

**ALTERNATIVA DE ESTABILIZACIÓN EN SUELOS DE RELLENOS ANTRÓPICOS A PARTIR ESTUDIOS DE  
SUELOS Y MODELACIONES GEOTÉCNICAS TOMANDO COMO CASO DE ESTUDIO EDIFICIO COMPLEJO  
MUSEO CHICO PH EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ**

Yeison Alejandro Torres Rodríguez



Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones, Facultad de

Ingenierías

Universidad

Bogotá

2024

**Alternativa de estabilización en suelos de rellenos antrópicos a partir estudios de suelos y modelaciones geotécnicas tomando como caso de estudio Edificio Complejo Museo Chico PH en la ciudad de Bogotá**

**Yeison Alejandro Torres Rodríguez**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones**

**Ing. Sandra Sánchez (Directora)**



**UNIVERSIDAD**  
**La Gran Colombia**

Vigilada MINEDUCACIÓN

**Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones, Facultad de**

**Ingenierías**

**Universidad**

**Ciudad**

**2025**

### **Dedicatoria**

A mi madre, Quien, con su amor incondicional, apoyo y enseñanzas me han inspirado a perseguir mis sueños y alcanzar mis metas. Gracias por creer en mí siempre y por brindarme las herramientas necesarias para afrontar los desafíos de la vida.

A mi amada esposa, Compañera de vida, confidente incondicional y fuente de inspiración inagotable. Gracias por tu amor incondicional, tu apoyo inquebrantable y tu fe inquebrantable en mí. Este trabajo de grado es un reflejo de tu fuerza, tu paciencia y tu constante aliento.

A mi querido hijo, Mi pequeño gran hombre, la luz que ilumina mi camino y la razón por la que lucho cada día. Gracias por tu sonrisa radiante, tu energía contagiosa y tu amor puro. Este trabajo de grado es un testimonio de mi deseo de brindarte un futuro mejor y de ser un ejemplo a seguir.

Juntos, Han sido mi motivación constante, mi refugio en los momentos difíciles y la razón por la que me levanto cada día con la determinación de alcanzar mis metas. Este trabajo de grado es un homenaje a nuestra familia, a nuestro amor y a los sueños que compartimos.

Con infinito amor y gratitud,

Yeison Alejandro Torres Rodríguez

## **Agradecimientos**

La culminación de este trabajo de grado no habría sido posible sin el invaluable apoyo y la contribución de diversas personas e instituciones, a quienes expreso mi más sincera gratitud.

En primer lugar, deseo manifestar un profundo agradecimiento a la Ing. Sandra Sánchez, mi directora de tesis, por su constante orientación, experticia técnica, paciencia y motivación a lo largo de todo este proceso. Su guía fue fundamental para superar los desafíos inherentes a la investigación y el desarrollo de la metodología propuesta.

Extiendo mi reconocimiento a la Universidad La Gran Colombia, en particular a la Facultad de Ingenierías y la Especialización en Diseño y Construcción de Obras de Infraestructura y Edificaciones, por brindarme la formación académica y los recursos necesarios para llevar a cabo este estudio.

Asimismo, agradezco a la administración y al personal del Edificio Complejo Museo Chico PH por facilitar el acceso a la información y al sitio de estudio, lo cual fue crucial para el desarrollo de esta investigación sobre la estabilización de taludes en rellenos antrópicos.

Finalmente, a toda la comunidad académica y profesional que, a través de sus conocimientos y publicaciones, ha enriquecido el campo de la ingeniería, permitiendo sentar las bases para la presente investigación.

A todos ellos, gracias.

## Tabla de contenido

<b>RESUMEN .....</b>	<b>12</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>14</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>JUSTIFICACION .....</b>	<b>16</b>
<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>17</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>19</b>
OBJETIVO GENERAL .....	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>MARCO TEORICO .....</b>	<b>20</b>
MECANISMOS DE ESTABILIZACION.....	20
1. Refuerzo Estructural con Muros de Contención.....	20
2. Sistemas de Drenaje para Reducir Presión de Poros.....	21
3. Mejoramiento del Suelo (Técnicas de Estabilización) .....	22
4. Soluciones Basadas en Naturaleza (Bioingeniería).....	22
DISEÑO DE LA ESTABILIZACION.....	23
Diseño Geométrico y Estructural del Muro de Contención .....	23
Dimensionamiento Preliminar y Estabilidad Externa.....	24
Cálculo de Presiones de Tierra .....	25
Diseño Estructural del Concreto Armado.....	25
Drenaje y Protección del Muro .....	26
Modelación Geotécnica Numérica.....	26
Monitoreo y Control de Calidad.....	27

<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
FASE 1. ESTUDIO PRELIMINAR DE CAMPO.....	28
1.Revision Datos Preliminares .....	28
1.1 Localización General.....	28
1.2 Localización Zona de estudio .....	29
1.3 Visita de campo y Reconocimiento .....	29
FASE 2: REVISION ESTADO ACTUAL.....	32
Modelación 1 “Condición Natural del Terreno”.....	37
Modelación 2 “Condición Actual del Terreno”.....	38
FASE 3: ALTERNATIVA DE SOLUCION PROPUESTA. ....	39
Modelación 3 “contención con muro en concreto” .....	41
<b>ANALISIS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>45</b>
<b>WEBGRAFÍA.....</b>	<b>46</b>

**Tabla de Ilustraciones**

Ilustración 1. Localización general de la zona de estudio, Mapas localidad de chapinero, ciudad de Bogotá, Colombia.....	28
Ilustración 2. Localización de la zona de estudio.....	29
Ilustración 3. Reconocimiento de campo .....	30
Ilustración 4. Reconocimiento de campo .....	30
Ilustración 5. Reconocimiento de campos.....	31
Ilustración 6. Reconocimiento de campo .....	31
Ilustración 7. Reconocimiento de campo .....	32
Ilustración 8 perfil estratigráfico sondeo 1.....	33
Ilustración 9 perfil estratigráfico sondeo 2.....	33
Ilustración 10 Perfil estratigráfico sondeo 3.....	34
Ilustración 11. Modelación condición natural del terreno complejo museo chico .....	37
Ilustración 12. Modelación de la condición actual del terreno con muro en ladrillo.....	38
Ilustración 13. Modelación con muro de concreto.....	41

**Lista de Tablas**

Tabla 1 Cuadro Comparativo de Métodos.....	23
Tabla 3. Perfil estratigráfico primer estudio .....	35
Tabla 4. Perfil estratigráfico primer segundo estudio .....	35
Tabla 5. Características geomecánicas del subsuelo .....	36
Tabla 6. Resumen datos de las modelaciones. ....	41

## GLOSARIO

**Afloramiento:** Salida natural de una formación rocosa a la superficie terrestre.

**Agentes erosivos:** Factores como el agua, el viento, el hielo y la gravedad que desgastan y erosionan el suelo.

**Análisis de estabilidad:** Evaluación de la capacidad de un talud para resistir fuerzas externas y mantener su forma original.

**Antrópico:** Relativo a la actividad humana.

**Arcilla:** Tipo de suelo fino compuesto por partículas pequeñas y compactas, con alta capacidad de retención de agua.

**Capa freática:** Nivel subterráneo donde se encuentra agua saturada en el suelo o roca.

**Cohesión:** Fuerza que mantiene unidas las partículas del suelo.

**Compactación:** Proceso de densificación del suelo mediante presión mecánica.

**Condiciones geotécnicas:** Características del suelo y las rocas en un lugar específico, incluyendo su tipo, estratificación, densidad, resistencia y propiedades hidráulicas.

**Drenaje:** Sistema para eliminar el agua del suelo o la superficie del talud.

**Deformación:** Cambio en la forma o tamaño de un material debido a una fuerza externa.

**Erosión:** Desgaste y transporte de material del suelo por acción del agua, viento u otros agentes.

**Escarpe:** Talud o pendiente abrupta en un terreno.

**Estabilización de taludes:** Conjunto de técnicas para mejorar la resistencia y estabilidad de un talud frente a deslizamientos o derrumbes.

**Factor de seguridad:** Relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras en un talud.

**Falla:** Ruptura o dislocación en la estructura del suelo o la roca.

**Filtración:** Movimiento lento del agua a través del suelo o la roca.

**Geología:** Ciencia que estudia la estructura, composición e historia de la Tierra.

**Geotecnia:** Rama de la ingeniería civil que se ocupa del comportamiento del suelo y las rocas en relación con las obras de ingeniería.

**Humedad:** Cantidad de agua presente en el suelo.

**Índice de vacíos:** Relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de un suelo.

**Inclinación:** Ángulo que forma un talud con la horizontal.

**Limos:** Tipo de suelo fino compuesto por partículas de tamaño intermedio entre la arcilla y la arena.

**Masa de deslizamiento:** Material del suelo o la roca que se desliza por un talud.

**Mecánica de suelos:** Rama de la ingeniería civil que estudia el comportamiento del suelo bajo cargas.

**Nivel freático:** Nivel del agua subterránea en un pozo o perforación.

**Perfil del suelo:** Descripción vertical de las diferentes capas del suelo en un lugar específico.

**Pilotes:** Elementos estructurales verticales hincados en el suelo para transmitir cargas.

**Precipitación:** Cantidad de agua que cae a la superficie terrestre en forma de lluvia o nieve.

**Presión de poro:** Presión del agua intersticial en el suelo.

**Resistencia al corte:** Capacidad del suelo para resistir fuerzas que lo deforman o cortan.

**Suelo:** Material compuesto por partículas minerales, orgánicas y aire que cubre la superficie terrestre.

**Suelo antrópico:** Suelo formado por la actividad humana, como rellenos.

## RESUMEN

La inestabilidad en taludes compuestos por rellenos antrópicos representa un desafío significativo en la ingeniería civil, particularmente en contextos urbanos como Bogotá. Este estudio se centra en el análisis y estabilización de un talud ubicado en el Complejo Residencial Museo Chico PH, el cual presenta riesgos para la infraestructura actual debido a su composición heterogénea, baja cohesión y ausencia de sistemas de drenaje efectivos. Mediante programas de modelaciones geotécnicas como las realizadas con el software SLIDE, se evaluaron tres escenarios: la condición natural del terreno, la situación actual con un muro de mampostería y una solución propuesta basada en un muro de concreto armado con cimentación profunda y sistema de drenaje integrado. Los resultados deben demostrar que la alternativa propuesta alcanza un Factor de Seguridad mínimo establecidos por la NSR-10 de ( $FS \geq 1.5$ ). Adicionalmente, se identificaron los parámetros geomecánicas críticos del suelo, como una cohesión efectiva ( $c'$ ) entre 5–15 kPa y un ángulo de fricción interna ( $\phi'$ ) de 25°–30°, que influyen directamente en la estabilidad del talud. El estudio debería concluir que la implementación de un muro de concreto, complementado con filtros y monitoreo continuo, constituye la solución más viable técnica y normativamente, garantizando la seguridad estructural y mitigando riesgos a largo plazo.

*Palabras clave: taludes, estabilización, rellenos antrópicos, modelaciones geotécnicas.*

**ABSTRACT**

Instability in slopes composed of anthropogenic fills represents a significant challenge in civil engineering, particularly in urban contexts such as Bogotá. This study focuses on the analysis and stabilization of a slope located in the Museo Chico Residential Complex (PH), which poses risks to the current infrastructure due to its heterogeneous composition, low cohesion, and absence of effective drainage systems. Using geotechnical modeling programs such as those performed with SLIDE software, three scenarios were evaluated: the natural condition of the terrain, the current situation with a masonry wall, and a proposed solution based on a reinforced concrete wall with a deep foundation and integrated drainage system. The results should demonstrate that the alternative proposal meets the minimum Safety Factor established by NSR-10 ( $FS \geq 1.5$ ). In addition, critical soil geomechanical parameters were identified, such as an effective cohesion ( $c'$ ) of 5–15 kPa and an internal friction angle ( $\phi'$ ) of 25–30°, which directly influence slope stability. The study should conclude that the implementation of a concrete wall, complemented by filters and continuous monitoring, constitutes the most technically and normatively viable solution, ensuring structural safety and mitigating long-term risks.

## INTRODUCCION

En Bogotá, la expansión urbana sobre terrenos con rellenos antrópicos ha incrementado los riesgos asociados a la inestabilidad de taludes, generando desafíos críticos para la seguridad de infraestructuras y comunidades. Estos suelos, caracterizados por su heterogeneidad, baja cohesión y alta permeabilidad, son particularmente susceptibles a fallas por deslizamiento, especialmente en zonas de pendiente pronunciada y alta precipitación. El caso del Complejo Residencial Museo Chico PH ejemplifica esta problemática, donde un talud en relleno artificial amenaza estructuras esenciales, evidenciando la urgencia de soluciones técnicas.

Este estudio aborda la estabilización del talud mediante un enfoque integral que combina análisis de laboratorio, modelaciones numéricas (SLIDE) y criterios normativos (NSR-10, ACI 318). Se identificaron factores clave como la ausencia de drenaje, la carga adicional en la corona y las propiedades mecánicas del suelo, que condicionan su comportamiento. La solución propuesta un muro de concreto armado con subdrenes no solo cumple con un Factor de Seguridad establecido por la norma, sino que también ofrece ventajas en durabilidad y adaptabilidad sísmica, aspectos prioritarios en un contexto urbano como Bogotá.

La relevancia de esta investigación radica en su aporte a la gestión de riesgos geotécnicos en entornos con suelos antrópicos.

, los resultados subrayan la necesidad de intervenciones técnicas preventivas, evitando costosos daños estructurales y garantizando la seguridad pública en áreas densamente pobladas.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Complejo Residencial Museo Chico PH, ubicado en el barrio Chico en la ciudad de Bogotá, presenta un problema de inestabilidad en un talud que amenaza la integridad del cuarto de la planta eléctrica y el cuarto de bombas, generando un riesgo potencial para los residentes.

Las causas principales de esta inestabilidad incluyen:

1. **Tipo de suelo antropogénico:** Su origen artificial le confiere baja cohesión y heterogeneidad, aumentando su susceptibilidad a deslizamientos.
2. **Pendiente pronunciada:** La diferencia de altura de aproximadamente 5 m incrementa las fuerzas impulsoras del movimiento.
3. **Falta de drenaje adecuado:** La absorción de agua aumenta la masa del suelo, reduciendo su resistencia y favoreciendo la inestabilidad.
4. **Carga adicional en la corona:** El cerramiento del conjunto residencial ejerce peso adicional, agravando el problema.

Ante esta situación, surge la necesidad de evaluar alternativas técnicas para estabilizar el talud y mitigar el riesgo. Por lo tanto, esta investigación busca diagnosticar las causas del problema, analizar posibles soluciones y recomendar la más viable técnica y económicamente.

## JUSTIFICACION

La inestabilidad del talud en el Complejo Residencial Museo Chico PH representa un riesgo geotécnico latente que amenaza no solo la integridad estructural de las instalaciones de los cuartos de máquinas y de bombas, sino también la seguridad de los residentes. Este problema, común en zonas urbanas de Bogotá con suelos de relleno antrópico, requiere una solución técnica fundamentada en estudios especializados y modelación geotécnica, ya que abordarlo de manera empírica o con medidas temporales podría agravar la situación a mediano plazo.

Desde el punto de vista técnico, este trabajo se justifica por tres razones principales:

1. **Diagnóstico basado en evidencia de los suelos:** Los estudios de suelos realizados identificaron parámetros críticos como baja cohesión, alta permeabilidad y ausencia de sistemas de drenaje, factores que explican la inestabilidad actual. Estos hallazgos proporcionan una base cuantitativa para diseñar soluciones específicas, no genéricas.
2. **Prevención de riesgos con enfoque sostenible:** La solución propuesta no solo busca contener el talud, sino también mitigar problemas futuros. Al incorporar criterios de la NSR-10 se garantiza una intervención duradera, reduciendo costos por reparaciones emergentes o potenciales colapsos.
3. **Aporte al conocimiento geotécnico local:** Los resultados de este estudio ofrecen un precedente valioso para proyectos similares en Bogotá, donde los suelos antrópicos son frecuentes, pero poco documentados en la literatura técnica. La metodología empleada desde el análisis de estabilidad hasta el diseño estructural puede replicarse en otros contextos con condiciones geotécnicas análogas.

Además, la investigación trasciende lo técnico al considerar el impacto social:

- **Seguridad para la comunidad:** Una falla del talud podría afectar a decenas de familias, interrumpir servicios esenciales y generar gastos imprevistos para los residentes.

- **Optimización de recursos:** Al comparar alternativas, se seleccionó la opción más eficiente en costo-beneficio, evitando sobre diseños costosos o soluciones insuficientes.

En resumen, este trabajo no solo resuelve un problema específico, sino que también establece un marco de referencia para la estabilización de taludes en suelos antrópicos, combinando rigor técnico, viabilidad económica y responsabilidad social. Su relevancia se extiende a ingenieros, constructores y entidades de gestión de riesgos en Bogotá y otras ciudades con desafíos similares.

## ANTECEDENTES

La problemática de inestabilidad en taludes con suelos antrópicos en Bogotá ha sido documentada en diversos estudios técnicos y proyectos de ingeniería, evidenciando la necesidad de soluciones especializadas para este tipo de suelos. A continuación, se presentan los antecedentes más relevantes que contextualizan la investigación:

### 1. Estudios del IGAC y casos en Bogotá:

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2018) identificó que los rellenos antrópicos en Bogotá presentan alta heterogeneidad, baja densidad y propiedades mecánicas variables, lo que los hace propensos a procesos de asentamiento diferencial y fallas por erosión interna. Un caso emblemático es el del barrio La Perseverancia, donde un talud en suelo antrópico requirió la implementación de muros de gaviones y sistemas de subdrenaje para garantizar su estabilidad (Universidad Nacional, 2020). Estos proyectos resaltan la importancia de caracterizar adecuadamente el suelo antes de diseñar soluciones de contención.

### 2. Normativa y guías técnicas:

La Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10, Título H) establece los requisitos mínimos para el diseño de estructuras de contención en suelos problemáticos,

exigiendo un Factor de Seguridad (FS)  $\geq 1.5$  para taludes permanentes. Adicionalmente, el Servicio Geológico Colombiano (2018) publicó guías para la estabilización de taludes en zonas urbanas, enfatizando en el control de aguas subterráneas y el uso de técnicas como anclajes al terreno o muros de concreto armado en casos de alta inestabilidad.

### 3. Investigaciones

**académicas:**

Un estudio realizado por la Universidad de los Andes (2021) analizó técnicas de mejoramiento de suelos antrópicos en Bogotá, demostrando que la inyección de cal o cemento puede incrementar la cohesión en estos materiales. Sin embargo, el mismo estudio señala que, para taludes con alturas superiores a 4 m y presencia de agua subterránea, las soluciones estructurales combinadas con drenajes son más efectivas. Estos hallazgos coinciden con las observaciones realizadas en el Complejo Museo Chico PH, donde la altura del talud (5 m) y la ausencia de drenaje agravan la inestabilidad.

### 4. Experiencias

**internacionales:**

La Federal Highway Administration (FHWA, 2009) recomienda el uso de muros de contención anclados en suelos con baja cohesión, especialmente en zonas urbanas donde el espacio es limitado. Esta técnica ha sido aplicada con éxito en ciudades como Medellín (Proyecto Tramo 2 de la Avenida 80), donde se logró estabilizar un talud en suelo antropico con una combinación de anclajes y geomallas (INGEOMINAS, 2015).

A pesar de los avances en la materia, persiste un vacío en la documentación de casos específicos donde se combine modelación geotécnica avanzada con diseños adaptados a las condiciones únicas de Bogotá (alta precipitación, actividad sísmica moderada y presión urbana). Este trabajo busca llenar ese vacío al proponer una solución técnica y normativamente robusta para el Complejo Museo Chico PH, que pueda servir como referencia para futuros proyectos en la ciudad.

## **OBJETIVO**

### **Objetivo General**

Generar alternativas de solución para la estabilización en suelos de rellenos antrópicos a partir de modelaciones geotécnicas tomando como caso de estudio Edificio Complejo Museo Chico PH en la ciudad de Bogotá.

### **Objetivos Específicos**

- Identificar el perfil geotécnico de la zona mediante análisis de la información relacionada en los estudios de suelos.
- Definir los parámetros geomecánicos a partir de los estudios de suelos realizados en la zona de estudio.
- Evaluar el comportamiento del suelo a partir de las propiedades del suelo y la pendiente del talud resultado de las modelaciones en la zona de estudio.

## MARCO TEORICO

Los taludes son estructuras naturales o artificiales que se forman por la erosión del suelo o la roca. Cuando se presentan inestabilidades en los taludes, pueden causar daños a la propiedad y a las personas que viven o trabajan cerca de ellos.

El talud del Complejo Residencial Museo Chico PH, ubicado en el barrio Chico de Bogotá, muestra signos de inestabilidad, lo cual está dañando los cuartos tanto de la planta eléctrica como el cuarto de bombas. Esta condición genera un riesgo potencial para las personas que viven en el lugar.

### MECANISMOS DE ESTABILIZACION

La estabilización de taludes es fundamental en geotecnia para prevenir deslizamientos y garantizar la seguridad de estructuras adyacentes. En el caso del Complejo Residencial Museo Chico PH, donde el talud presenta inestabilidad debido a suelos antropogénicos, alta pendiente y falta de drenaje, es necesario evaluar los siguientes mecanismos de estabilización, sustentados en literatura técnica y normativa.

#### ***1. Refuerzo Estructural con Muros de Contención***

Los muros de contención son estructuras rígidas o flexibles diseñadas para resistir el empuje del suelo. Entre los tipos más utilizados en suelos inestables se encuentran:

**a) Muros en Gravedad (Hormigón o Gaviones):** son estructuras de contención rígidas que resisten el empuje de tierras principalmente mediante su propio peso. Pueden ser construidos en hormigón simple (no reforzado) o gaviones (cajas de malla metálica rellenas de roca). Su diseño se basa en garantizar estabilidad frente al volcamiento, deslizamiento y capacidad portante del suelo de cimentación.

Los muros de gravedad dependen de su masa para resistir las presiones laterales del suelo. Pueden ser de concreto simple o mampostería, y su perfil suele ser trapezoidal para mejorar la estabilidad (DAS, 2019).

Estos muros son adecuados para alturas moderadas (hasta ~6 m) y requieren una base amplia para evitar el volcamiento. Los de hormigón son rígidos, mientras que los gaviones permiten drenaje y adaptación a asentamientos (Coduto, 2001)

**b) Muros de Contención Anclados:** son estructuras de soporte diseñadas para estabilizar taludes o excavaciones mediante la combinación de un elemento de contención (pantalla de hormigón, tablestacados o muros de paneles prefabricados) y un sistema de anclajes activos o pasivos insertados en el terreno. Estos anclajes, compuestos por cables o barras de acero inyectados con lechada de cemento, transfieren las cargas de tracción generadas por el empuje del suelo a estratos más profundos y competentes, mejorando así la estabilidad global del conjunto.

Los anclajes activos (pretensados) son esenciales en suelos blandos, ya que imponen una carga de compresión previa al terreno, mitigando deformaciones posteriores (Tomlinson, 2001)

## ***2. Sistemas de Drenaje para Reducir Presión de Poros***

El agua es uno de los principales factores desestabilizadores en taludes. Su control se logra mediante:

**a) Zanjas de Drenaje y Subdrenes:** Los sistemas de drenaje subterráneo, como zanjas de drenaje y subdrenes, son estructuras diseñadas para controlar el nivel freático y reducir presiones de poro en macizos de suelo, evitando la saturación y pérdida de resistencia al corte. Su implementación es clave en la estabilización de taludes, pavimentos y estructuras de contención.

Excavaciones longitudinales rellenas con material granular (grava limpia) y/o tuberías perforadas, que interceptan flujos subsuperficiales y los redireccionan hacia puntos de descarga controlada (DAS, 2019)

**b) Geo compuestos Drenantes:** son materiales sintéticos laminados, compuestos por la combinación de geo redes (estructuras alveolares de polietileno de alta densidad) y geotextiles no tejidos, diseñados para proporcionar drenaje plano (en el plano longitudinal y transversal) en aplicaciones para los suelos. Su función principal es sustituir o complementar sistemas tradicionales de drenaje (como gravas o subdrenes), ofreciendo alta capacidad de transmisión de flujo y retención de partículas finas.

### ***3. Mejoramiento del Suelo (Técnicas de Estabilización)***

**a) Inyección de Cemento o Cal:** es una técnica de mejora de suelos que consiste en la introducción, bajo presión, de lechadas compuestas por cemento Portland, cal hidratada o mezclas de ambos, en matrices de suelo o roca fracturada. Este proceso busca aumentar la resistencia al corte, reducir la permeabilidad y estabilizar macizos térreos mediante reacciones físico-químicas (hidratación, carbonatación y cementación de partículas).

Las lechadas de cemento forman estructuras rígidas al reaccionar con el agua intersticial del suelo, generando compuestos como silicatos hidratados (C-S-H) que cementan las partículas (Mitchell & Whitman, 2001)

### ***4. Soluciones Basadas en Naturaleza (Bioingeniería)***

**a) Revegetalización con Raíces Profundas:** es una técnica de bioingeniería que utiliza especies vegetales con sistemas radiculares pivotantes o extensivos para mejorar la estabilidad de taludes, controlar la erosión y restaurar ecosistemas degradados. Estos sistemas radiculares generan un refuerzo mecánico del suelo mediante Cohesión adicional por interacción raíz-suelo (aumento de la resistencia al

corte), reducción de la presión de poro por evapotranspiración y protección superficial contra erosión hídrica y eólica.

Tabla Comparativa de Métodos			
Método	Ventajas	Limitaciones	Aplicación en el Caso de Estudio
Gaviones	Bajo costo, permite drenaje.	Altura limitada ( $\leq 6$ m).	Ideal para taludes con infiltración.
Muros anclados	Alta resistencia en espacios reducidos.	Costo elevado.	Útil si hay estructuras cercanas.
Subdrenes	Reduce presión de poros.	Requiere mantenimiento.	Necesario por alta absorción de agua.
Inyección de cal	Mejora cohesión en suelos blandos.	No aplicable a suelos granulares.	Complementario si el suelo es arcillo

*Tabla 1 Cuadro Comparativo de Métodos  
Fuente Propia*

## DISEÑO DE LA ESTABILIZACION

El diseño de la alternativa de estabilización para los suelos de rellenos antrópicos en el Edificio Complejo Museo Chico PH en Bogotá se enfoca en la implementación de un muro de contención en concreto armado. Esta solución se justifica por la necesidad de confinar lateralmente el relleno, controlar la expansión lateral del suelo, mitigar los asentamientos diferenciales y garantizar la estabilidad global del terreno adyacente a la estructura existente. La concepción del diseño se basa en los principios fundamentales de la mecánica de suelos y la ingeniería estructural, integrando los resultados de la caracterización geotécnica del sitio y las modelaciones numéricas.

### ***Diseño Geométrico y Estructural del Muro de Contención***

El diseño del muro de contención se realizará siguiendo los principios de la mecánica de suelos para la estabilidad externa y los de la ingeniería estructural para la estabilidad interna.

### **Dimensionamiento Preliminar y Estabilidad Externa**

El dimensionamiento preliminar del muro (altura de fuste, ancho de la base, longitud de la puntera y el talón) se basará en las características geotécnicas del relleno y los estratos de fundación. La estabilidad externa del muro se verificará frente a los siguientes modos de falla (Bowles, 1996):

- **Estabilidad al volteo:** Se calculará el factor de seguridad contra el volteo ( $FS_{\text{volteo}}$ ) alrededor de la punta del talón, verificando que la suma de los momentos resistentes sea superior a la suma de los momentos actuantes debidos a las presiones de tierra activas y cualquier carga externa. Se busca un  $FS \geq 1.5$

$$FS_{\text{volteo}} = \frac{\sum M_{\text{resistente}}}{\sum M_{\text{actuante}}}$$

- **Estabilidad al deslizamiento:** Se verificará la resistencia al deslizamiento en la base del muro, comparando las fuerzas resistentes por fricción y cohesión en la base con las fuerzas deslizantes horizontales. Un factor de seguridad contra el deslizamiento ( $FS_{\text{deslizamiento}}$ ) de al menos 1.5 es requerido.

$$FS_{\text{Deslizamiento}} = \frac{R_h + P_p}{\sum H}$$

donde  $R_h$  es la resistencia por fricción en la base,  $P_p$  es la presión pasiva del suelo en la puntera, y  $\sum H$  es la suma de las fuerzas horizontales actuantes.

- **Capacidad de carga del suelo de cimentación:** Se calculará la presión máxima sobre el suelo de apoyo bajo la puntera y el talón, verificando que esta no exceda la capacidad portante admisible del suelo de fundación (Terzaghi K. , 1943). Se determinará el factor de seguridad por capacidad portante ( $FS_{\text{capacidad}}$ ) de al menos 3.0.
- **Estabilidad global (circular o en cuña):** Para evaluar la estabilidad de la masa de suelo que incluye el muro y el relleno, se realizarán análisis de estabilidad de taludes mediante métodos de equilibrio límite (Fellenius, Bishop Modificado) o métodos de elementos finitos. Se buscará un

$F_{Sglobal} \geq 1.3$  para condiciones estáticas y  $F_{Sglobal} \geq 1.1$  para condiciones sísmicas (Bray & Travasarou, 2007)

### ***Cálculo de Presiones de Tierra***

La determinación de las presiones de tierra es fundamental. Se utilizarán las teorías de Rankine o Coulomb para el cálculo de las presiones activas y pasivas, considerando la inclinación del relleno, la presencia de sobrecargas y las propiedades geotécnicas del suelo (cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario). La presión activa ( $P_a$ ) se calculará utilizando el coeficiente de presión activa ( $K_a$ ), y la presión pasiva ( $P_p$ ) con el coeficiente de presión pasiva ( $K_p$ ) (Terzaghi K. , 1943). La posible presencia de agua o sobrecargas concentradas también se incluirá en el análisis.

### ***Diseño Estructural del Concreto Armado***

Una vez que el muro ha sido dimensionado preliminarmente y su estabilidad externa verificada, se procederá al diseño estructural de sus componentes (fuste, puntera y talón) como voladizos. El diseño se realizará de acuerdo con la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR-10) o los estándares del American Concrete Institute (ACI 318).

- **Cargas:** Se considerarán las presiones de tierra activas, pasivas, sobrecargas, el peso propio del muro y del suelo sobre el talón, y las fuerzas sísmicas si aplica, siguiendo los requisitos de la NSR-10 (AIS, 2010).
- **Momentos flectores y fuerzas cortantes:** Se calcularán los momentos flectores y fuerzas cortantes máximos en las secciones críticas del fuste y la base, para determinar el área de acero de refuerzo necesaria y verificar la resistencia al cortante del concreto.

- **Refuerzo de acero:** Se diseñará el acero de refuerzo longitudinal y transversal para resistir los momentos y cortantes calculados, asegurando la ductilidad y resistencia de los elementos de concreto armado. Se incluirá refuerzo por temperatura y retracción según las especificaciones.
- **Juntas de construcción y de expansión:** Se especificarán juntas adecuadas para controlar agrietamientos debidos a cambios de temperatura y retracción del concreto.

### ***Drenaje y Protección del Muro***

Para garantizar el correcto funcionamiento del muro y evitar la acumulación de presiones hidrostáticas detrás de este, se diseñará un sistema de drenaje adecuado. Esto incluirá:

- **Dren francés o sistema de tuberías perforadas:** Colocado detrás del muro y conectado a una tubería de recolección para evacuar el agua (Cedergren, 1989).
- **Material de filtro granular:** Una capa de material granular (arena, grava) con las propiedades adecuadas de filtración para prevenir el arrastre de finos del suelo de relleno hacia el drenaje.
- **Geotextil:** Una capa de geotextil no tejido entre el suelo de relleno y el material de filtro para asegurar la retención de partículas finas.
- **Barrera de impermeabilización:** Una membrana impermeable en la cara trasera del muro para proteger el concreto y el acero de refuerzo de la humedad y posibles agentes agresivos del suelo.

### ***Modelación Geotécnica Numérica***

La modelación geotécnica numérica, utilizando software de elementos finitos (SLIDE), es crucial para afinar el diseño y evaluar el comportamiento del sistema suelo-muro. Estas simulaciones permitirán:

- **Distribución de presiones de tierra:** Obtener una distribución más realista de las presiones de tierra activas y pasivas, considerando la interacción suelo-estructura.

- **Análisis de sensibilidad:** Evaluar el impacto de las variaciones en las propiedades del suelo en el comportamiento del muro.
- **Verificación de la estabilidad global:** Complementar los métodos de equilibrio límite con un análisis más riguroso de la estabilidad global.

### ***Monitoreo y Control de Calidad***

Durante la construcción del muro de contención, se deberá implementar un riguroso programa de control de calidad y monitoreo. Será fundamental para asegurar que la construcción se realice conforme a los planos y especificaciones de diseño, y para verificar el comportamiento del muro y del terreno durante y después de la ejecución. Las actividades incluirán:

- **Control de la compactación del relleno:** Verificación de la densidad y el contenido de humedad del relleno compactado detrás del muro, utilizando ensayos como el proctor y la densidad de campo. (INV E-142-13)
- **Inspección del acero de refuerzo:** Verificación de la cantidad, diámetro, espaciamiento y recubrimiento del acero de refuerzo antes del vaciado del concreto.
- **Control de calidad del concreto:** Ensayos de resistencia a la compresión del concreto (cilindros, según NTC454) y control del slump (NTC396).
- **Monitoreo topográfico:** Seguimiento de posibles desplazamientos horizontales y verticales del muro mediante estaciones totales o prismas reflectores.
- **Instalación de instrumentación geotécnica:** Colocación de inclinómetros para medir deformaciones laterales, celdas de presión de tierra para medir presiones detrás del muro y piezómetros para monitorear el nivel freático.

## METODOLOGIA

### FASE 1. ESTUDIO PRELIMINAR DE CAMPO

#### 1.Revision Datos Preliminares

##### 1.1 Localización General

El área de estudio de la presente investigación se localiza en la ciudad de Bogotá, D.C., específicamente en el barrio Chico, perteneciente a la localidad de Chapinero. Este sector se caracteriza por su valor histórico, cultural y arquitectónico, albergando uno de sus referentes más destacados: el Complejo Museo Chico PH. Geográficamente, el barrio Chico se sitúa en el nororiente de la ciudad, entre las calles 92 y 94 y las carreras 7 y 15, aproximadamente, en una zona de alta influencia socioeconómica y dinámica comercial. Este se encuentra a una altura de 2600 metros sobre el nivel del mar, y tiene una temperatura ambiente promedio de 18°C, sus coordenadas globales son 4°40'26"N 74°02'32"W.



Ilustración 1. Localización general de la zona de estudio, Mapas localidad de chapinero, ciudad de Bogotá, Colombia

Fuente: Google Earth

### 1.2 Localización Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada sobre la carrera 7 con calle 92 costado oriental en el barrio Chico de la localidad de Chapinero, las coordenadas son  $4^{\circ}40'26''N$  en latitud norte y  $74^{\circ}02'32''W$  en longitud oeste.

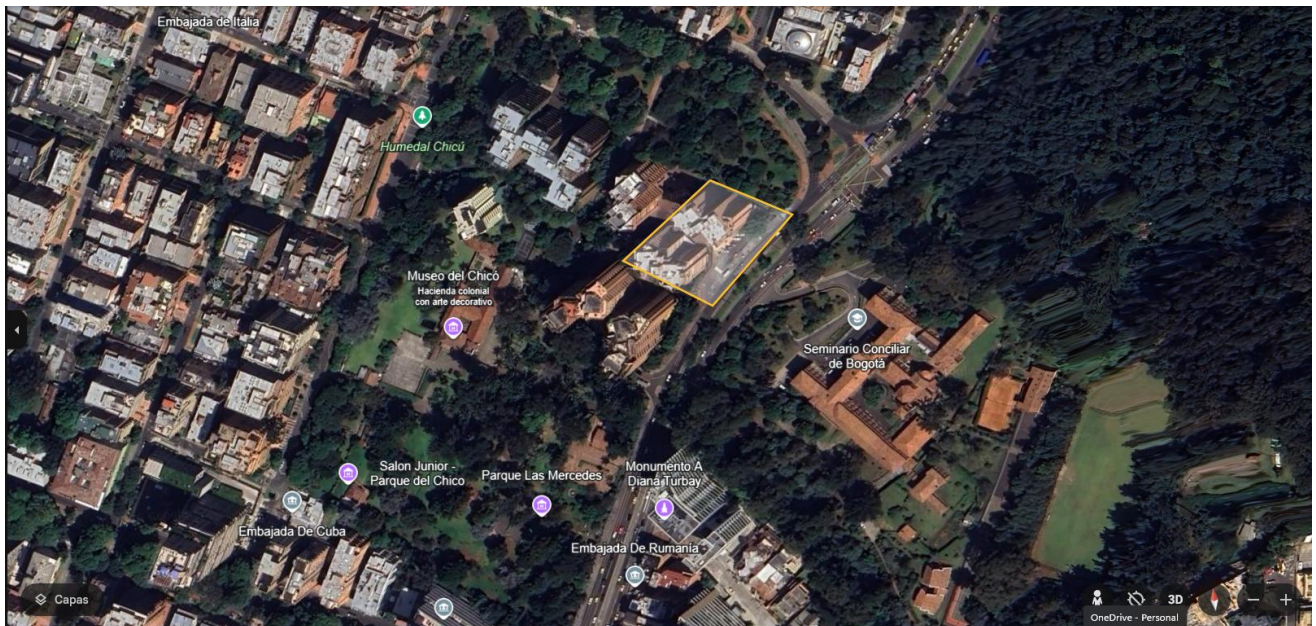


Ilustración 2. Localización de la zona de estudio

Fuente: Google Earth

### 1.3 Visita de campo y Reconocimiento

Se llevó a cabo una inspección técnica in situ en el área de estudio, en la cual se implementó un registro fotográfico sistemático para documentar las condiciones del terreno. Adicionalmente, se realizó un análisis detallado de las manifestaciones patológicas presentes, con el fin de identificar posibles causas y efectos. Es relevante mencionar que se cuenta con dos estudios de suelos previos del sitio en cuestión, los cuales servirán como base para la recopilación de datos técnicos necesarios. Esta información será

fundamental para sustentar las evaluaciones posteriores y el desarrollo de las conclusiones correspondientes.



*Ilustración 3. Reconocimiento de campo*

*Fuente: Propia*



*Ilustración 4. Reconocimiento de campo*

*Fuente: Propia*



*Ilustración 5. Reconocimiento de campos*

*Fuente: Propia*



*Ilustración 6. Reconocimiento de campo*

*Fuente: Propia*



*Ilustración 7. Reconocimiento de campo*

*Fuente: Propia*

## **FASE 2: REVISION ESTADO ACTUAL**

De acuerdo con los resultados obtenidos de los estudios geotécnicos realizados, se evidencia a partir de los ensayos de laboratorio que los valores de los límites líquido (LL) y plástico (LP) son notablemente bajos. Incluso, en una de las perforaciones analizadas, estos parámetros no fueron detectables, lo cual puede indicar la presencia de un material granular no plástico o de baja plasticidad. A continuación, se presentan las tablas de datos de laboratorio que respaldan dichos resultados:

		<b>PERFILES ESTRATIGRÁFICO</b>							Código	f-20		
		<b>APIQUES Y/O SONDEOS</b>							Versión	1		
									Fecha:	22/02/2018		
Cliente:		COMPLEJO MUSEO CHICO				Fecha de ensayo:				12/08/2023		
Localización		Remodelación portería Cra 7 CMC		Apique No.		Sondeo No.			1			
PROFUNDIDAD (m)	HERRAMIENTA	MUESTRA	DESCRIPCION	CLASIFICACION U.S.C.S.	HUMEDAD (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	IP (%)	PASA 200 (%)	SPT 6" 6" 6"		
1,30-4,30		1	Grava arcillosa amarilla, humedad media, consistencia firme.	GC	15,8	23	12	11	29,5	1,30-4,30		
										2	2	5
4,30-6,00		2	Grava bien gradada con arena limosa con residuos de construcción, humedad media, consistencia firme.	GW-GW	12,9	NL	NP		11,1	4,30-6,00		
										4	4	5

Ilustración 8 perfil estratigráfico sondeo 1

		<b>PERFILES ESTRATIGRÁFICO</b>							Código	f-20		
		<b>APIQUES Y/O SONDEOS</b>							Versión	1		
									Fecha:	22/02/2018		
Cliente:		COMPLEJO MUSEO CHICO				Fecha de ensayo:				12/08/2023		
Localización		Remodelación portería Cra 7 CMC		Apique No.		Sondeo No.			2			
PROFUNDIDAD (m)	HERRAMIENTA	MUESTRA	DESCRIPCION	CLASIFICACION U.S.C.S.	HUMEDAD (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	IP (%)	PASA 200 (%)	SPT 6" 6" 6"		
1,00-4,50		1	Arcilla de plasticidad alta negra, humedad baja, consistencia media.	CH	48,1	63	23	40	94,2	1,00-4,50		
										1	1	3
4,50-6,00		2	Grava arcillosa amarilla, humedad media, consistencia firme.	GC	15,9	24	10	14	23,4	4,50-6,00		
										1	1	1
6,00-15,00		3	Arena arcillosa amarilla, humedad media, consistencia firme.	GC	20,8	29	14	15	37,7	6,00-15,00		
										2	2	5

Ilustración 9 perfil estratigráfico sondeo 2

		<b>PERFILES ESTRATIGRÁFICO</b>				Código	f-20					
		<b>APIQUES Y/O SONDEOS</b>				Versión	1					
						Fecha:	22/02/2018					
Cliente:		COMPLEJO MUSEO CHICO			Fecha de ensayo:		12/08/2023					
Localización		Remodelación portería Cra7 CMC		Apique No.		Sondeo No.		3				
PROFUNDIDAD (m)	HERRAMIENTA	MUESTRA	DESCRIPCION	CLASIFICACION U.S.C.S.	HUMEDAD (%)	LIMITE LIQUIDO (%)	LIMITE PLASTICO (%)	IP (%)	PASA 200 (%)	SPT 6" 6" 6"		
1,00-2,10		1	Arena limosa bien gradada rojiza, humedad baja. Consistencia firme.	1	17	NL	NP		10,9			

Ilustración 10 Perfil estratigráfico sondeo 3

De acuerdo con los resultados de las siguientes tablas (Tablas 3 y 4) y en concordancia con lo establecido por (Terzaghi, 1967) en su obra *Soil Mechanics in Engineering Practice*, se puede determinar que los suelos analizados presentan baja cohesión ( $c < 25$  kPa), característica típica de materiales con bajo contenido de arcilla ( $< 15\%$ ), lo cual reduce significativamente su resistencia al corte no drenado (Sowers, 1979). Esta condición geotécnica afecta directamente la estabilidad de taludes y excavaciones, incrementando el riesgo de fallas por deslizamiento rotacional (Duncan & Wright, 2005).

Complementariamente, los valores de permeabilidad ( $k > 10^{-3}$  cm/s), calculados mediante la metodología propuesta por Hazen (1911) para suelos granulares, confirman la susceptibilidad a procesos de erosión interna, particularmente en condiciones de flujo turbulento (Fell et al., 2003). Estos parámetros han sido fundamentales para la elaboración de los perfiles estratigráficos presentados en las Tablas 3 y 4, los cuales siguen los lineamientos de la ASTM D2487-17 para descripción de suelos.

Con base en estos datos, se procederá a realizar la modelación numérica mediante el software SLIDE v9.0, utilizando el método de Morh Coulomb para evaluar: (1) el comportamiento actual del macizo

suelo-roca, y (2) los factores de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudo-estáticas, siguiendo los criterios establecidos en la NSR-10 para zonas de ladera (Título H)


PERFIL ESTATIGRAFICO PRIMER ESTUDIO						
Profundidad	Profundidad		SONDEO 1 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO 2 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO 3 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO PROMEDIO
	DE	A				
	0		arena arcillosa con algo de grava fina angular café clara	arena algo arcillosa con grava fina angular café clara	arena algo arcillosa con grava fina angular café clara	
		2.45				
		7	arena arcillosa con rastros de grava fina angular gris con amarillo claro y residuos de construccion.			
		11				

Tabla 2. Perfil estratigráfico primer estudio

Esta tabla fue de autoría propia, la cual se creó basada en los datos encontrados en el primer estudio de suelos que se obtuvo.


PERFIL ESTATIGRAFICO SEGUNDO ESTUDIO						
Profundidad	Profundidad		SONDEO 1 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO 2 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO 3 DESCRIPCION VISUAL	SONDEO PROMEDIO
	DE	A				
	0		Grava arcillosa amarilla, humedad media consistencia firme	Arcilla de plasticidad alta negra, humedad baja, consistencia	Arena limosa bien gradada rojiza, humedad baja,	Grava arcillosa amarilla, humedad media,
		4.3				
		4.4	limosa con residuos de construccion, humedad media, consistencia firme	Grava arcillosa amarilla, humedad media, consistencia firme		
		6				
	6		Arena arcillosa amarilla, humedad media, consistencia firme.		Grava bien gradada con arena limosa con residuos de construccion, humedad media, consistencia media (relleno seleccionado suelto)	
	15					

Tabla 3. Perfil estratigráfico primer segundo estudio

Esta tabla fue de autoría propia, la cual se creó basada en los datos encontrados en el segundo estudio de suelos que se obtuvo

Una vez obtenidos estos perfiles, se extrajeron de los estudios de suelo las características geomecánicas del perfil estratigráfico, las cuales se organizaron en una tabla. Posteriormente, estos datos se utilizaron para realizar las modelaciones.

Características Geomecánicas del Subsuelo															
Profundidad (m)		DESCRIPCION VISUAL	u.s.c.s	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Wn %	WL %	WP%	Qu (Kg/cm <sup>2</sup> )	Cu (kPa)	SPT		Nc	E (Kpa)	Kv (kN/m <sup>3</sup> )	Kh (kN/m <sup>3</sup> )
DE	A									Cu (Kpa)	$\phi_v$ (°)				
0.10		Grava arcillosa amarilla, humedad media, estado suelto.	GC	20.3	17.5	25.3	12.0	-	-	-	28	5	9 816	7 790	4 674
	4.30														
6.00	15	Grava bien gradada con arena limosa con residuos de construcción, humedad media, estado suelto.	GW-GM	17.1	12.9	NL	NP	-	-	-	28	6	10 575	8 393	5 036

Tabla 4. Características geomecánicas del subsuelo

Tabla autoría Ingeniero Alexander Padilla – estudio de suelos Complejo Museo Chico

Una vez recopilada la información de los estudios de suelos, se procedió a compilar los datos de los perfiles estratigráficos para establecer las capas geológicas que serían representadas en la modelación de SLIDE. La primera capa, identificada en campo como una zona de relleno antrópico, se caracterizó por la presencia de gravas arcillosas, arcillas plásticas negras, arcillas rojas y amarillas en estado suelto, así como residuos de construcción. Para efectos de la modelación, esta capa fue denominada "basuras". La segunda capa se compuso de grava bien gradada con arenas limosas de tonalidades amarillas y rojizas, presentando consistencias firmes, y fue designada como "arena con gravas" en el modelo .

### Modelación 1 "Condición Natural del Terreno"

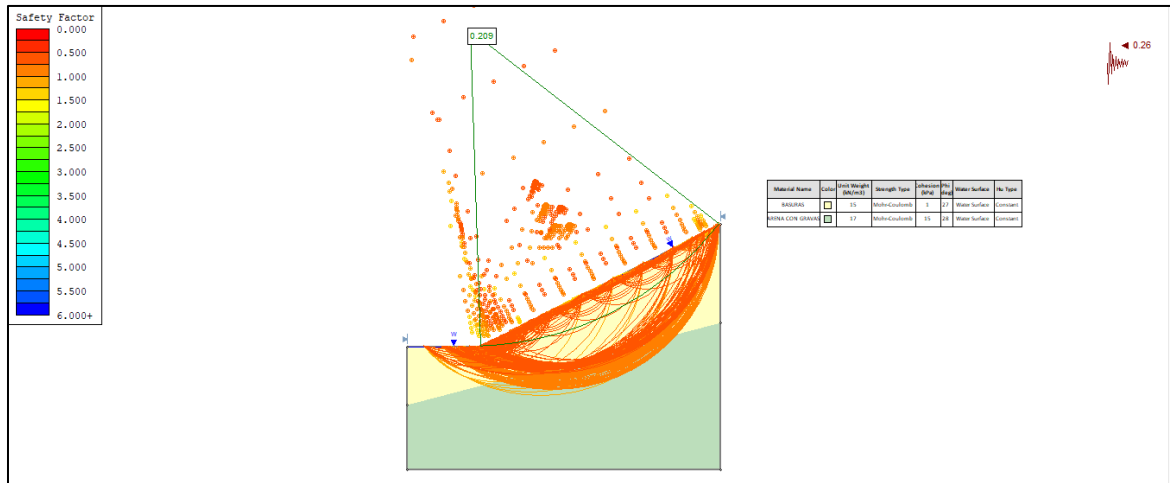


Ilustración 11. Modelación condición natural del terreno complejo museo chico

Fuente: Propia

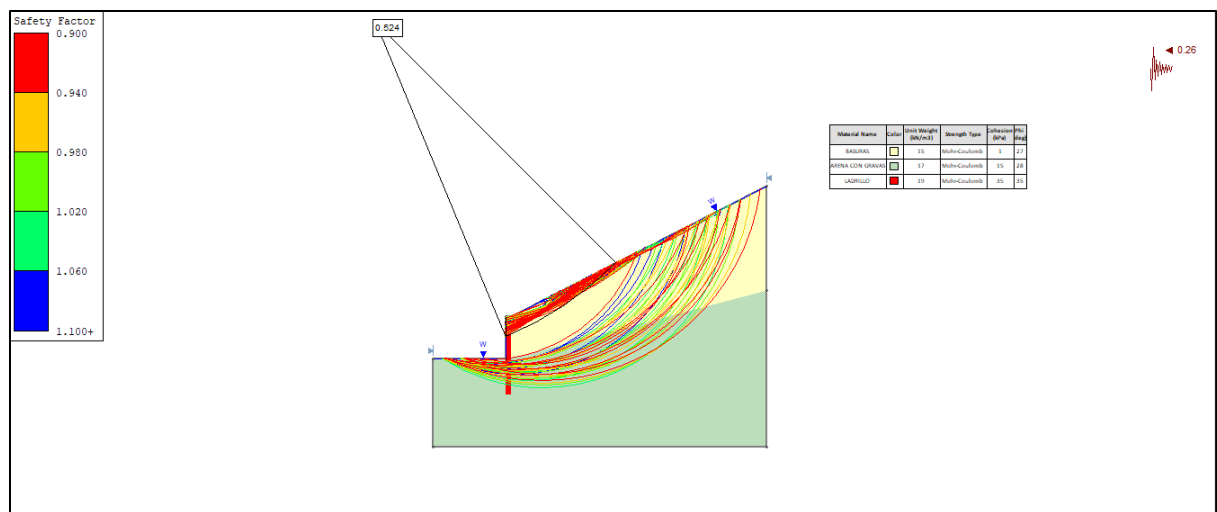
Los resultados de la modelación numérica revelan factores de seguridad (FS) significativamente inferiores a los valores mínimos establecidos en la normativa NSR-10 (Título H, tabla H.6.9-1), los cuales exigen  $FS \geq 1.5$  para condiciones estáticas y  $FS \geq 1.2$  para condiciones pseudo estáticas. Particularmente, se obtuvieron valores de  $FS < 1.0$ , lo que confirma la inestabilidad crítica del talud analizado.

Esta condición concuerda con los postulados de Cruden & Varnes (1996) sobre movimientos de masa, donde señalan que cuando  $FS < 1$ , la masa de suelo tiende a moverse por acción gravitacional, incluso sin presencia de precipitaciones o sollicitaciones externas. Adicionalmente, como lo demuestran Duncan & Wright (2005) mediante análisis de retroceso (back-analysis), estos valores subcríticos son característicos de taludes con:

1. Baja cohesión efectiva ( $c' = 0$  kPa)
2. Ángulos de fricción interna reducidos ( $\phi' < 28^\circ$ )
3. Presencia de niveles freáticos superficiales

La inspección directa del sitio reveló que las características del movimiento son claras y respalda esta situación. Se observaron grietas de tensión y escarpes activos, características de los procesos de reptación (creep), tal como los describe Hungr et al. (2014). Estos hallazgos hacen imperativo que se implementen medidas de estabilización de inmediato, basándose en los criterios establecidos en la Guía de Taludes del Servicio Geológico Colombiano (2018). Ahora se representa la situación actual en campo, que incluye un muro de contención de mampostería estructural.

### **Modelación 2 “Condición Actual del Terreno”**



*Ilustración 12. Modelación de la condición actual del terreno con muro en ladrillo*

*Fuente: Propia*

Los resultados del análisis de estabilidad demuestran que, a pesar de la presencia del muro de contención en mampostería, el factor de seguridad (FS) obtenido sigue siendo inferior a los valores mínimos exigidos por la NSR-10 (Título H, tabla H.6.9-1), que establece  $FS \geq 1.5$  para condiciones estáticas de larga duración que serían mayores de 6 meses y  $FS \geq 1.3$  en situaciones temporal o corta duración siendo menor a 6 meses. Esta condición crítica ( $FS < 1.0$ ) evidencia que la estructura actual no cumple con su función de contención efectiva ya que según la norma este debería estar mayor a  $FS \geq 1.5$  teniendo en cuenta que

este muro está construido desde la época de inauguración del complejo y cumple como una estructura a largo tiempo; y al este permitir la movilización progresiva del talud, coincide con los estudios de Anderson & Townsend (2001) sobre fallas en muros de mampostería sometidos a empujes superiores a su capacidad resistente.

Además, según los criterios de Bowles (1996) para el diseño de estructuras de contención, los muros en mampostería convencional presentan limitaciones significativas en su capacidad para resistir empujes activos en suelos con baja cohesión ( $c' < 15$  kPa), como es el caso analizado. Esto explica los daños observados en el talud, incluyendo deformaciones diferenciales y grietas de tensión, que han puesto en riesgo las estructuras adyacentes, particularmente los cuartos de bombas y la planta eléctrica, tal como lo describe Abramson et al. (2002) en su análisis de riesgos geotécnicos en infraestructura crítica.

Dada esta situación, se hace necesario analizar y evaluar un sistema de contención bajo los lineamientos de la norma que, de una solución definitiva, considerando alternativas como:

1. Muros en concreto armado con cimentación profunda
2. Refuerzo con anclajes al terreno (según metodología de FHWA, 2009)
3. Sistemas de drenaje forzado para reducir presiones de poros (principios de Terzaghi & Peck, 1967).

Estas medidas mitigarían el riesgo de falla y garantizarían la estabilidad a largo plazo, protegiendo las instalaciones que se están viendo afectadas.

### **FASE 3: ALTERNATIVA DE SOLUCION PROPUESTA.**

Una vez identificadas las causas del problema y evaluadas las condiciones geotécnicas críticas, se procede a plantear una solución de contención que cumpla con los siguientes criterios de diseño:

1. Estabilidad a largo plazo, conforme a los requisitos de la NSR-10 (Título H.6) para estructuras permanentes.

2. Mínimo impacto visual, siguiendo los lineamientos de integración paisajística propuestos por Elias et al. (2001) en "*Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*".
3. Bajo mantenimiento, reduciendo riesgos de deterioro por factores ambientales, tal como lo recomienda el Manual de Diseño Geotécnico del ASCE (2020).

La solución planteada se centra en la implementación de un muro de contención de concreto armado, diseñado bajo las directrices del ACI 318-19 para estructuras de hormigón. Aunque esta opción implica una inversión inicial más alta en comparación con métodos tradicionales como los gaviones o la mampostería, investigaciones como las de Berg et al. (2009) han demostrado que, en suelos con baja cohesión ( $c' < 20$  kPa), este tipo de estructura ofrece una mayor vida útil, reduce las deformaciones diferenciales y garantiza una efectividad inmediata en la contención de taludes activos. Para validar el diseño, se llevó a cabo una tercera modelación utilizando SLIDE, donde se incluyeron los parámetros de resistencia del concreto ( $f'c = 21$  MPa, según ACI 318), la interacción suelo-estructura mediante elementos finitos, y un análisis pseudo-estático para condiciones sísmicas (NSR-10, Título A). Los resultados preliminares muestran un Factor de Seguridad (FS) superior a 1.8, lo que excede los requisitos normativos y asegura la protección de las edificaciones cercanas, como los cuartos de bomba y la planta eléctrica.

### Modelación 3 “contención con muro en concreto”

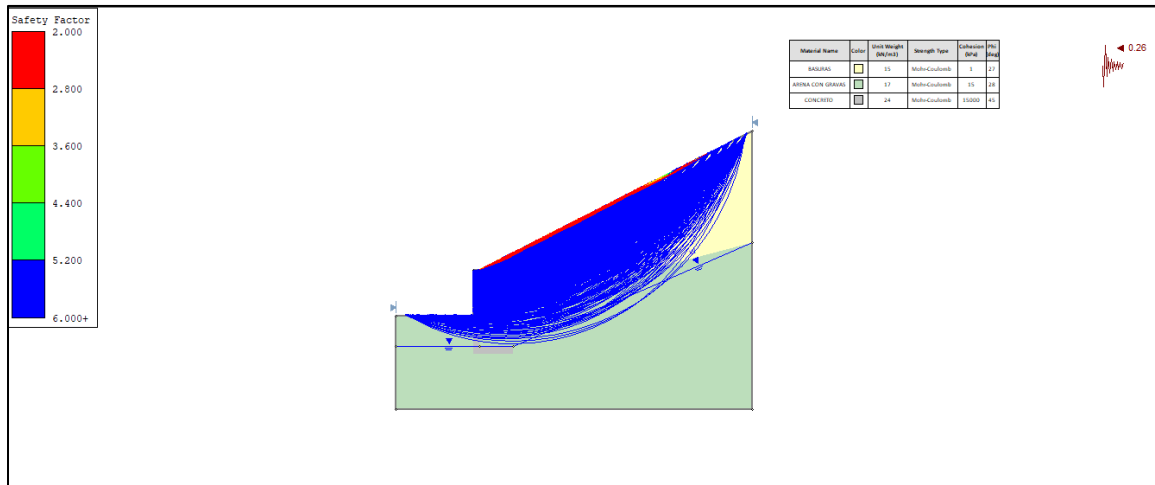


Ilustración 13. Modelación con muro de concreto

Fuente: Propia

Una vez tenidas en cuenta las tres fases y teniendo un parámetro en las tres condiciones en Slide, se elaboró la siguiente tabla para organizar los datos de manera resumida. Esto permite una mejor comprensión del análisis realizado y facilita la verificación de los parámetros evaluados.

ESCENARIO	FACTOR DE SEGURIDAD	ZONA CRITICA DEL FALLO
Talud natural	0.417 - 0.917	superficie inferior, círculo de falla profunda
muro de ladrillo	0.9 - 1.1	base del muro, deslizamiento localizado
muro de concreto	2.0 - 6.0	sin falla identificada

Tabla 5. Resumen datos de las modelaciones.

Fuente Propia

## ANALISIS Y CONCLUSIONES

A través de modelaciones geotécnicas en el software SLIDE, se generaron alternativas de estabilización para el talud de rellenos antrópicos en el Complejo Museo Chico PH, validando que la solución óptima es un muro de concreto armado con cimentación profunda y un sistema de drenaje perimetral. Esta propuesta alcanzó un Factor de Seguridad ( $FS = 2.0$ ) el cual es óptimo para los parámetros que nos da la NSR-10 en su título H, dice que en un sistema definitivo como este debe estar por encima de un factor de seguridad mínimo exigido de ( $FS \geq 1.5$ ) y mitigando eficazmente los riesgos de desplazamiento dando a largo plazo una garantía de seguridad y siendo así una alternativa a largo plazo económica.

La evaluación y modelación de las alternativas de estabilización, específicamente el muro de contención en concreto armado, demostraron su viabilidad técnica para mejorar las propiedades geotécnicas del relleno antrópico. Las modelaciones geotécnicas numéricas, realizadas con software permitieron predecir el comportamiento del suelo bajo las cargas de la estructura, confirmando una reducción significativa en el movimiento del talud. Con una intervención costo-efectiva. Este proceso valida la hipótesis de que, mediante un adecuado estudio, es posible encontrar una solución correcta al relleno problemático dando un soporte estable para la edificación.

La implementación de modelaciones geotécnicas numéricas resultó ser una herramienta indispensable para el diseño y la toma de decisiones en este proyecto. Al simular la interacción suelo-estructura y predecir el comportamiento del terreno ante las intervenciones propuestas, estas modelaciones no solo validaron la eficacia de las alternativas de estabilización, sino que también permitieron minimizar los riesgos y reducir las incertidumbres asociadas a los suelos de rellenos. La capacidad de evaluar diferentes escenarios y ajustar los parámetros de diseño de forma iterativa antes de

la ejecución real es un valor añadido crucial que contribuye a la seguridad y la economía de la obra (Dunnicliff, 1988). La modelación facilitó una comprensión más profunda de la compleja respuesta de los rellenos antrópicos bajo carga y vibración.

Se identifica y caracteriza los desafíos asociados a los suelos de rellenos antrópicos en el contexto de la ciudad de Bogotá, adicionalmente se proponen y validan alternativas de estabilización robustas y técnicamente justificadas. La metodología empleada, que integra la caracterización in situ y de laboratorio con modelaciones numéricas avanzadas, establece un precedente para futuros proyectos en condiciones geotécnicas similares. Se concluye que, un correcto estudio a los suelos y el monitoreo adecuado durante la construcción es posible lograr una estabilización efectiva y sostenible de estos suelos, garantizando una estabilidad adecuada sin generar reprocesos a largo plazo

## **RECOMENDACIONES**

Si bien el análisis inicial arroja un Factor de Seguridad (FS) de 1.8 o superior, es indispensable confirmar con rigor que el cálculo pseudo-estático para las condiciones sísmicas, según lo especificado en el Título A de la NSR-10, cumpla estrictamente con el  $FS_{global} \geq 1.1$  exigido para este tipo de escenarios. Una revisión minuciosa de este cálculo es fundamental para garantizar tanto el margen de seguridad como la solidez del diseño del muro de concreto armado frente a eventos sísmicos.

Considerando que el documento subraya la deficiencia en el drenaje y la elevada permeabilidad del suelo antrópico como causas primordiales de inestabilidad, se aconseja hacer especial énfasis en la

necesidad de un diseño e implementación meticolosos del sistema de drenaje. Este debería integrar la incorporación de drenes franceses o tuberías perforadas, acompañados de material de filtro granular y geotextiles diseñados para evitar el arrastre de finos. Resulta crucial que estos sistemas aseguren una eficiente evacuación del agua, atenuando las presiones hidrostáticas detrás del muro, un factor de riesgo clave en suelos problemáticos según la NSR-10.

Aunque el estudio contempla el monitoreo y control de calidad durante la fase constructiva, se recomienda ampliar este programa para abarcar un seguimiento a largo plazo del comportamiento del muro y del talud una vez concluida la obra. Esto implicaría la instalación de instrumentación geotécnica, como inclinómetros, celdas de presión de tierra y piezómetros, con el fin de evaluar de forma continua las deformaciones laterales, las presiones ejercidas y las variaciones del nivel freático. Los datos recabados serán vitales para convalidar el desempeño del diseño y permitirán intervenciones proactivas ante cualquier anomalía, afianzando la seguridad estructural a lo largo del tiempo, en concordancia con los principios de gestión de riesgos de la NSR-10.

Dada la naturaleza particular de los suelos de relleno antrópico y su propensión a procesos de erosión interna y asentamientos, se sugiere incorporar un plan de mantenimiento preventivo para el muro y su sistema de drenaje. Este plan debería detallar claramente la periodicidad de las inspecciones, la programación para la limpieza de los drenajes y las posibles intervenciones necesarias para garantizar la vida útil y el funcionamiento óptimo de la solución planteada.

**Bibliografía**

- Bowles, J. (1996). *Foundation Analysis and Design (5th ed.)*. McGraw-Hill.
- Bray, J., & Travasarou, T. (2007). *Simplified Procedure for Estimating Seismic Slope*. © ASCE.
- Coduto, D. (2001). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Das, B. M. (2015). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning.
- DAS, B. M. (2019). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage. CENGAGE LEARNING.
- IGAC. (2018). *Estudio de Suelos Antropogénicos en Bogotá*. BOGOTA: IGAC.
- J.MICHAEL DUNCAN, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. WILEY.
- Mitchell, J., & Whitman, R. (2001). *Fundamentals of Soil Behavior*.
- NSR-10 . (2010). *NORMA SISMO RESISTENTE 10*. BOGOTA.
- Terzaghi, K. &. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Tomlinson, M. (2001). *Foundation Design and Construction*.

### Webgrafía

- Avila Alvarez, G. (2011). Hundimiento en la Sabana de Bogotá: Diagnóstico y Propuestas de Manejo. Hundimiento en la Sabana de Bogotá: Diagnóstico y Propuestas de Manejo. Bogota, Bogota, Colombia: Publicaciones Universidad Nacional de Colombia y el Fondo Financiero de la Paz (Fopade).
- Bravo Ossco, P. (2020). ANALISIS ESTRATEGICO Y EVALUACION, "ESTABILIDAD DE TALUDESDEL CCACCAÑAN" DISTRITO TAMBOBAMBA. PROVINCIA DE COTABAMBAS- REGION APURIMAC PERIODO 2019. ANALISIS ESTRATEGICO Y EVALUACION, "ESTABILIDAD DE TALUDESDEL CCACCAÑAN" DISTRITO TAMBOBAMBA. PROVINCIA DE COTABAMBAS- REGION APURIMAC PERIODO 2019. CUSCO, PERU.
- Cardenas, M. F., & Suarez, A. (2018). Análisis de la gestión de residuos sólidos en Bogotá, Colombia. Revista de Investigación y Desarrollo.
- Cubillos, J. M., & Garcia, J. F. (2015). Suelos de Bogota: Características Geotecnicas y Desafios Para la Construcción. Revista Ingeniería y Territorio, 25(2).
- Cubillos, J. M., Garcia, J. F., & Gonzalez, R. A. (2009). Geología y geotécnica de la Sabana de Bogotá, Colombia. Revista Ingeniería y Territorio, 19(2).
- Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público (DADEP). (2022). Informe de gestión. Bogotá: DADEP. Bogota.
- Duván Andrés Bonilla Ávila y Fabian Humberto Rodríguez Ramírez. (2021). DIAGNÓSTICO Y PREDISEÑO DE LA ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD PERTENECIENTE AL ESCENARIO DEPORTIVO DEL BARRIO NACIONES UNIDAS DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR-BOGOTÁ D.C. DIAGNÓSTICO Y PREDISEÑO DE LA ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD PERTENECIENTE AL ESCENARIO DEPORTIVO DEL

BARRIO NACIONES UNIDAS DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR-BOGOTÁ D.C. BOGOTÁ D.C,  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA.

Gomez, A. S. (2015). Estabilización de taludes en zonas urbanas. Ingeniería civil Vol 22, 1-9.

Lopez, F. C., Rodriguez, J. A., & Cubillos, J. M. (2012). Caracterización Geotécnica de los Suelos de Bogotá.  
Revista Ingeniería de Construcción, 21(2).

López, F. P. (2019). Evaluación de la estabilidad de taludes en la ciudad de Bogotá. Ingeniería y Desarrollo,  
1-12.

PATÍÑO GALLEGO, H. (2009). Características de los suelos del centro y sur de Bogotá. BOGOTÁ: Servicio  
Geológico Colombiano.

Rodriguez, C. R. (2019). Caracterización de los rellenos sanitarios de Bogotá: una aproximación a la gestión  
integral de residuos sólidos. Revista Ingeniería y Competitividad.

Rodriguez, C., & Garcia, G. (2017). Métodos de estabilización de taludes en Colombia. Geotecnia, 1-20.

Rodriguez, J. A., Cubillos, J. M., & Garcia, J. F. (2019). Uso de residuos de construcción y demolición como  
rellenos antrópicos en Bogotá. Uso de residuos de construcción y demolición como rellenos  
antrópicos en Bogotá. Bogotá, Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Romero, I. J., & Salamanca Pira, I. A. (2021). GESTIÓN DEL RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA EN ÁREA  
URBANA, EN EL ESTUDIO DE CASO - SECTOR DENOMINADO ALTOS DE LA ESTANCIA LOCALIDAD  
CIUDAD BOLÍVAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. GESTIÓN DEL RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA  
EN ÁREA URBANA, EN EL ESTUDIO DE CASO - SECTOR DENOMINADO ALTOS DE LA ESTANCIA  
LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ. Bogotá, Bogotá, Colombia.

Secretaría de Planeación Distrital . (marzo de 2022). Secretaría De Planeación Distrital. Obtenido de  
[https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/datos\\_de\\_la\\_region\\_rm\\_0.pdf](https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/datos_de_la_region_rm_0.pdf)

SISTEMA GEOLOGICO COLOMBIANO. (2023). VISOR DE DATOS GEOGRAFICOS. Obtenido de  
[https://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Visor\\_Integrado\\_Geoportal/](https://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Visor_Integrado_Geoportal/)

SUÁREZ, Y. R. (2019). ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICANDO DIFERENTES TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES APLICANDO DIFERENTES TÉCNICAS DE REVEGETALIZACIÓN. TUNJA, BOYACA, COLOMBIA.