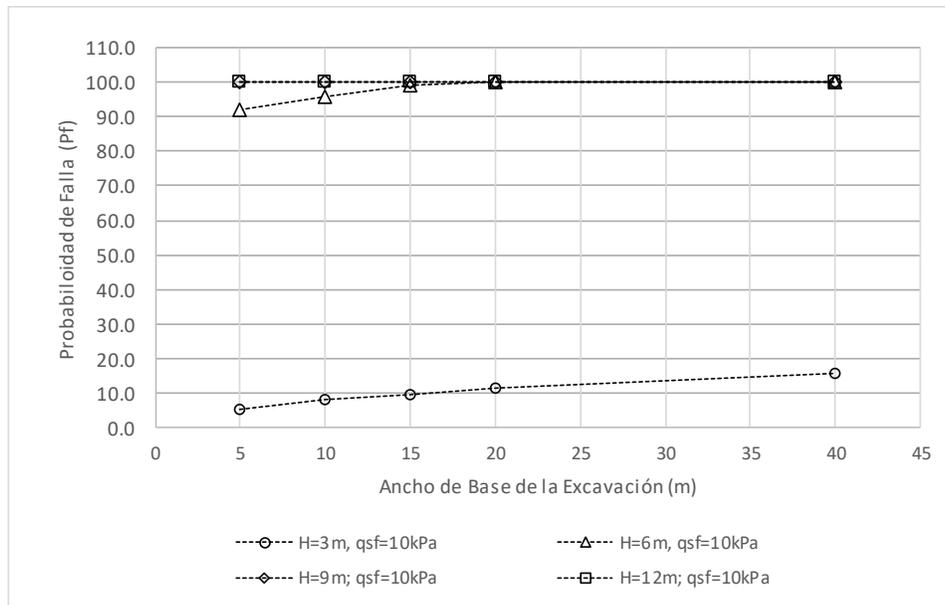


Fig. 9. Resultados de la probabilidad por falla de fondo, en escenarios con sobrecarga en superficie de 20 kPa, con y sin sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

Las Figuras 10 y 11 muestran los desplazamientos máximos obtenidos en superficie a partir de las simulaciones por elementos finitos para sobrecargas de 10 kPa y 20 kPa, considerando las diferentes dimensiones de las excavaciones analizadas y la sobrecarga en el fondo. Las tendencias de los valores de los desplazamientos en superficie muestran que la magnitud de los asentamientos es proporcional a la profundidad y ancho de base de la excavación. No obstante, los mayores valores de asentamientos se producen para la mayor sobrecarga en superficie, aumentando entre un 12 y 21 % para los anchos de base de 20 m y 40 m.

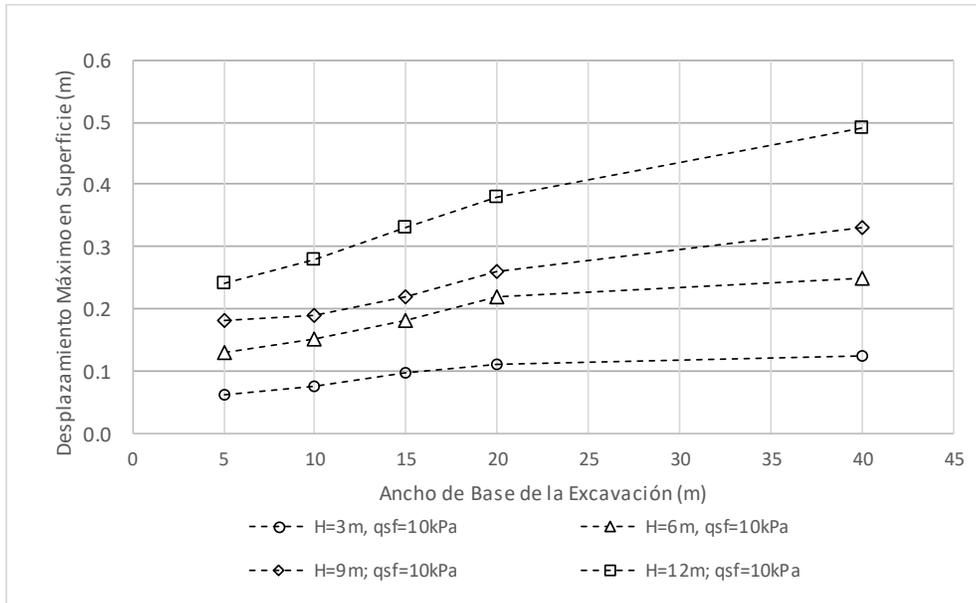


Fig. 10. Resultados del desplazamiento máximo en superficie, en escenarios con sobrecarga en superficie de 10kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10kPa.

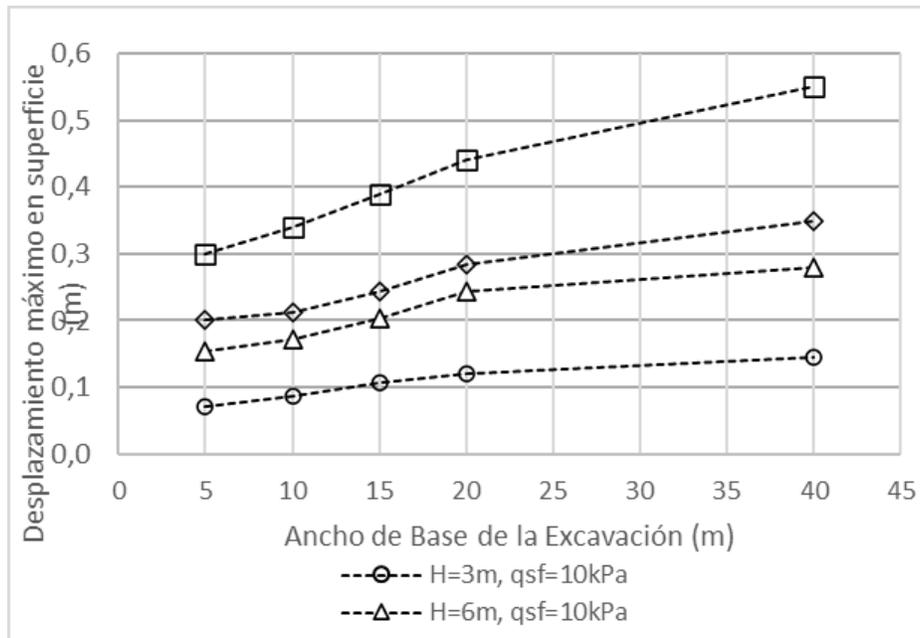


Fig. 11. Resultados del desplazamiento máximo en superficie, en escenarios con sobrecarga en superficie de 20kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10kPa.

La variación de la distorsión angular (θ) en superficie para las excavaciones analizadas se presenta en las Figuras 12 y 13, para las dos sobrecargas aplicadas en superficie y la aplicación de sobrecarga q_{sf} en el fondo de la excavación. Las

figuras sugieren que a medida que aumenta el ancho de base disminuye la distorsión angular, esto debido al aumento de la longitud de la zona afectada por la deformada en superficie de manera proporcional al ancho de base de la excavación luego de la simulación numérica. Es claro que el aumento de la distorsión angular es proporcional también al aumento de la profundidad de la excavación, de manera independiente a la magnitud de la sobrecarga en la superficie, pero las variaciones de las distorsiones angulares pueden superar el 10% para la sobrecarga de 20 kPa en relación con la sobrecarga de 10 kPa.

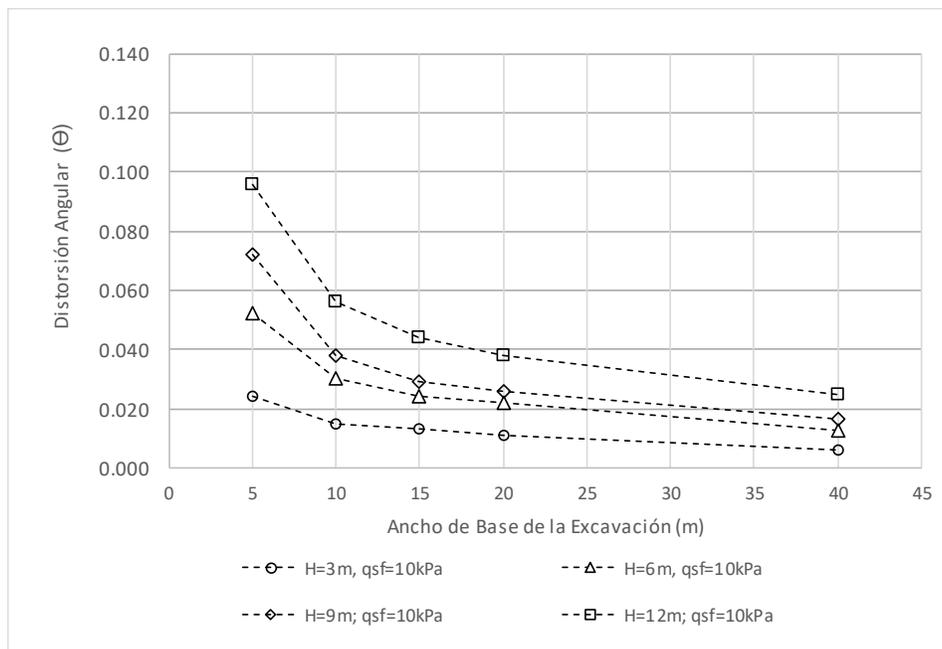


Fig. 12. Resultados de la distorsión angular en la superficie del terreno, en escenarios con sobrecarga en superficie de 10 kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

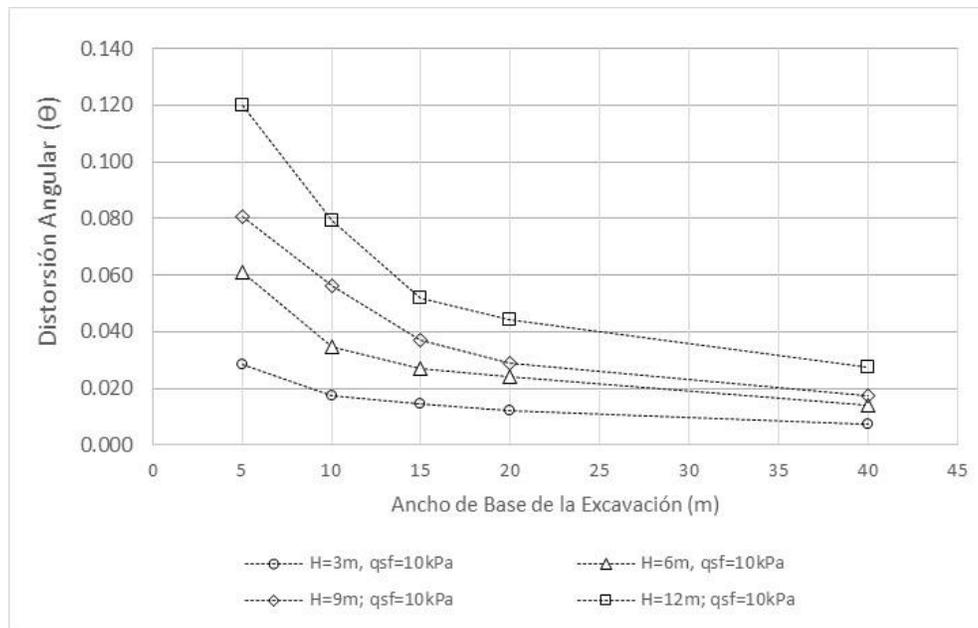


Fig. 13. Resultados de la distorsión angular en la superficie del terreno, en escenarios con sobrecarga en superficie de 20 kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

Con los resultados obtenidos se realiza una propuesta para la determinación de la matriz de amenaza que ejercen las excavaciones, a partir de los parámetros como: el factor de seguridad, la probabilidad de falla y la distorsión angular que relaciona la geometría de la excavación con el desplazamiento vertical.

En la Tabla 7 se visualizan los datos obtenidos junto con la clasificación por color de acuerdo con la matriz de amenaza planteada, obteniendo que para profundidades hasta 3 m con cargas de 10 kN/m² y 20 kN/m², la probabilidad de ocurrencia de falla es baja, excepto para el caso de la excavación de 5 m x 3 m, la cual presenta una amenaza moderada. Finalmente, para excavaciones a 6 m, 9 m y 12 m con ambas cargas en superficie, la amenaza es alta; siendo congruente con la realidad de las condiciones de respuesta mecánica de los suelos del norte y del noroccidente de la ciudad durante la ejecución de excavaciones.

Tabla 1. Clasificación de los datos a partir de la matriz de amenaza planteada con sobrecarga en el fondo de la excavación (qsf).

B (m)	H (m)	B/H	q(sup) (Kn/m ²)	Análisis de Falla de Fondo			θ	B (m)	H (m)	B/H	q (sup) (Kn/m ²)	Análisis de Falla de Fondo			θ
				FS	PF %	δ _v max (m)						FS	PF %	δ _v max (m)	
5	3	1.7	10	2.2	3	0.06	0.024	5	3	1.7	20	1.82	5.5	0.071	0.028
10	3	3.3	10	1.85	5	0.075	0.015	10	3	3.3	20	1.47	8.2	0.086	0.017
15	3	5.0	10	1.52	7.5	0.097	0.013	15	3	5.0	20	1.14	9.4	0.108	0.014
20	3	6.7	10	1.45	8.8	0.110	0.011	20	3	6.7	20	1.07	11.3	0.121	0.012
40	3	13.3	10	1.32	12.3	0.125	0.006	40	3	13.3	20	0.94	15.6	0.145	0.007
5	6	0.8	10	1.44	88	0.130	0.052	5	6	0.8	20	1.25	92	0.153	0.061
10	6	1.7	10	1.12	95	0.150	0.030	10	6	1.7	20	0.93	96	0.173	0.035
15	6	2.5	10	0.95	98	0.180	0.024	15	6	2.5	20	0.76	99	0.203	0.027
20	6	3.3	10	0.92	100	0.220	0.022	20	6	3.3	20	0.73	100	0.243	0.024
40	6	6.7	10	0.88	100	0.250	0.013	40	6	6.7	20	0.69	100	0.280	0.014
5	9	0.6	10	1.05	100	0.180	0.072	5	9	0.6	20	0.86	100	0.202	0.081
10	9	1.1	10	0.62	100	0.190	0.038	10	9	1.1	20	0.43	100	0.213	0.056
15	9	1.7	10	0.58	100	0.220	0.029	15	9	1.7	20	0.39	100	0.243	0.037
20	9	2.2	10	0.51	100	0.260	0.026	20	9	2.2	20	0.32	100	0.283	0.029
40	9	4.4	10	0.47	100	0.330	0.017	40	9	4.4	20	0.28	100	0.350	0.018
5	12	0.4	10	0.85	100	0.240	0.096	5	12	0.4	20	0.66	100	0.300	0.120
10	12	0.8	10	0.55	100	0.280	0.056	10	12	0.8	20	0.36	100	0.340	0.079
15	12	1.3	10	0.43	100	0.330	0.044	15	12	1.3	20	0.24	100	0.390	0.052
20	12	1.7	10	0.39	100	0.380	0.038	20	12	1.7	20	0.20	100	0.440	0.044
40	12	3.3	10	0.34	100	0.490	0.025	40	12	3.3	20	0.15	100	0.550	0.028

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La estimación de la amenaza sobre elementos del entorno urbano a causa de excavaciones profundas en los suelos arcillosos de origen lacustre en la ciudad de Bogotá D.C., constituye un aspecto fundamental en la planificación de proyectos de infraestructura bajo un enfoque moderno. En este trabajo se presentaron algunas tendencias de comportamiento para modelos paramétricos simplificados en condiciones de deformación plana, de excavaciones con profundidades y anchos variables con alturas entre placas de los sótanos de 3 m. A pesar de las limitaciones de los modelos de simulación planteados, se buscó incorporar la variabilidad de los parámetros de resistencia y rigidez no drenados a partir de una base de datos amplia para incrementar la confiabilidad de los análisis.

El efecto de la geometría de la excavación en los desplazamientos en superficie puede observarse en las Figuras 14 y 15 en donde se presentan los valores máximos del desplazamiento (δ_{vmax}) en función de la relación (H/B) para las cuatro profundidades de excavación analizadas, discriminando la magnitud de la sobrecarga en superficie. Como se observa, existe una relación inversa entre los desplazamientos máximos y el valor de (H/B) asociado al efecto del ancho de excavación. No obstante, los asentamientos en superficie se incrementan con la profundidad de una manera considerable. De manera congruente con el aumento de los desplazamientos en superficie, los estados límite de servicio (ELS) se restringen como admisibles, en el contexto urbano de Bogotá, con excavaciones no mayores a 3 m y anchos de base inferiores a 10 m, para los cuales se presentan las probabilidades de falla de fondo (P_f) más bajas. Es claro, entonces, que una medida adecuada para la mitigación de la amenaza geotécnica en superficie durante la ejecución de excavaciones consiste en implementar anchos de excavación no mayores a 5 m durante las etapas de ejecución de estas actividades.

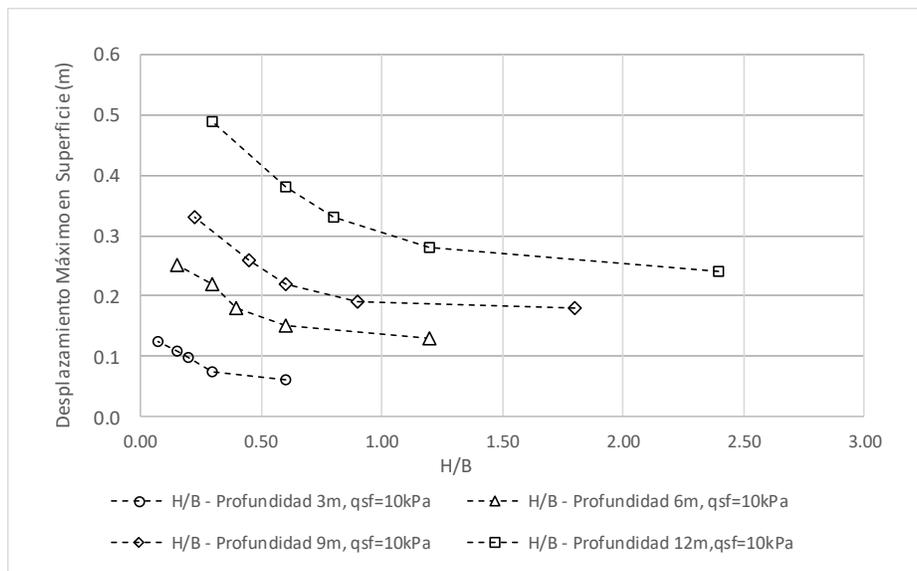


Fig. 14. Desplazamientos máximos en la superficie del terreno vs (H/B), en escenarios con sobrecarga en superficie de 10 kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

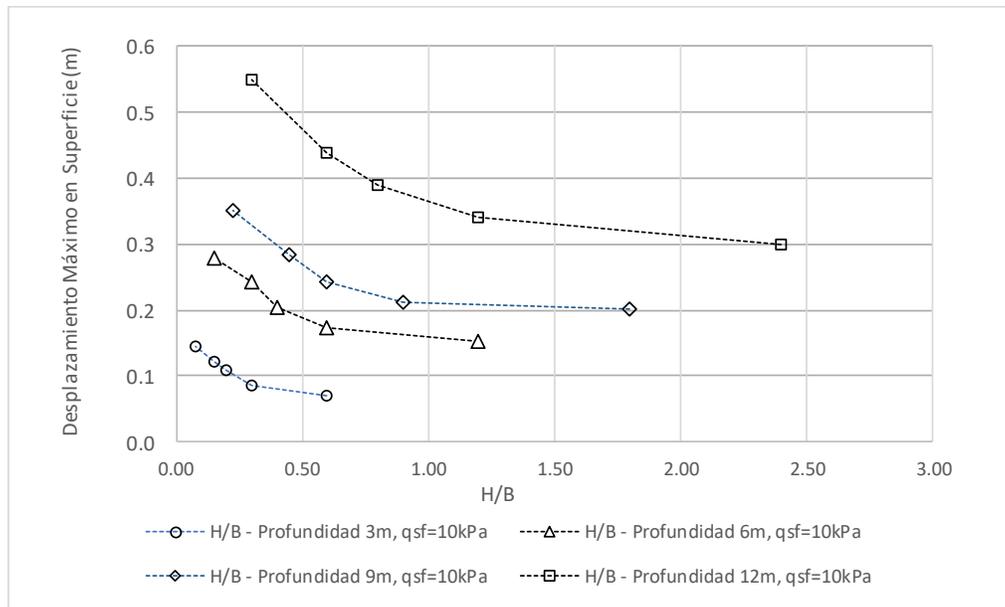


Fig. 15. Desplazamientos máximos en la superficie del terreno vs (H/B), en escenarios con sobrecarga en superficie de 20 kPa, con sobrecarga en el fondo q_{sf} de 10 kPa.

A pesar de las aproximaciones básicas asumidas durante los análisis paramétricos realizados, las tendencias de los resultados permiten establecer que las profundidades de excavación que pueden considerarse como críticas en las arcillas lacustres de Bogotá, oscilan entre los 5 m y 6 m, valores a partir de los cuales la amenaza geotécnica puede considerarse como media a alta.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Jorge-Arturo Pineda-Jaimes: Conceptualización, Curación de Datos, Análisis Formal, Investigación, Escritura, revisión y edición del texto.

César-Augusto García-Ubaque: Investigación, Supervisión, Metodología, Validación, Escritura, revisión y edición del texto.

Rodrigo-Elías Esquivel-Ramírez: Investigación, Supervisión, Metodología, Validación, Escritura, revisión y edición del texto.

REFERENCIAS

- [1] D. Basu, A. Misra, and A. J. Puppala, "Sustainability and geotechnical engineering: perspectives and review," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 52 (1), pp. 96-113, 2015. <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0120>

- [2] D. Basu, and A. J. Puppala, "Principles of Sustainability and Their Applications in Geotechnical Engineering," *Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 5, pp. 162-183, 2015. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-599-9-162>
- [3] M. Lee, Resilience assessment in geotechnical engineering, Doctoral Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Belgium, 2016.
- [4] D. G. A. Holt, Sustainable assessment for geotechnical projects, Doctoral Thesis, University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom, 2010.
- [5] S. Larrañaga, and J. A. Pineda, "Análisis simplificado de la ocurrencia de falla de fondo en la ejecución de excavaciones para sótanos en suelos blandos de Bogotá, D.C.," in *XII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Bucaramanga, Colombia, 2003.
- [6] C. Sainea, and M. C. Torres, "Selección de parámetros para análisis numéricos y probabilísticos de excavaciones," in *International Especialiced Conference on Soft Rocks*, Cartagena, Colombia, 2016.
- [7] S. Larrañaga, and J. A. Pineda, *Elementos para la Estimación de la Amenaza por Excavaciones en Bogotá D.C.*, Madrid, Spain: CIDIS-Research Center for Sustainable Engineering, 2019.
- [8] J. Martinez, and B. Páez, "Análisis probabilístico de la falla de fondo en excavaciones urbanas en los suelos blandos de Bogotá D.C. y sus implicaciones en la amenaza por desplazamientos en elementos de la infraestructura vial urbana," Masther Thesis, Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C., Colombia, 2019.
- [9] C. J. Sainea-Vargas, and M. C. Torres-Suárez, "Damage probability assessment for adjoining buildings to deep excavations in soft soils," *International Journal Geotechnical. Engineering*, vol. 2019, pp. 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1680486>
- [10] S. Tangchawal, "Reliability and assessment techniques on ground excavation," *Engineering Journal.*, vol. 13 (2), pp. 1-8, 2009. <https://doi.org/10.4186/ej.2009.13.2.1>
- [11] S. S. Chowdhury, "Reliability Analysis of Excavation Induced Basal Heave," *International Journal Geotechnical. Engineering*, vol. 35 (6), pp. 2705-2714, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0272-2>
- [12] Geotechnical Control, *QRA of Collapse and Excessive Displacements of Deeo Excavations*, Hong Kong, 1999.
- [13] M. Korf, *Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils*, Amsterdam: Delf Cluster, 2009.
- [14] D. D'Ayala, "Assessment of the settlement vulnerability of masonry buildings," in *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, S. Tesfamariam, K. Goda (eds.), Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing, pp. 334-365, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.334>
- [15] Z. Luo, and B. M. Das, "System probabilistic serviceability assessment of braced excavations in clays," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 10 (2), pp. 135-144, 2016. <https://doi.org/10.1179/1939787915Y.0000000021>
- [16] G. Giardina, V. Floria, M. A. N. Hendriks, and J. G. Rots, "Vulnerability assessment of buildings subject to tunnel-induced settlements: the influence of orientation and position of the building," in *World Tunnel Congress*, pp. 1-8, 2012.
- [17] H. G. Poulos, R. P. Cunha, and H. G. Poulos, "Importance of the Excavation Level on the Prediction of the Settlement Pattern from Piled Raft Analyses," *Soils and Rocks*, vol. 41 (1), pp. 91-99, Apr. 2018. <https://doi.org/10.28927/SR.411091>
- [18] G. B. Baecher, and J. T. Christian, *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, United Kingdom: Wiley, 2003.

- [19] D. Peduto, M. Korff, G. Nicodemo, A. Marchese, and S. Ferlisi, "Empirical fragility curves for settlement-affected buildings: Analysis of different intensity parameters for seven hundred masonry buildings in The Netherlands," *Soils and Foundations*, vol. 59 (2), pp. 380-397, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.12.009>
- [20] S. Rozo-Rincón, J. Sánchez-Molina, and J. Gelves-Díaz, "Evaluación de minerales aluminio silicatos de Norte de Santander para fabricar piezas cerámicas de gran formato," *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 24 (38), pp. 53-61, 2015. <https://doi.org/10.19053/01211129.3158>