

RESUMEN

Los problemas geotécnicos han sido identificados como una causa frecuente de deterioro y afectación funcional en edificaciones. Estos han sido originados, en su mayoría, por suelos inadecuadamente caracterizados o por la omisión de condiciones del terreno en el diseño y la construcción. En este trabajo, los impactos negativos asociados a problemas de origen geotécnico en edificaciones de vivienda fueron evaluados con el propósito de establecer su relación con el cumplimiento normativo vigente en Colombia. La evaluación fue realizada a partir de un estudio de caso localizado en el Conjunto Residencial Remansos de Coomeva, en la ciudad de Santiago de Cali, donde se han presentado manifestaciones patológicas asociadas a asentamientos diferenciales y suelos expansivos.

Los problemas fueron caracterizados mediante el análisis de información secundaria, estudios geotécnicos previos y observación directa en campo. Posteriormente, los efectos económicos de las patologías fueron cuantificados a través de la estimación del costo de reforzamiento estructural y su comparación con el valor total de reposición del conjunto habitacional. Finalmente, se llevó a cabo una verificación del cumplimiento del Título H de la NSR-10, centrada en los aspectos técnicos exigidos para estudios de suelos.

Se encontró que las edificaciones fueron cimentadas sobre suelos arcillosos con alto potencial de expansión y comportamiento estacional, y que el reforzamiento necesario representa un 4,3 % del valor estimado de reposición total. Así mismo, se evidenció un cumplimiento parcial de la normativa técnica, especialmente en lo relacionado con el número de unidades de construcción, la cantidad mínima de sondeos y la ausencia de análisis explícitos de capacidad portante. A partir de estos hallazgos, se concluye que una gestión adecuada de la geotecnia, desde una perspectiva gerencial, debe ser integrada en la planificación y ejecución de proyectos de construcción para mitigar riesgos técnicos, económicos y sociales en el ciclo de vida de las edificaciones.

ABSTRACT

Geotechnical problems have been identified as a frequent cause of deterioration and functional impairment in buildings. These have mostly been caused by inadequately characterized soils or by the omission of ground conditions in design and construction processes. In this study, the negative impacts associated with geotechnical problems in residential buildings were evaluated with the purpose of establishing their relationship with the current regulatory compliance framework in Colombia. The evaluation was conducted based on a case study located in the Remansos de Coomeva Residential Complex, in the city of Santiago de Cali, where pathological manifestations associated with differential settlements and expansive soils have been reported.

The problems were characterized through secondary data analysis, previous geotechnical reports, and direct field observation. Subsequently, the economic effects of the pathologies were quantified by estimating the cost of structural reinforcement and comparing it to the total replacement value of the housing complex. Finally, a verification of compliance with Title H of the NSR-10 was carried out, focusing on the technical requirements for soil studies.

It was found that the buildings were founded on clayey soils with high expansive potential and seasonal behavior, and that the required reinforcement represents 4.3% of the estimated total replacement value. Likewise, partial compliance with technical standards was evidenced, particularly regarding the number of construction units, the minimum required boreholes, and the absence of explicit analyses of bearing capacity. Based on these findings, it is concluded that appropriate geotechnical management, from a managerial perspective, must be integrated into the planning and execution of construction projects in order to mitigate technical, economic, and social risks throughout the life cycle of buildings.

**EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS NEGATIVOS ASOCIADOS A LA
GEOTECNIA EN EL CICLO DE VIDA DE PROYECTOS DE VIVIENDA
ESTUDIO DE CASO**

PROYECTO PARA EL TRABAJO DE GRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

ANDRÉS FERNANDO ARCOS LÓPEZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA – CALI
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
CALI – VALLE DEL CAUCA

Julio de 2025

**EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS NEGATIVOS ASOCIADOS A LA
GEOTECNIA EN EL CICLO DE VIDA DE PROYECTOS DE VIVIENDA
ESTUDIO DE CASO**

Proyecto de grado para optar por el título de
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL

Director del trabajo

Dr. IVÁN FERNANDO OTÁLVARO

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA – CALI

FACULTAD DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

CALI – VALLE DEL CAUCA

Julio de 2025

Contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Problema de investigación.....	1
1.2.	Objetivos del proyecto.....	2
1.3.	Organización del documento escrito	2
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Problemas de origen geotécnico en edificaciones	4
2.2.	Revisión normativa.....	15
2.2.1.	Código Colombiano de Diseño y Construcción Sismorresistente (NSR-10).....	15
2.2.2.	Eurocódigo 7 – Proyecto geotécnico.....	16
2.2.3.	Manual de Cimentaciones INVIAS y AASHTO LRFD	17
3.	Metodología.....	18
3.1.	Problemas geotécnicos del estudio de caso	20
3.2.	Estimación de los efectos negativos en función del costo.....	23
3.3.	Relación entre los efectos negativos y el cumplimiento normativo	26
4.	Resultados y análisis.....	27
4.1.	Caracterización de los problemas geotécnicos del estudio de caso.....	27
4.1.1.	Análisis de la información secundaria del estudio de caso	27
4.1.2.	Identificación de las patologías presentes en la actualidad en el estudio de caso	32
4.2.	Estimación de los efectos negativos en función del costo.....	45
4.2.1.	Costo de reposición total	45
4.2.2.	Costo del reforzamiento estructural de la cimentación	45
4.2.3.	Otros costos técnicos asociados.....	46
4.2.4.	Evaluación del efecto económico acumulado	47
4.3.	Relación entre los efectos negativos y el cumplimiento normativo	47
5.	Conclusiones.....	51
5.1.	Conclusiones.....	51
5.2.	Sugerencias para trabajos futuros	52
6.	Referencias bibliográficas	53
Anexo 1. Evidencias fotográficas del trabajo de campo en el estudio de caso.		

Lista de figuras

Figura 1. Daños típicos en los edificios adyacentes a la excavación profunda (Zhang et al., 2018).....	6
Figura 2. Grietas asociadas con deslizamientos en la vereda Mestizal (Cano y Otálvaro, 2000).....	10
Figura 3. Soluciones para mitigar el efecto de los suelos expansivos en Santiago de Cali (Villafañe et al., 2000).....	11
Figura 4. Daños visibles en el punto de descarga de cargas dinámicas por tránsito pesado (Cano y Otálvaro, 2001).....	12
Figura 5. Daños asociados a los movimientos del terreno (Osorio y Sierra, 2008).	13
Figura 6. Reactivación del movimiento en masa en el km 6 (Giraldo & Ordóñez, 2013). ..	14
Figura 7. Daños en Acceso a y losas del sótano en junio de 2019 (Casteblanco, 2020).....	15
Figura 8. Localización del estudio de caso (tomada de: https://maps.app.goo.gl/GvSPyv8ECQYLR2zdA).	19
Figura 9. Vista general del CRRC (tomado de: https://maps.app.goo.gl/uvCiQBMq9tC4kAAh9).	19
Figura 10. Esquema general de clasificación de grietas y fisuras en pisos y muros (Audell, 1996).....	23
Figura 11. Formaciones geológicas superficiales en inmediaciones del estudio de caso (modificado de Ingeominas, 2005).....	28
Figura 12. Horizontes de suelo encontrados (Alma Ingeniería SAS, 2016).....	29
Figura 13. Carta de plasticidad de los resultados reportados por cada horizonte de suelo (Modificada de Alma Ingeniería SAS, 2016).....	30
Figura 14. Dilataciones y desplomen entre bloques y puntos-fijos (Alma Ingeniería SAS, 2016).....	31
Figura 15. Distribución en planta de las torres del caso de estudio (modificado de Planeación Municipal).	33
Figura 16. Distribución de los apartamentos y punto fijo para la Torre F (modificado de Planeación Municipal).....	34
Figura 17. Patologías en los pisos 1 y 2 del punto fijo de la Torre F.	35
Figura 18. Patologías en el quinto piso del punto fijo de la Torre F.	36
Figura 19. Patologías en el quinto piso del punto fijo de la Torre F.	37
Figura 20. Patologías en el punto fijo del primer piso de la Torre F.....	38
Figura 21. Evidencias de patología en el apartamento 102 F.....	39
Figura 22. Evidencias de patología en el apartamento 103 F.....	39

Figura 23. Evidencias de patología en el apartamento 401 F.....	40
Figura 24. Patologías del apartamento 503 F.	41
Figura 25. Evidencias de patología en el apartamento 303 G.	42
Figura 26. Distribución de pilotes en una unidad de construcción del estudio de caso (Alcandía de Santiago de Cali).....	44

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos comunes de daños por raíces y mecanismos asociados (Morgenroth, 2008).	6
Tabla 2. Pérdidas económicas causadas por daños radiculares (Shi et al., 2023).	7
Tabla 3. Costos estimados por daños asociados a suelos expansivos.	8
Tabla 4. Casos representativos de daños por suelos colapsables en Argentina, Brasil y otros contextos.	9
Tabla 5. Clasificación de daños producidos en edificios según Burland (1977).	21
Tabla 6. Base de precios de costos de construcción para proyectos similares en Santiago de Cali.	24
Tabla 7. Base de precios de exploración de campo.	24
Tabla 8. Base de precios para ensayos de laboratorio.	25
Tabla 9. Base para el cálculo de honorarios profesionales.	26
Tabla 10. Lista de chequeo para la verificación del cumplimiento normativo basada en el Título H de la NSR-10.	26
Tabla 11. Distribución de las patologías en función del nivel.	42
Tabla 12. Estimación de los costos de reparación en función de la propuesta de corrección elaborada por el consultor.	45
Tabla 13. Análisis del cumplimiento normativo del estudio geotécnico presentado después de las patologías descritas según la NSR-10.	47

1. Introducción

En las necesidades actuales de desarrollo y el impacto en el medio ambiente, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se ha convertido en una poderosa herramienta de cuantificación de los efectos negativos de un producto, en este caso de una edificación. Una forma de entender el ACV de una edificación es a través de sus etapas alrededor de la construcción: i) elección de los materiales y sus transformaciones para construir la edificación; ii) el proceso de construcción mismo, la entrega y el permiso de ocupación; iii) el momento en que se le da uso; y iv) la fase de deconstrucción, donde debería de dar finalización al uso y reaprovechar los materiales. Es común que en las fases ii y iii del ACV se presenten problemas de origen geotécnico como asentamientos y estabilidad, lo que ocasiona múltiples trastornos como los retrasos en las entregas y sobre costo por parte de los constructores y pérdidas de dinero y confianza por parte de los usuarios finales o propietarios.

De acuerdo con lo anterior, en el presente trabajo de grado se pretende estudiar el efecto negativo de origen geotécnico en el ACV de proyectos de construcción en función del cumplimiento de normativas para un caso de viviendas de la ciudad de Santiago de Cali.

1.1. Problema de investigación

El desarrollo de cualquier obra civil involucra la geotecnia, debido a que la transferencia de cargas de todas las estructuras se hace al subsuelo, para ello desde el punto de vista normativo en Colombia desde la NSR-98 se adoptó la obligatoriedad de los estudios y los requisitos mínimos consignados en el Título H. Requisitos que establecen unos criterios mínimos de exploración, caracterización del terreno y análisis, no obstante, el cumplimiento de dicha normativa no garantiza la correcta ejecución de los proyectos y su estabilidad a lo largo de su ciclo de vida. Debido a esto, y como consecuencia de múltiples problemas de asentamientos y estabilidad de taludes y laderas entre otros en la presente propuesta se pretende estudiar las causas más frecuentes de este tipo de patologías y su relación con los mínimos normativos para cuantificar los impactos en el ciclo de vida de la edificación, haciendo el último para un caso de estudio en la Ciudad de Santiago de Cali.

Pregunta de investigación

¿cuál es el efecto de problemas de origen geotécnico en las fases de construcción y uso de edificaciones de vivienda y su relación con el cumplimiento de las normativas de diseño y construcción?

La presente propuesta es un estudio de caso único localizado en la ciudad de Santiago de Cali que se encuentra en fase de uso desde el ACV. En ella se evaluarán los efectos negativos asociados a problemas de origen geotécnico para cuantificar su posible mitigación en función del cumplimiento de las normativas vigentes.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo general del presente trabajo es evaluar los impactos negativos en las fases de construcción y uso de edificaciones de vivienda asociados a aspectos geotécnicos para determinar su relación y posible mitigación en función del cumplimiento de la normativa de diseño y construcción sismo resistente en un caso de estudio en la ciudad de Santiago de Cali.

Este se pretende alcanzar a través de los siguientes objetivos específicos:

- OE1: Caracterizar los problemas de origen geotécnico en una edificación mediante la revisión de antecedentes y trabajo de campo.
- OE2: Cuantificar los efectos negativos de los problemas geotécnicos mediante el análisis en términos de costos.
- OE3: Establecer una relación empírica entre los impactos negativos asociados a problemas de origen geotécnico y el cumplimiento de las normas de diseño y construcción sismo resistente.

1.3. Organización del documento escrito

El presente documento se estructura en cinco capítulos que permiten desarrollar de forma lógica y coherente los objetivos del proyecto de investigación.

El Capítulo 1 expone el contexto general del estudio, formulando el problema de investigación, los objetivos planteados y la justificación de la propuesta en función de los impactos negativos de origen geotécnico en edificaciones de vivienda.

El Capítulo 2 corresponde a la revisión bibliográfica, organizada en torno a tres ejes fundamentales: (i) el análisis de los problemas geotécnicos recurrentes en edificaciones; (ii) la revisión normativa nacional e internacional en materia de diseño y construcción sísmo resistente, particularmente el Título H de la NSR-10 y el Eurocódigo 7; y (iii) las técnicas de exploración y caracterización del subsuelo que sustentan la toma de decisiones en la fase de diseño.

En el Capítulo 3 se presenta la metodología empleada para cumplir los objetivos específicos. Se describe el caso de estudio, se detallan los procedimientos de caracterización geotécnica, el modelo de estimación de costos asociados a patologías estructurales, y el análisis del grado de cumplimiento normativo.

El Capítulo 4 expone los resultados obtenidos y su análisis, incluyendo la caracterización técnica del problema geotécnico, la cuantificación económica de sus efectos en el ciclo de vida del proyecto, y la evaluación del grado de cumplimiento frente a la normativa vigente.

Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones del trabajo, destacando los principales hallazgos, y propone líneas de investigación y aplicación futuras desde una perspectiva gerencial en el ámbito de la construcción.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta la revisión bibliográfica, se divide en dos partes fundamentales: problemas de origen geotécnico en edificaciones y una breve revisión normativa.

2.1. Problemas de origen geotécnico en edificaciones

De acuerdo con *Integrated Designs* (recuperado el 2 de julio de 2025), los problemas geotécnicos son una de las principales causas de deterioro y afectación funcional en edificaciones. Estos problemas suelen originarse por suelos inadecuadamente caracterizados o por la omisión de condiciones del terreno en el diseño y la construcción. Entre los problemas geotécnicos más comunes se encuentran las pendientes inestables, la infiltración de agua subterránea, suelos inestables y drenaje deficiente. Estos factores pueden comprometer la estabilidad de las estructuras y generar sobrecostos significativos. Por lo tanto, es esencial realizar estudios geotécnicos completos antes de iniciar cualquier proyecto de construcción para identificar y mitigar estos riesgos.

Tokimatsu, Mizuno y Kakurai (1996), realizaron un estudio detallado sobre los daños en edificaciones ocasionados por el terremoto de Hyogoken-Nambu (Kobe, Japón), en 1995, poniendo énfasis en los problemas geotécnicos que comprometieron la estabilidad de diversas estructuras. Según los autores, el daño observado fue el resultado de una combinación entre sacudidas sísmicas severas y fallas del terreno, como licuación de suelos, asentamientos diferenciales y desplazamientos horizontales. En particular, se identificaron cinco mecanismos geotécnicos asociados al daño: (i) pérdida de capacidad portante por licuación, (ii) asentamientos excesivos, (iii) inestabilidad por momentos de volcamiento, (iv) deformación de pilotes por fuerzas cinemáticas del suelo y (v) propagación lateral del terreno. Un hallazgo relevante del estudio es que muchas estructuras no colapsaron, pero presentaron desplazamientos importantes en su cimentación, lo que generó elevados costos de reparación y refuerzo. Asimismo, los autores resaltan que las edificaciones con cimentaciones profundas o con medidas de mitigación previas presentaron un mejor desempeño estructural. Este caso evidencia la necesidad de integrar criterios geotécnicos detallados en la fase de diseño, particularmente en zonas con suelos susceptibles a licuación o con niveles freáticos elevados.

Hamid, Wallentén y Johansson (2015), realizaron un estudio en edificaciones multifamiliares suecas construidas entre 1950 y 1975, en las cuales evaluaron el riesgo de deterioro por humedad a partir de la definición de un punto de consigna óptimo para la ventilación controlada por demanda (DCV). Mediante simulaciones higrotérmicas y modelos de crecimiento microbiológico, determinaron que un suministro de humedad superior a 3 g/m^3 representa un riesgo significativo de crecimiento de moho en materiales como papel tapiz, madera y polvo acumulado. El estudio muestra que, incluso sin absorción de agua de lluvia, el exceso de vapor por difusión desde el interior puede generar condiciones de humedad relativa suficientes para provocar daños biológicos en elementos constructivos, efecto que puede ser en ocasiones interpretado como un problema por migración de humedad del suelo.

Zhang et al. (2018), presentan un estudio de caso en China donde se evaluaron los daños sufridos por un edificio existente adyacente a una excavación profunda para la construcción de una estación de metro. La Figura 1 muestra los daños observados en el muro del edificio existente durante la excavación del foso de cimentación. Se evidencian grietas verticales en la esquina del muro, así como grietas inclinadas y horizontales que se extienden en dirección paralela al foso. Las grietas verticales presentan mayor apertura en la parte inferior de la esquina del muro y tienden a cerrarse progresivamente hacia la parte superior, sin que se identifique riesgo de colapso. Además, las observaciones en campo confirman que no se detecta una inclinación significativa en el muro adyacente al área excavada. A través de monitoreo en campo, simulaciones numéricas con Plaxis y ensayos experimentales sobre el suelo, identificaron que la causa principal de los daños fue el asentamiento diferencial inducido tanto por la excavación como por el proceso de desagüe del terreno. Los autores evidencian que el uso de muros pantalla no logró aislar hidráulicamente la excavación, lo que facilitó el arrastre de partículas finas (principalmente arenas medias y finas) y provocó pérdida de estrato y asentamientos severos. Estos, a su vez, generaron grietas verticales, inclinadas y horizontales en el edificio, con asentamientos diferenciales de hasta 107 mm.



Figura 1. Daños típicos en los edificios adyacentes a la excavación profunda (Zhang et al., 2018).

En entornos urbanos densamente arborizados, las raíces de árboles de gran porte constituyen una fuente significativa de afectaciones a las infraestructuras. Morgenroth (2008) señala que las raíces de árboles urbanos, especialmente aquellas ubicadas en aceras o franjas verdes, pueden causar daños estructurales en pavimentos, bordillos, redes subterráneas y cimentaciones de edificaciones (ver Tabla 1). Estos daños se originan por la presión mecánica ejercida por las raíces en expansión o por la búsqueda de humedad en zonas críticas del subsuelo. Como resultado, se presentan desplazamientos diferenciales, fisuras en elementos rígidos o fracturas en tuberías, lo que conlleva elevados costos de reparación e incluso conflictos entre residentes, ingenieros civiles y entidades ambientales municipales o regionales.

Tabla 1. Tipos comunes de daños por raíces y mecanismos asociados (Morgenroth, 2008).

Tipo de daño	Mecanismo
Desplazamiento del pavimento	Expansión radial del sistema radicular superficial que empuja el pavimento.
Ruptura de tuberías	Crecimiento de raíces dentro de juntas defectuosas o rotas; presión mecánica.
Obstrucción de drenajes	Raíces que crecen dentro de tuberías y las bloquean, causando desbordamientos.
Agrietamiento de cimentaciones	Expansión de raíces bajo o cerca de cimientos poco profundos.
Reducción de estabilidad del suelo	Alteración de la estructura del suelo por extracción de humedad o raíces extensas.
Compromiso de estructuras subterráneas	Raíces que ingresan o rodean elementos como pozos, cámaras o registros.

Este tipo de afectación es relevante para el análisis de patologías estructurales en viviendas adyacentes a árboles urbanos, pues subraya la necesidad de implementar medidas preventivas como barreras físicas anti-raíces o especies menos invasivas, particularmente en zonas donde la cimentación es superficial o donde el nivel freático es fluctuante.

De acuerdo con Shi et al. (2023), en contextos urbanos, las raíces de ciertos árboles alineados en calles pueden deteriorar gradualmente bienes públicos, afectando de forma estructural elementos como aceras, bordillos y tuberías subterráneas. Este tipo de daños, además de generar deformaciones visibles en la superficie peatonal, puede representar un riesgo para los transeúntes debido a la presencia de raíces expuestas o prominentes. Tales impactos han implicado inversiones significativas por parte de las administraciones municipales, quienes destinan recursos anualmente para mitigar estos efectos. Un estudio de caso en la ciudad de Pekín estimó que, solo en 2019, los servicios ecosistémicos negativos alcanzaron un valor cercano a los 10,54 mil millones de RMB, incluyendo los perjuicios provocados por las raíces. Estos costos abarcan desde el mantenimiento del arbolado urbano y las reparaciones de infraestructuras hasta las indemnizaciones por accidentes a peatones. Esta problemática también está presente en otras regiones, como Estados Unidos y Canadá, donde se invierten decenas de millones de dólares anuales para enfrentar las consecuencias del daño radicular. Adicionalmente, los gobiernos enfrentan costos considerables tanto a nivel regional como nacional, derivados del mantenimiento de árboles, la reparación de infraestructuras dañadas y las compensaciones otorgadas a peatones lesionados. Estos gastos, que han sido documentados en diversas ciudades de América del Norte, Europa, Asia y Oceanía, se presentan con valores significativos que, en algunos casos, alcanzan cientos de millones de dólares o su equivalente en moneda local, evidenciando la magnitud del impacto económico del daño radicular en entornos urbanos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Pérdidas económicas causadas por daños radiculares (Shi et al., 2023).

País / Región	Año	Costos estimados	Detalles específicos
Hayward, EE. UU.	1972	85.000 USD por staff	Materiales para aceras, bordillos, drenajes, equipos y mano de obra.
Hayward, EE. UU.	1972	75.000 USD por staff	Corte de raíces y extracción de tocones. Agregado de 400 USD por mantenimiento de alcantarillado.
California, EE. UU.	2000	70 millones USD	Reparación de aceras en Los Ángeles: 23 millones USD; compensación por lesiones: 9 millones USD.

País / Región	Año	Costos estimados	Detalles específicos
Beijing, China	2019	1.640 millones ¥	Gasto total en mantenimiento de árboles en la ciudad.
Beijing, China	2019	581,7 millones ¥	Reparación y mantenimiento de aceras, bordillos, drenajes y otras infraestructuras.
Alemania	2009	28,4 millones € / año	Mantenimiento y reemplazo de tuberías subterráneas.
Suecia	2003	5,6 millones €	Mantenimiento y reemplazo de tuberías eléctricas, de desagüe y alcantarillado.
Canadá	2002	1,5–2,4 millones C\$	Reemplazo del 15–20 % de 100.000 km de aceras; no todo atribuible al daño radicular.
Auckland, Nueva Zelanda	2017	19 millones NZ\$	Reparación de vías y espacios abiertos, y cultivo de árboles.

Los suelos expansivos constituyen uno de los principales riesgos geotécnicos en contextos urbanos e infraestructurales, debido a su capacidad para experimentar cambios volumétricos significativos en respuesta a variaciones en el contenido de humedad. Esta característica provoca fenómenos de expansión y contracción que pueden comprometer la estabilidad de cimentaciones superficiales, pavimentos, estructuras rígidas y redes subterráneas. En regiones con estaciones húmedas y secas marcadas, los daños acumulativos derivados de estos procesos suelen traducirse en elevadas pérdidas económicas. Se ha estimado que, solo en Estados Unidos, los costos anuales por daños asociados a suelos expansivos superan los 15.000 millones de dólares, superando incluso los daños causados por inundaciones, huracanes y terremotos combinados (Nelson & Miller, 1992; Jones & Holtz, 1973). La identificación temprana de estos suelos y la implementación de medidas preventivas son fundamentales para reducir su impacto económico y social. En la Tabla 3 se presentan algunos casos asociados a suelos expansivos y sus costos estimados.

Tabla 3. Costos estimados por daños asociados a suelos expansivos.

País / Región	Año	Costos estimados	Tipos de estructuras afectadas	Fuente
Estados Unidos	1992	>15.000 millones USD/año	Viviendas, caminos, tuberías	Nelson & Miller (1992)
Australia	2010	1.000 millones AUD/año	Casas suburbanas y pavimentos	Cameron (2010)
Reino Unido	2003	300 millones GBP/año	Infraestructura de servicios públicos	Jones & Jefferson (2012)
India	2008	N/D	Edificaciones residenciales y redes de alcantarillado	Murthy et al. (2008)

Los suelos colapsables presentan una estructura metaestable que puede sufrir asentamientos súbitos cuando son sometidos a procesos de humedecimiento, especialmente bajo carga. Este fenómeno es frecuente en regiones con suelos loésicos, cenizas volcánicas u otras formaciones de origen eólico y puede generar importantes daños en edificaciones, obras de infraestructura y sistemas urbanos. En la Tabla 4 se presentan casos documentados en Argentina, Brasil y el caso de estudio desarrollado por Rodrigues (2007) en Pereira Barreto, Brasil, con el fin de ilustrar la diversidad de contextos, magnitud de daños e implicaciones económicas asociadas al colapso de suelos.

Tabla 4. Casos representativos de daños por suelos colapsables en Argentina, Brasil y otros contextos.

País	Ciudad / Caso	Tipo de suelo	Tipo de daño / estructura afectada	Fuente / Observación
Argentina	Luján	Suelo colapsable	Hundimiento de cimientos en vivienda	Estudiosdesuelo.com (2022), reparación: \$1.5M ARS
Argentina	Rosario	Arcilla expansiva	Grietas en muros por falta de estudio geotécnico	Estudiosdesuelo.com (2023), costo >\$700,000 ARS
Brasil	Pernambuco	Loess / depósitos costeros	Asentamientos en edificaciones	Santos et al. (2022), sin costos especificados
Brasil	Pereira Barreto	Coluvionar colapsable	Deformaciones severas en edificaciones tras ascenso del nivel freático	Rodrigues (2007), modelación avanzada de colapso

En Colombia, diferentes medios de comunicación (El Heraldo, 2016 y 2024; El País, 2024), mencionan que el caso del conjunto residencial Campo Alegre en Barranquilla representa una de las situaciones más críticas en Colombia relacionadas con fallas geotécnicas y deficiencias en la gestión del riesgo en proyectos de vivienda. Desde 2004, se han reportado agrietamientos y deslizamientos en la ladera donde se construyeron múltiples urbanizaciones, afectando a miles de familias. A pesar de las advertencias técnicas y órdenes de desalojo emitidas desde 2010, algunas edificaciones continuaron habitadas o fueron reocupadas, lo que culminó en el colapso de una torre del conjunto Privilegios en noviembre

de 2024, causando la muerte de una mujer y heridas a cuatro menores de edad. Este evento evidenció la falta de acciones preventivas efectivas y la necesidad de una gestión integral del riesgo geotécnico en proyectos de construcción. En 2016, un fallo judicial responsabilizó al Distrito de Barranquilla y a ocho constructoras por los daños materiales e inmateriales sufridos por los residentes de Campo Alegre, ordenando indemnizaciones que podrían alcanzar los \$300.000 millones de pesos. Este caso subraya la importancia de realizar estudios geotécnicos exhaustivos y de cumplir con las normativas de construcción sismo resistente para prevenir tragedias similares en el futuro.

Cano y Otálvaro (2000), estudian una serie de problemas por la ampliación de una vía, muestran con claridad el patrón de agrietamiento causado por deslizamientos activos en una de las viviendas de la vereda Mestizal, en el municipio de San Jerónimo (Antioquia). En esta figura se observa una grieta vertical de gran apertura en un muro de mampostería, con evidencia de desplazamiento horizontal acumulado en el tiempo. Esta manifestación física del daño coincide con los datos medidos en campo, donde se registraron aperturas superiores a 10 mm con tendencia creciente, lo que refleja la evolución progresiva de un fenómeno de inestabilidad en el terreno. En la Figura 2 se ilustra como el movimiento del talud afecta directamente las viviendas, comprometiendo su estabilidad y evidenciando la necesidad de implementar medidas de estabilización geotécnica.



Figura 2. Grietas asociadas con deslizamientos en la vereda Mestizal (Cano y Otálvaro, 2000).

Villafañe, Coronado y Ríos (2000), analizan el comportamiento de los suelos expansivos en la ciudad de Santiago de Cali, en especial en zonas planas con arcillas de origen aluvial con alto potencial de contracción-expansión. A partir de la experiencia local, proponen un conjunto de prácticas constructivas y de exploración geotécnica con el fin de mitigar los efectos patológicos sobre edificaciones livianas. El estudio destaca que el crecimiento urbano ha obligado a construir en suelos parcialmente saturados, lo cual ha generado fisuramientos y asentamientos diferenciales en viviendas de hasta cinco pisos. Se identifican como factores críticos el uso inadecuado de materiales de relleno como la rocamuerta (altamente permeable), la eliminación de la capa vegetal protectora, la siembra inadecuada de árboles y las fluctuaciones del nivel freático, que alteran el equilibrio hídrico del subsuelo generando sobrecostos por mantenimiento en algunas edificaciones, y para la construcción de obras nuevas con necesidad de uso de pilotes, rellenos o sobrecimientos como se ilustra en la Figura 3.

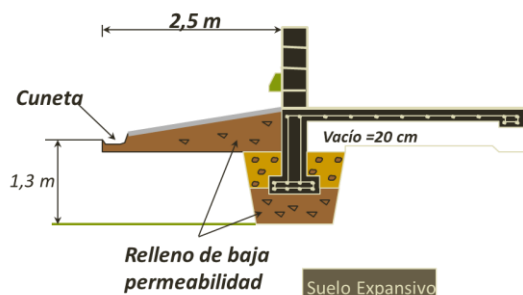


Figura 3. Soluciones para mitigar el efecto de los suelos expansivos en Santiago de Cali (Villafañe et al., 2000).

Cano y Otálvaro (2001), analizan los daños estructurales en viviendas y pavimentos del municipio de Yarumal (Antioquia), provocados por la habilitación temporal de la Carrera 23 como vía alterna para el tráfico pesado, ante el cierre parcial de la Troncal del Norte. Las inspecciones realizadas evidenciaron fallas en pisos, fachadas y muros, tanto en construcciones de ladrillo como de tapia, cuyas técnicas constructivas, aunque apropiadas, no fueron diseñadas para resistir las sollicitaciones dinámicas inducidas por vehículos de alto

tonelaje. Entre las patologías observadas se documentaron agrietamientos verticales, levantamientos de pisos, desprendimiento de muros y pérdida de conexiones estructurales, con aperturas que en algunos casos superaban los 20 mm. El fenómeno fue más severo en viviendas localizadas cerca de la vía alterna, indicando una correlación directa con las vibraciones y sobrecargas cíclicas impuestas por el tránsito pesado (ver Figura 4). En cuanto a los pavimentos, se determinó que el bombeo de agua subterránea, combinado con cargas excesivas, provocó fallas estructurales por socavación, agrietamiento y asentamientos diferenciales. El caso del sector de La Gloria es paradigmático: la vía presentó colapsos reiterados por erosión interna y pérdida de soporte, atribuibles a una interpretación geotécnica deficiente y a soluciones técnicas inadecuadas.



Figura 4. Daños visibles en el punto de descarga de cargas dinámicas por tránsito pesado (Cano y Otálvaro, 2001).

Osorio y Sierra (2008), analizaron el colapso de una vivienda de recreo de dos plantas localizada en el kilómetro 9 de la Vía Medellín – Santa Elena, sector conocido como Media Luna. La vivienda, construida en una ladera contigua a la vía, fue objeto de un estudio detallado que incluyó la evaluación del estado estructural del inmueble, la clasificación de las grietas y fisuras presentes, así como la caracterización geotécnica del suelo de cimentación (ver Figura 5). El análisis permitió identificar desplazamientos del terreno en varias direcciones, lo cual generó severas deformaciones estructurales que culminaron en el colapso total de la edificación. Según el estudio, los movimientos de ladera en esta zona se

asocian a fenómenos geológicos como la infiltración de aguas subterráneas, que provocan procesos de lavado interno y pérdida de soporte del terreno. Este tipo de inestabilidad ha sido reportado históricamente en el corredor vial Medellín – Santa Elena, lo que subraya la necesidad de implementar medidas preventivas más estrictas en proyectos de urbanización o edificación sobre pendientes. Este caso evidencia la importancia de considerar los factores geodinámicos locales, particularmente en laderas con antecedentes de deslizamiento, y reafirma la necesidad de realizar estudios geotécnicos exhaustivos como parte fundamental del proceso de planificación y diseño estructural.



Figura 5. Daños asociados a los movimientos del terreno (Osorio y Sierra, 2008).

Giraldo & Ordóñez (2013), analizan el caso del kilómetro 6 de la Autopista Medellín–Bogotá constituye uno de los eventos geotécnicos más complejos y costosos en infraestructura vial del país. Desde hace más de dos décadas, se ha presentado un descenso progresivo de la bancada vial, afectando la estabilidad de la vía y provocando interrupciones en el tránsito, con consecuencias económicas y sociales significativas. A pesar de múltiples intervenciones realizadas entre 2007 y 2012 —que incluyeron muros de contención, anclajes, reubicación de calzada, rellenos y drenajes, con inversiones que superaron los 30.000 millones de pesos— el problema persistió, evidenciando la falta de efectividad de las

soluciones aplicadas. Según los estudios geológicos y geomorfológicos desarrollados, el fenómeno se relaciona con la reactivación de un antiguo movimiento en masa de grandes dimensiones, cuya cicatriz aún puede ser identificada a través de fotointerpretación aérea y levantamiento topográfico (ver Figura 6). Este deslizamiento profundo ha sido reactivado por las condiciones naturales del terreno y por las intervenciones antrópicas, afectando viviendas, predios y la infraestructura concesionada por DEVIMED, lo que ha generado conflictos legales y pérdidas materiales en la zona. El caso, al igual que los ocurridos en Campo Alegre (Barranquilla) y el colegio de Ciudad Bolívar (Bogotá), evidencia cómo la subestimación del riesgo geotécnico, unida a la fragmentación entre diagnóstico técnico y decisiones de inversión, puede derivar en intervenciones reiteradas, onerosas y sin solución definitiva. Se ha planteado que soluciones de ingeniería como viaductos o túneles podrían representar una alternativa técnica más robusta y sostenible frente a las condiciones geológicas del sitio.



Figura 6. Reactivación del movimiento en masa en el km 6 (Giraldo & Ordóñez, 2013).

Castelblanco (2020), analiza un caso de subsidencia localizada que afectó a una vivienda del barrio Santa Inés, en Bogotá, generando daños estructurales considerables. El estudio se enfoca en una vivienda construida en mampostería confinada de un solo piso, localizada sobre un lote irregular que colinda con una quebrada, en una zona de topografía inclinada. Se identificaron agrietamientos diagonales en muros, desplazamientos del nivel del piso, asentamientos diferenciales y separación entre la vivienda y la placa de cimentación (ver Figura 7). Mediante inspecciones técnicas y sondeos manuales, se determinó que la causa principal de la patología era la erosión interna del suelo generada por filtraciones de aguas subterráneas, lo que provocó una pérdida de soporte en el terreno y, en consecuencia,

la deformación estructural. El análisis recomienda obras de estabilización del terreno, mejora del drenaje y refuerzo de la cimentación para evitar el colapso progresivo. Este caso refleja la vulnerabilidad de edificaciones informales o con baja supervisión técnica frente a condiciones geotécnicas desfavorables, y destaca la necesidad de realizar estudios previos del suelo incluso en zonas urbanas consolidadas.

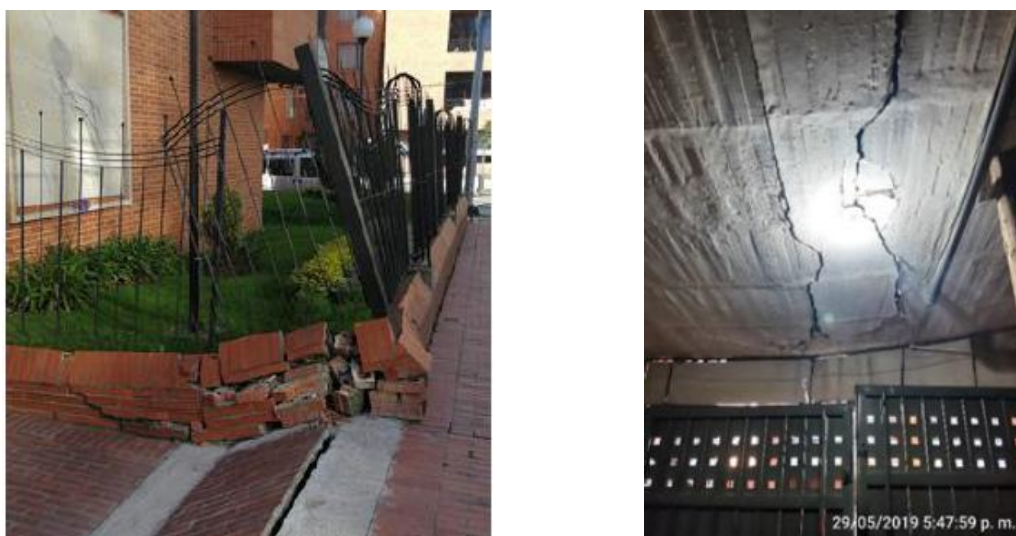


Figura 7. Daños en Acceso a y losas del sótano en junio de 2019 (Castebianco, 2020).

2.2. Revisión normativa

Teniendo en cuenta el objetivo de explorar una posible relación entre los problemas geotécnicos y el cumplimiento normativo, a continuación, se hace una revisión bibliográfica de los elementos normativos.

2.2.1. Código Colombiano de Diseño y Construcción Sismorresistente (NSR-10)

La NSR-10 es la norma técnica vigente en Colombia que regula el diseño y construcción de edificaciones resistentes a sismos. Promulgada por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, esta normativa tiene como objetivo reducir el riesgo de colapso estructural, pérdidas humanas y económicas frente a movimientos sísmicos de diversa magnitud. Uno de los capítulos más relevantes de la NSR-10 para el área geotécnica y de cimentaciones es el Título H, dedicado al diseño geotécnico de cimentaciones. Este título establece los criterios para la evaluación de las condiciones del

subsuelo, la clasificación de los tipos de cimentación (superficial y profunda), los factores de carga y resistencia, así como las verificaciones por capacidad portante, asentamientos, estabilidad global y deslizamientos.

La norma también define las “unidades de construcción”, entendidas como el conjunto de componentes constructivos que deben cumplir condiciones específicas de comportamiento estructural, durabilidad, integridad y desempeño. Para cimentaciones, se considera unidad la combinación de suelo, estructura de fundación y elementos asociados de contención o transferencia de carga.

En cuanto a la exploración del terreno, la NSR-10 exige que toda edificación nueva cuente con un estudio geotécnico con base en información proveniente de ensayos de campo y laboratorio. Entre los ensayos mínimos requeridos se encuentran:

- Ensayos SPT (Standard Penetration Test) para suelos no cohesivos.
- Ensayos de corte directo y compresión triaxial para suelos cohesivos.
- Ensayos de clasificación (granulometría, límites de Atterberg).
- Ensayos de consolidación unidimensional, humedad natural, y peso unitario.

Además, la norma especifica que el número de calicatas, perforaciones y sondeos dependerá del tipo de edificación, su tamaño, complejidad estructural y clase de amenaza sísmica asignada a la zona del proyecto. La profundidad mínima de exploración debe superar la zona influenciada por las cargas estructurales esperadas, y la interpretación de los resultados debe ser realizada por un ingeniero geotecnista competente.

2.2.2. Eurocódigo 7 – Proyecto geotécnico

El Eurocódigo 7 (EN 1997) forma parte del conjunto de normas estructurales de la Unión Europea, centrado en el diseño geotécnico de cimentaciones, taludes y estructuras de contención. Su enfoque se basa en el diseño por estados límites, incorporando factores parciales de seguridad tanto para acciones como para resistencias del suelo.

A diferencia de normas prescriptivas, el Eurocódigo 7 pone énfasis en el juicio ingenieril, la validación de modelos de cálculo y la integración entre la exploración del terreno, los ensayos de laboratorio y el control de ejecución. Establece tres categorías de

fiabilidad y propone el diseño asistido por ensayos (DAE), adaptando la rigurosidad del análisis a la clase de obra y a los riesgos asociados.

Entre los principios que rigen esta normativa se destacan: la separación entre verificación de capacidad y verificación de servicio; el diseño geotécnico directo, indirecto o por observación; y el uso de métodos probabilísticos en situaciones complejas. Esta norma promueve el control de calidad en campo como parte del aseguramiento de la hipótesis de diseño.

2.2.3. Manual de Cimentaciones INVIAS y AASHTO LRFD

El Manual de Cimentaciones del INVIAS (2014), adaptado de las especificaciones AASHTO LRFD, proporciona lineamientos técnicos y metodológicos para el diseño de cimentaciones en obras de infraestructura vial en Colombia. Establece criterios para la exploración del subsuelo, selección del tipo de cimentación, determinación de propiedades mecánicas de los materiales y aplicación de factores de carga y resistencia conforme al método LRFD (Load and Resistance Factor Design).

Este enfoque permite una evaluación integral del comportamiento del suelo y la cimentación frente a estados límite de servicio, resistencia o evento extremo. Se incluyen especificaciones para zapatas aisladas, zapatas combinadas, losas de cimentación, pilotes y caissons. Asimismo, se consideran los efectos de licuación, subsidencia, expansión y colapso del suelo como factores condicionantes del diseño.

El manual resalta la necesidad de establecer correlaciones entre los datos obtenidos en campo y los ensayos de laboratorio, y prioriza la toma de decisiones fundamentadas en la caracterización geotécnica específica del sitio. El uso de factores de resistencia y carga calibrados permite aumentar la seguridad y eficiencia del diseño, especialmente en condiciones de alta variabilidad geológica.

3. Metodología

El presente Capítulo se detalla en los aspectos metodológicos empleados para dar cumplimiento a los objetivos específicos, los cuales se han organizado en tres paquetes de trabajo:

- WP-1 Caracterización de los problemas geotécnicos del estudio de caso.
- WP-2 Estimación de los efectos negativos en función del costo.
- WP-3 Relación entre los efectos negativos y el cumplimiento normativo.

De forma inicial, en este trabajo se elaboró la identificación del estudio de caso considerando aspectos como: construcción de un proyecto de vivienda con problemas de origen geotécnico en la etapa de operación, posterior a la ocupación; acceso a información directa e indirecta del problema geotécnico; posibilidad de hacer trabajo de campo, para recopilar información, hacer entrevistas o diligenciar cuestionarios.

En el análisis de información se identificó el Conjunto Residencial Remansos de Coomeva (CRRC) ubicado en la carrera 2B número 40A-75 en el Barrio Manzanares de Santiago de Cali (ver Figura 8), ha presentado diferentes síntomas de patología estructural evidenciada en grietas, fisuras y desplomes en los puntos fijos de las torres. El conjunto CRRC se compone de edificios de vivienda de cinco (5) niveles con unidades de construcción separadas por juntas que comparten algunos puntos fijos como las escalas (ver Figura 9) construido por la Constructora Martínez Villalba de Occidente S.A. en 1989.

Mediante la Administración de esta Urbanización se solicitaron los servicios profesionales de Alma Ingeniería SAS para llevar a cabo estudio de suelos para el análisis de patología de las torres del conjunto CRRC. El trabajo adelantado por los consultores consistió en una caracterización del terreno mediante la ejecución de exploración directa, llevada a cabo entre el 25 y el 30 de julio de 2016, y consistió en cinco (5) perforaciones con equipo de percusión y la excavación de tres (3) apiques manuales a fin de determinar tipo y profundidad de cimentación. A partir de las muestras alteradas recuperadas mediante la cuchara partida o *split-spoon*, se llevaron a cabo pruebas de carácter rutinario, constituidas por gradación completa con lavado por el tamiz No. 200 (ASTM-D-2487), límites de consistencia (líquido y plástico ASTM-D-4318) para clasificación según el sistema USCS y determinación del contenido de humedad natural (ASTM-D-2216). Finalmente, se extrajeron

muestras inalteradas mediante los tubos de pared delgada (tubos shelby de la ASTM-D-1587), para someterlas a pruebas de compresión inconfina (ASTM-D-2166) con determinación del peso unitario (ASTM-D-2167).

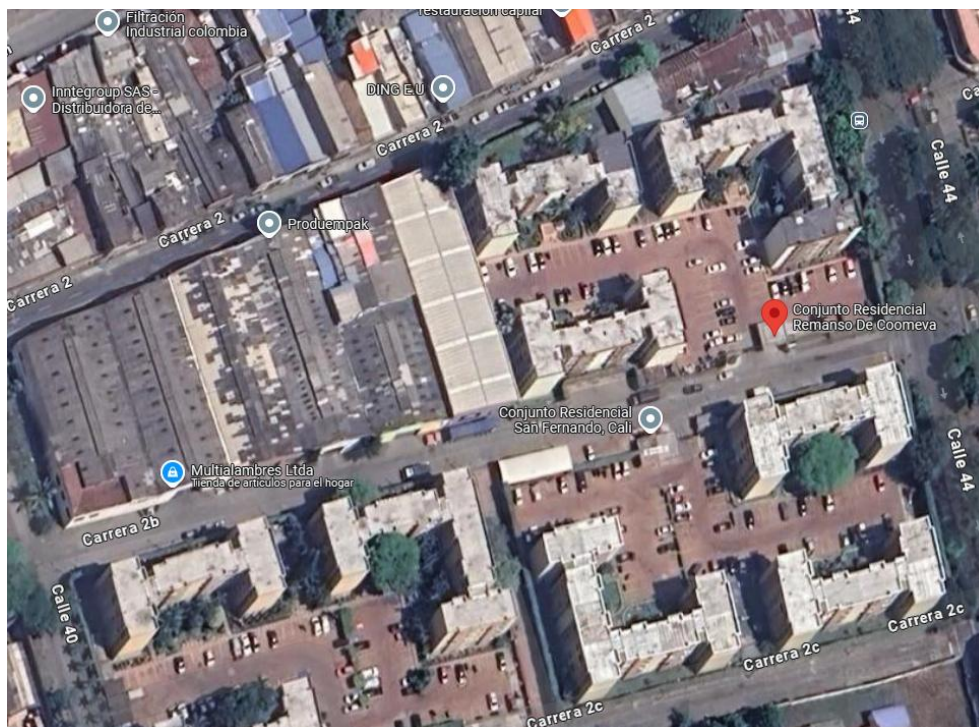


Figura 8. Localización del estudio de caso (tomada de: <https://maps.app.goo.gl/GvSPyv8ECQYLR2zdA>).

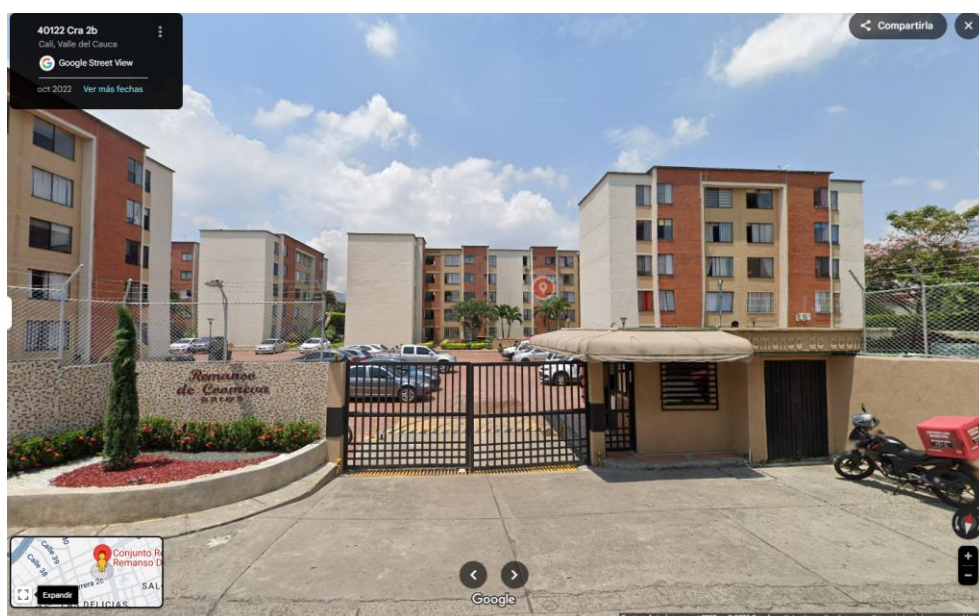


Figura 9. Vista general del CRRC (tomado de: <https://maps.app.goo.gl/uvCiQBMq9tC4kAAh9>).

3.1. Problemas geotécnicos del estudio de caso

En el análisis de los problemas de estudio de caso consideraron dos momentos. El primer momento consistió en el análisis de información secundaria, a partir de los documentos producidos en el diagnóstico de la empresa Alma Ingeniería SAS, así como la información radicada en la Secretaría de Planeación de la Alcaldía Mayor de Santiago de Cali, a partir de documentos solicitados como: la licencia de construcción, los planos arquitectónicos y estructurales. En un segundo momento se llevaron a cabo una serie de visitas al estudio de caso para identificar de forma cualitativa los daños visibles en las edificaciones.

Los daños visibles en viviendas y edificios pueden clasificarse en tres categorías generales: estéticos, de servicio y estructurales. Esta clasificación ha sido desarrollada y respaldada por diversos investigadores a lo largo del tiempo, incluyendo a Skempton y MacDonald (1956), Bromhead (1984), Boscardin y Cording (1989), y Feld y Carper (1997). A continuación, se presenta un resumen de sus aportes:

- Skempton y MacDonald (1956), analizaron registros de aproximadamente 100 edificios, correlacionando los daños observados con la distorsión angular (δ/L). Concluyeron que las grietas comienzan a aparecer cuando δ/L supera $1/300$, recomendando un diseño que limite esta distorsión a $1/500$. Además, señalaron que los daños estructurales significativos ocurren cuando δ/L excede $1/150$.
- Bromhead (1984), trabajó en la evaluación de daños en edificaciones, y sus hallazgos han sido adoptados por instituciones como el Institution of Structural Engineers y el Building Research Establishment (BRE).
- Boscardin y Cording (1989), propusieron una metodología para evaluar el riesgo de daños en edificaciones debido a movimientos del suelo, especialmente en respuesta a excavaciones. Su clasificación de daños se basa en la relación entre la distorsión angular y la deformación horizontal, estableciendo categorías que van desde daños insignificantes hasta daños severos.

- Feld y Carper (1997), analizan diversas fallas en la construcción, incluyendo aquellas relacionadas con problemas geotécnicos. Destacan la importancia de comprender las causas fundamentales de las fallas para prevenir futuros incidentes, y abordan temas como fallas técnicas, procedimentales, estructurales y no estructurales, así como problemas relacionados con el suelo y las cimentaciones.

En conjunto, estos estudios proporcionan un marco integral para la evaluación y clasificación de daños en edificaciones, considerando tanto los aspectos estructurales como los geotécnicos. Como referencias puntuales se empleará la clasificación de daños de Burland (1977) mostrada en la Tabla 1 y la clasificación de grietas y fisuras de Audell (1996).

Tabla 5. Clasificación de daños producidos en edificios según Burland (1977).

Categoría de daño	Clase de daño	Descripción de daños	Apertura de las fisuras y grietas (mm)	Deformación unitaria límite (ε_{lim}) (%)
0	Inapreciables	Grietas capilares menores a 0.1 mm.	<0.1	0 - 0.05
1	Muy ligeros	Grietas finas fácilmente tratables durante la decoración normal.	<1.0	0.05 - 0.075
2	Ligeros	Grietas que requieren relleno; posible redecoración.	<5.0	0.075 - 0.15
3	Moderados	Grietas que requieren apertura y reparación por un albañil; posible reemplazo de pequeñas secciones de mampostería.	<5 a 15 (muchas grietas con apertura superior a 3mm)	0.15 - 0.3
4	Severos	Reparaciones extensas, incluyendo reemplazo de secciones de paredes; distorsión de marcos de puertas y ventanas.	15 a 25	
5	Muy severos	Reparaciones mayores que pueden implicar reconstrucción parcial o total; riesgo de inestabilidad estructural.	>25	

Vale la pena destacar que las categorías 0, 1 y 2 se consideran daños estéticos, las categorías 3 y 4 se asocian con daños funcionales que afectan la habitabilidad, y la categoría 5 corresponde a daños estructurales graves que comprometen la estabilidad del edificio.

Para los patrones de fisuras en viviendas propuesto por Harry Audell (1996), el cual es un esquema modelo de nomenclatura y clasificación taxonómica geotécnica de patrones de fisuramiento, introducido con el propósito de nombrar y describir fisuras en paredes y losas. En lo referente a la clasificación de las fisuras se utilizó el sistema de Audell (1996), el cual clasifica el patrón de discontinuidades, así como su respectiva nomenclatura, denotada por las letras entre paréntesis y denominadas por sus siglas en inglés de acuerdo con la propuesta original, se basa en:

1. La causa probable del movimiento del terreno, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico son el asentamiento (N), expansión (R), deslizamientos, empujes y reptación (P), movimientos sísmicos (S), o causas geotécnicas no definidas (U).
2. La orientación de la discontinuidad, destacándose en paredes las tendencias verticales (V), diagonales (D) y horizontales (H), por otro lado, en los pisos las propensiones más comunes son paralelas (P), oblicuas (O) y radiales (R).
3. El tipo de esfuerzo aplicado ya sea a tensión (T), por corte (S) o compresión (C).
4. El tipo de discontinuidad, de acuerdo con la separación, es decir, si es menor o igual a 2 mm es fisura, de lo contrario es una grieta.

La clasificación de cada discontinuidad se efectuará con el orden secuencial de estas siglas de cada una de estas categorías, es decir, la primera letra denotará la causa probable del movimiento del terreno, la segunda dirá la orientación de la discontinuidad, la tercera mostrará el tipo de presión aplicada y la última clasificará el tipo de discontinuidad. Clasificación que se incluirá en un formato que contempla la guía que se presenta en la Figura 10.

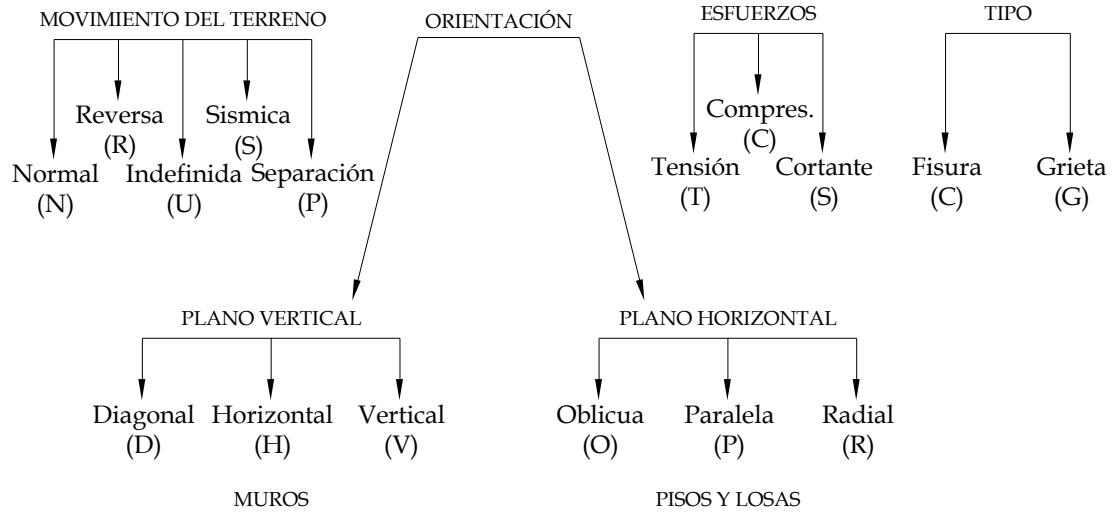


Figura 10. Esquema general de clasificación de grietas y fisuras en pisos y muros (Audell, 1996).

3.2. Estimación de los efectos negativos en función del costo

La estimación de los efectos negativos en función del costo se analizará considerando al menos tres componentes como se plantea en la ecuación (1):

$$FC = CC + CR + OC \quad (1)$$

donde, FC = es la función de costos; CC = son los costos de construcción u obra civil; CR = son los costos de reparación; y OC = son otros costos como los de consultoría, arriendos y traslados de los habitantes de la edificación. Todos los valores fueron calculados teniendo como base el año en curso, es decir 2025.

Los costos de construcción CC corresponden a índices de precios en función del m^2 construido para los acabados y el sector donde se desarrolló el proyecto. Para ello se revisaron precios actuales de venta en el sector (ver Tabla 2) y se estimaron los costos directos de construcción (60% – 70%) de acuerdo con el DANE (2025) en los Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC).

Tabla 6. Base de precios de costos de construcción para proyectos similares en Santiago de Cali.

Barrio del proyecto	Área por unidad de vivienda (m ²)	Precio comercial (COP)	Costo por metro cuadrado (\$/m ²)
Los Ocobos	60	\$ 230.000.000	\$ 3.833.333
Salomia	75	\$ 280.000.000	\$ 3.733.333
Las Delicias	70	\$ 250.000.000	\$ 3.571.429
Manzanares	70	\$ 180.000.000	\$ 2.571.429
Jorge Isaacs	75	\$ 165.000.000	\$ 2.200.000
La Esmeralda	75	\$ 150.000.000	\$ 2.000.000
Popular	80	\$ 180.000.000	\$ 2.250.000
Barranquilla	65	\$ 160.000.000	\$ 2.461.538
Número de datos			8
HCV			\$ 3.833.333
LCV			\$ 2.000.000
Ns			2,847
Media			\$ 2.827.633
Desviación estándar			\$ 643.953
COV (%)			23

Ns es el número de desviaciones estándar para cubrir el rango de datos suponiendo una función de distribución normal.

La estimación de los costos de reparación *CR* se llevó a cabo mediante el análisis del procedimiento constructivo apoyado en el Director de Proyectos de la empresa Soluciones de Ingeniería Ingesol SAS, con el cual se estableció el procedimiento constructivo y la propuesta económica respectiva basada en las recomendaciones del ingeniero geotecnista que diagnosticó el problema. Las bases para el cálculo de servicios profesionales asociados con consultoría se presentan en las Tablas 3 a 5.

Tabla 7. Base de precios de exploración de campo.

Descripción	Unidad	AIE	Acueducto de Bogotá	PUJ Cali	PUJ Bogotá	Universidad EAFIT
Apique manual 0 m a 3 m	ml	\$110.948				
Sondeo manual 0 m a 2 m	ml	\$50.431				
Sondeo con barreno 0 m a 3 m	ml	\$70.603				
Perforación mecánica por rotación en roca	ml					

Descripción	Unidad	AIE	Acueducto de Bogotá	PUJ Cali	PUJ Bogotá	Universidad EAFIT
Perforación mecánica por rotación en coluvión	ml					
Perforación percusión (SPT)	ml	\$151.293				
Ejecución de ensayo de veleta en campo	ml	\$200.000				
Muestra alterada bolsa	un	\$10.086	\$197.963	\$145.804	\$132.838	\$207.226
Muestra en tubo Shelby	un	\$28.241	\$197.963	\$145.804	\$132.838	\$207.226
Muestra inalterada en anillo	un	\$30.259	\$197.963	\$145.804	\$132.838	\$207.226
Muestra inalterada de Cajón	un	\$117.000	\$197.963	\$145.804	\$132.838	\$207.226
Transporte Equipo	GL	\$60.000				
Transporte Muestras	GL					

Nota: AIE = Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia.

Tabla 8. Base de precios para ensayos de laboratorio.

Descripción	Unidad	AIE	UniAndes*	Acueducto de Bogotá	PUJ Cali	PUJ Bogotá	IDU Bogotá*
Contenido de humedad natural	un	\$20.172	\$48.000	\$22.969	\$49.688	\$21.794	\$20.420
Peso unitario del suelo - densidad	un	\$30.259	\$36.000	\$47.953	\$70.866	\$96.629	\$42.543
Gravedad específica	un	\$90.776	\$105.000	\$89.993	\$135.215	\$96.629	\$90.090
Lavado sobre malla #200	un	\$98.845	\$79.000	\$102.290	\$67.608	\$131.801	\$54.454
Granulometría por tamizado	un	\$114.983	\$99.000	\$175.706	\$108.335	\$131.801	
Granulometría por hidrómetro	un	\$254.172	\$157.000	\$175.706	\$140.917	\$285.395	\$171.600
Límites plástico y líquido	un	\$127.086	\$97.000	\$74.713	\$57.019	\$85.100	\$81.511
Límite de contracción	un	\$98.845	\$141.000	\$86.013	\$57.019	\$85.100	
Resistencia a la compresión simple	un	\$161.379	\$129.000	\$104.042	\$80.640	\$99.629	
Resistencia al corte directo CU	un						\$654.304
Resistencia al corte directo CD	un	\$450.208	\$1.818.000	\$644.826	\$481.399	\$832.326	\$810.810
Consolidación rápida (Taylor)	un	\$756.466	\$457.000	\$399.160	\$1.136.297	\$942.322	\$340.340
Consolidación	un	\$1.354.376	\$854.000	\$1.007.254	\$1.649.464	\$2.566.479	
Expansión controlada	un	\$1.350.000	\$854.000	\$208.426	\$224.001	\$365.306	

Nota: AIE = Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia.

Tabla 9. Base para el cálculo de honorarios profesionales

Descripción	Unidad	AIE	PUJ Cali	PUJ Bogotá
Auxiliar de Campo	hr	\$25.075	\$25.396	\$41.392
Dibujante	hr	\$44.564		
Auxiliar de Ingeniería	hr	\$33.042		
Ingeniero Civil Estructural	hr	\$72.934		
Ingeniero Civil Geotecnista	hr	\$77.964	\$45.353	\$55.638
Consultor Interno (M Sc. - Ph D)	hr	\$108.144		
Geologo Campo	hr	\$64.551	\$45.373	\$55.638
Geologo Fotointerpretación	hr	\$57.844		

Nota: AIE = Asociación de Ingenieros Estructurales de Antioquia.

3.3. Relación entre los efectos negativos y el cumplimiento normativo

Debido a la imposibilidad de contar con el estudio geotécnico presentado con la licencia, por no ser obligatorio en el momento del trámite, el análisis del cumplimiento normativo se hará sobre el estudio geotécnico presentado por Alma Ingeniería SAS a partir del análisis mediante el cumplimiento de los aspectos normativos mostrados en la Tabla 6.

Tabla 10. Lista de chequeo para la verificación del cumplimiento normativo basada en el Título H de la NSR-10.

Descripción	Cumplimiento	Observación
H.3.1. Unidad de construcción		
H.3.2.5. Profundidad de los sondeos		
H.3.3.3.1 Propiedades de los suelos		
H.2.4. Factores de seguridad		
H.2.2.2.1. Contenido, del subsuelo		
H.2.2.2.1. Contenido, recomendaciones para diseño, perfil de diseño sísmico		
H.2.2.2.1. Contenido, recomendaciones para diseño, tipo de cimentación y asentamientos		
H.4.2.1 Estados límites de falla, cimentaciones superficiales		
H.4.2.2. Estados límites de servicio, cimentaciones superficiales		
H.9.1. Suelos expansivos		

4. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos a partir del estudio de caso, así como su análisis desde la perspectiva técnica, normativa y económica. Los hallazgos permiten evidenciar la magnitud de los impactos negativos derivados de condiciones geotécnicas inadecuadamente abordadas durante la fase de diseño y construcción. Asimismo, se cuantifican los costos asociados a las intervenciones correctivas y se evalúa el grado de cumplimiento de la normativa sismo resistente vigente, en particular lo establecido en el Título H de la NSR-10. El análisis integral aquí expuesto permite establecer relaciones directas entre el comportamiento del terreno, las decisiones técnicas adoptadas y las consecuencias observadas en el ciclo de vida del proyecto.

4.1. Caracterización de los problemas geotécnicos del estudio de caso

Tal como se mencionó en la metodología la caracterización de los problemas geotécnicos consideraron dos momentos: i) análisis de información secundaria, y ii) trabajo de campo e identificación de las patologías existentes.

4.1.1. Análisis de la información secundaria del estudio de caso

De acuerdo con Alma Ingeniería SAS (2016), el CRRC se encuentra sobre la Zona 4B Abanico Distal de Cali (ver Figura 11). Esta zona se caracteriza por la presencia de una capa superficial de arcillas limosas con un espesor entre 10 y 15 m, que suprayace una serie de intercalaciones de materiales gravosos de varios metros de espesor compuesto por grandes cantos y bloques, en su mayoría subredondeados, con capas de arcillas de 10 m de espesor en promedio. Según el Consultor, el sector se encuentra emplazado sobre antiguas ciénagas y madre viejas del Río Cali, que fueron desecadas y rellenadas en el proceso antrópico de Urbanización del Norte de Cali que no es cartografiado en el trabajo de Microzonificación Sísmica de Cali.



Figura 11. Formaciones geológicas superficiales en inmediaciones del estudio de caso (modificado de Ingeominas, 2005).

A partir de la exploración geotécnica y los ensayos de campo y laboratorio se identificaron cuatro horizontes de suelo (ver Figura 12). El primer horizonte corresponde a rellenos heterogéneos limo-arenosos con escombros y capas de material tipo “roca-muerta”, horizonte que está por encima del nivel de desplante de las cimentaciones, que corresponde a 1m de profundidad. En el segundo horizonte, denominado B1, se encuentran desplantadas las cimentaciones, este suelo se caracteriza por la presencia de limos arcillosos de alta plasticidad y de consistencia media (con una resistencia a la penetración estándar, SPT, que osciló entre los 8 y 16 golpes/píe) y una humedad natural cercana al límite plástico y una expansión libre en probeta que excede el 100%, una resistencia a la compresión inconfiada (q_u) entre 90 y 140 kPa. Este suelo es seguido por un horizonte denominado B2, el cual se caracteriza por la presencia de limos arcillosos de alta plasticidad con trazas de arena de consistencia es dura (N SPT entre 11 y 49 golpes/pie) y su humedad natural está cercana al límite plástico con resistencia a la compresión inconfiada (q_u) de 180kPa. Finalmente, se identificó un suelo denominado C, que se caracteriza por la presencia de gravas con arenas.

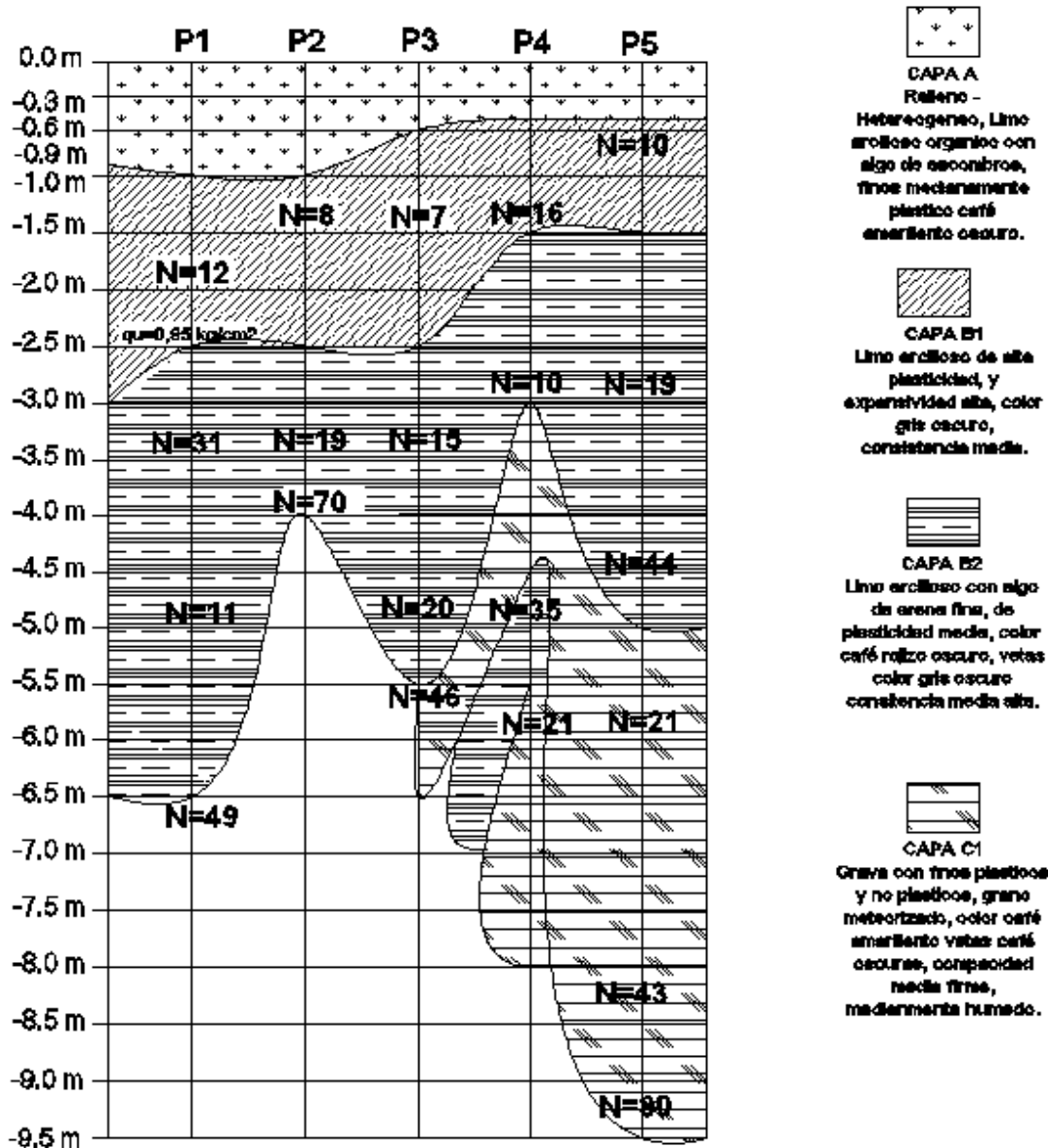


Figura 12. Horizontes de suelo encontrados (Alma Ingeniería SAS, 2016).

En la Figura 13 se presentan los resultados derivados de los límites de consistencia en la Carta de Plasticidad, en ella es posible evidenciar que, aunque los resultados de mayor frecuencia se localizan por encima del límite líquido superior a 50 que corresponden a materiales de alta plasticidad, la mayoría de los resultados, en especial para el horizonte B1 están por debajo de la línea A que corresponden a minerales de arcilla de menor potencial de expansión como las caolinitas. El consultor considerando que más del 83% de los ensayos en el horizonte B1 superan un límite líquido de 63 y un índice de plasticidad de 32 catalogaron los suelos con alto potencial de expansión.

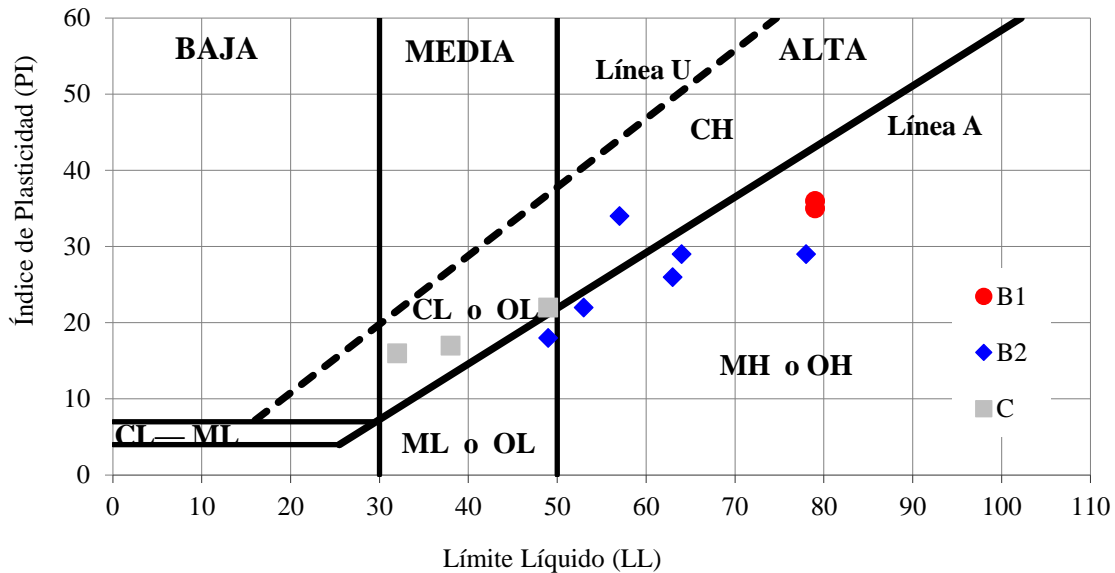


Figura 13. Carta de plasticidad de los resultados reportados por cada horizonte de suelo (Modificada de Alma Ingeniería SAS, 2016).

A partir de los resultados anteriores el Consultor concluyó que:

- Las edificaciones están apoyadas sobre materiales de la Capa B1, conformados por limos arcillosos de alta plasticidad, consistencia media.
- El potencial contracto-expansivo de los materiales es alto, según la clasificación de Holtz y Gibbs.
- El suelo pierde agua, por ende, disminuye su volumen y las edificaciones con apoyo sobre estos materiales se asientan.
- Esta patología es relativamente normal para sectores con este tipo de suelos y recurrente con temporadas secas largas (como la actual). Y no compromete la estabilidad estructural.
- Tomando como evidencia el trabajo de campo, El Consultor, describe la situación como un problema de patología estructural de los edificios de las Torres C, D, E, F y G que ha presentado desplomes en los puntos fijos y torres (ver Figura 14).
- La sospecha de que el predio está localizado sobre antiguos humedales, fue corroborada con los ensayos de laboratorio analizados, además, la coloración

oscura indica una depositación lenta, la expansión libre en probeta de los materiales superficiales, supera el 100%.

- A esta susceptibilidad, se adiciona la presencia en la zona de influencia de la edificación de árboles de gran altura y con muy buena capacidad de succión en su sistema radicular. Por esta razón, el problema se manifiesta con mayor severidad hacia las zonas verdes.
- En algunas perforaciones se detectó un nivel freático “colgado”, que puede indicar una fuga en redes o en tanques de almacenamiento.
- Los asentamientos diferenciales no son ocasionados por deformación de los elementos estructurales o de la cimentación, son debidos a los movimientos estacionales del sub-suelo.
- Estos movimientos estacionales son causados por las variaciones de humedad, sobre todo tras períodos largos de verano (como los de años pasados).



Figura 14. Dilataciones y desplomen entre bloques y puntos-fijos (Alma Ingeniería SAS, 2016).

El mismo Consultor concluye que, para solucionar la patología presentada, entonces, se tienen que acometer tres actividades principales:

- La cimentación actual deberá llevarse más allá de los suelos susceptibles de moverse estacionalmente, que, en este caso, alcanzan profundidades entre 5 y 6 m, donde se detectan gravas limosas de compacidad densa.
- Para tal fin, se deberán utilizar micro-pilotes integrados a la cimentación actual, llevados a una profundidad de -6.0 m.
- La porción superior de los micro-pilotes deberá separarse del terreno natural en sus primeros 2.0 m, mediante una camisa en PVC.
- Como segunda medida, se deberá proceder a controlar la afectación de los árboles de las zonas verdes: phycus, baladecañón, limón swinglea, etc. La solución definitiva consiste en la tala de los especímenes (solicitando los respectivos permisos ante el DAGMA) y una arborización compensatoria. Para su selección se debe acudir a la Guía de Arboles Urbanos del DAGMA, disponible en <https://www.cali.gov.co/documentos/1150/arborizacion-dagma/>.
- La segunda opción es suspender la influencia de las raíces en el sector aledaño a la edificación, construyendo una barrera en concreto o mampostería, enterrada por lo menos 1.0 m por debajo del nivel de cimentación (que en este caso es del orden de los 1.5 m).
- La tercera medida de mitigación y control consiste en la revisión de la totalidad de las redes hidro-sanitarias y los tanques de almacenamiento a fin de detectar fugas que puedan estar aportando agua en exceso al sub-suelo.
- Durante la excavación de los apiques para determinar tipo y profundidad de cimentación, se detectaron tuberías en arcilla cocida o “gress”. Este tipo de tubería es rígido y no puede asumir los movimientos del suelo (principalmente los de la Capa B, de alto contenido orgánico y plasticidad muy alta).
- Se recomienda la inspección de la red de acueducto y alcantarillado, y considerar su reemplazo por tuberías en PVC con uniones flexibles.

4.1.2. Identificación de las patologías presentes en la actualidad en el estudio de caso

A partir del trabajo de campo efectuado durante el primer semestre de 2025 se verificaron las patologías presentes en las edificaciones las cuales fueron descritas como

desplomes en los puntos fijos y torres C, D, E, F y G, según la localización mostrada en la Figura 15. Para el momento de campo los daños fueron identificados en las torres F y G, concentrados en los puntos fijos y próximos a ellos.

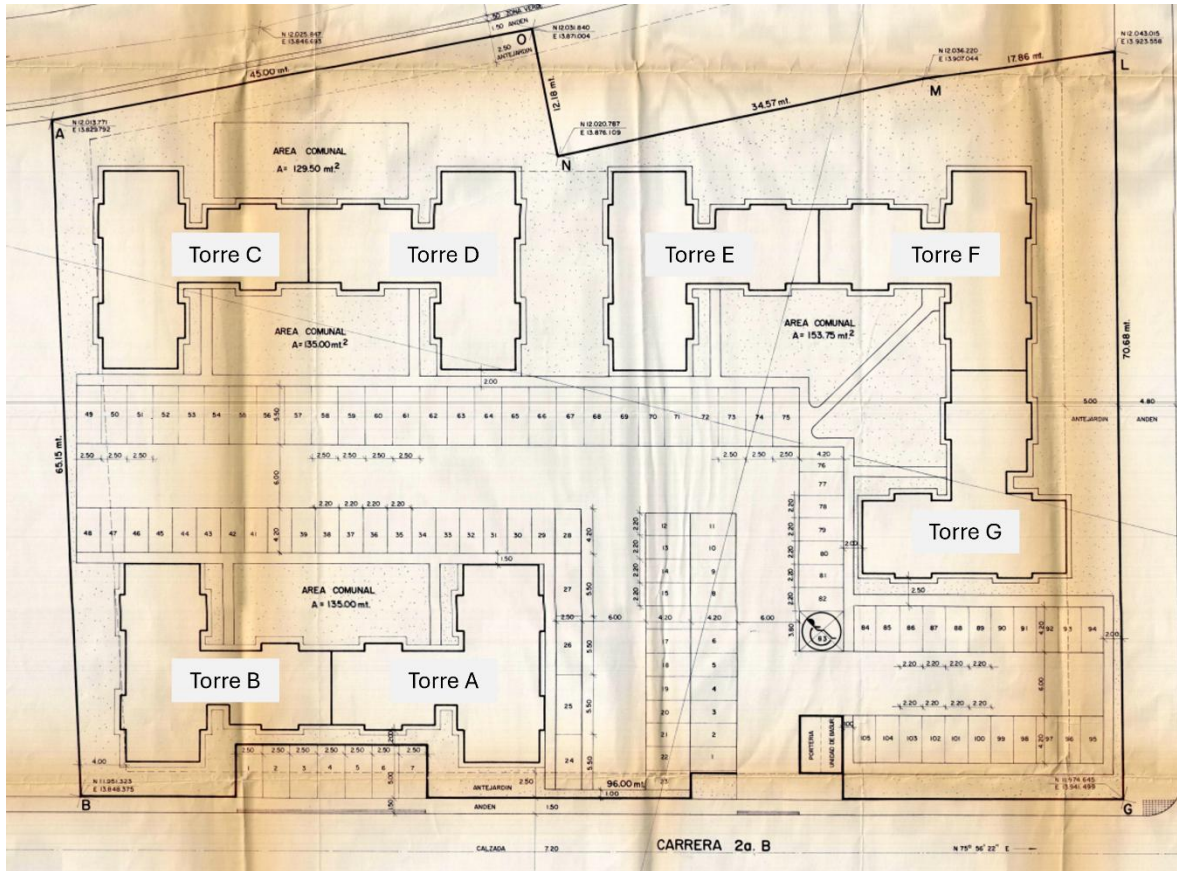


Figura 15. Distribución en planta de las torres del caso de estudio (modificado de Planeación Municipal).

En la Figura 16 se muestra la distribución de los apartamentos 101 a 103 en la Torre F alrededor del punto fijo. A partir de la autorización de acceso de los propietarios se inspeccionaron los apartamentos 102 F, 103 F, 401 F, 503 F y 303 G, obteniendo los resultados que se detalla a continuación:

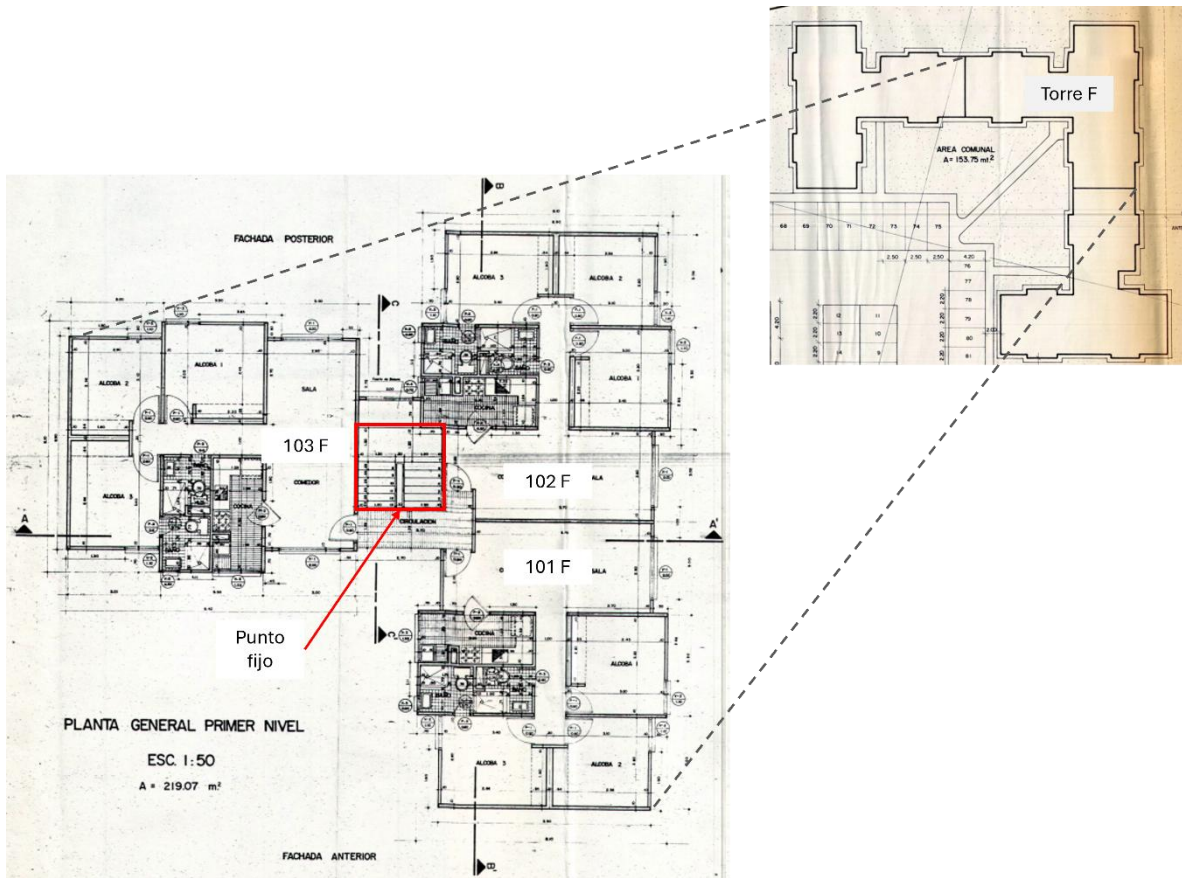


Figura 16. Distribución de los apartamentos y punto fijo para la Torre F (modificado de Planeación Municipal).

Inspección del punto fijo de la Torre F

En la visita se inspecciono el inmueble en su totalidad, no hay evidencia de daños, presencia de humedades, olores desagradables a causa de tuberías de aguas residuales deterioradas, en el área del pasillo ubicada en la zona común se evidencian una luz a causa de la discontinuidad de la mampostería como se ilustra en la Figura 17.

La patología mostrada en la Figura 17 del punto fijo de la Torre F se clasifica como UVTG, y corresponde a:

- **Causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como causas geotécnicas no definidas (U).

- **La orientación de la discontinuidad**, en la Figura 17 muestra tendencia vertical en los muros (**V**).
- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tracción (**T**).
- **El tipo de discontinuidad**, de acuerdo con la separación es una grieta (**G**).

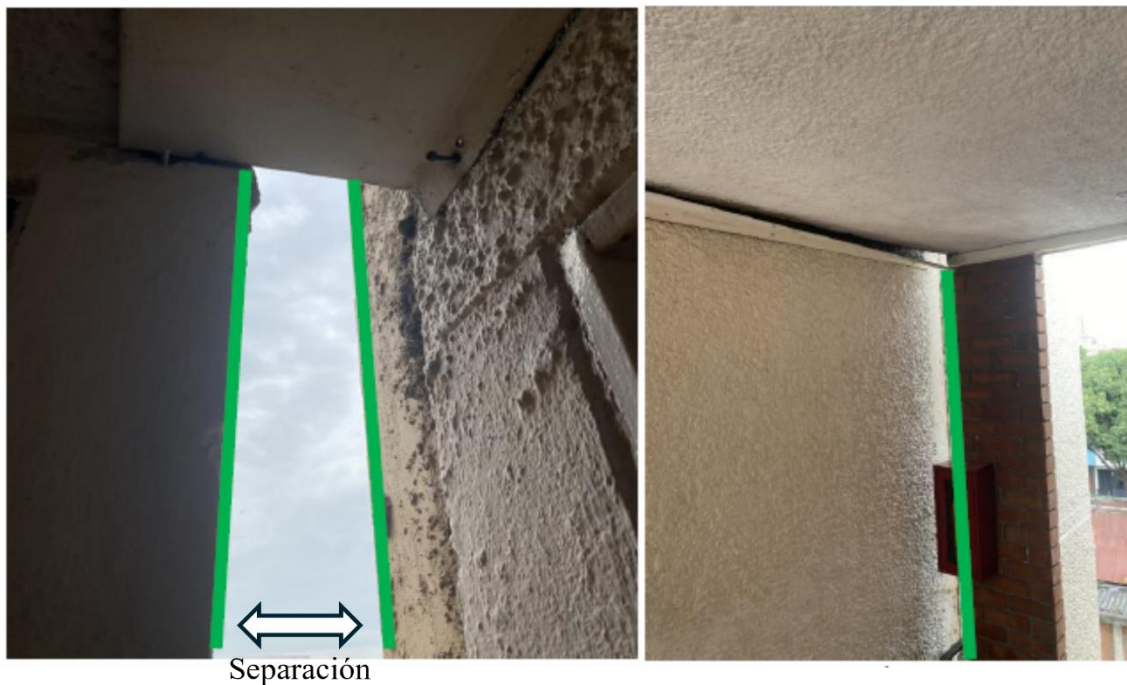


Figura 17. Patologías en los pisos 1 y 2 del punto fijo de la Torre F.

En la parte alta de la torre F, se evidencia que la dilatación incrementa, la separación de la mampostería tiene 50 cm como se observa en la Figura 18. La patología del quinto piso en el punto fijo de la Torre F se clasifica como UVTG, y corresponde a:

- **Causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como causas geotécnicas no definidas (**U**).
- **La orientación de la discontinuidad**, en la Figura 18 se destaca en los muros las tendencias verticales (**V**).

- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tracción (**T**).
- **El tipo de discontinuidad**, de acuerdo con la separación es una grieta (**G**).



a) Quinto piso Torre F

b) Quinto piso Torre F

Figura 18. Patologías en el quinto piso del punto fijo de la Torre F.

La parte exterior de la fachada de la torre F en la parte alta contigua a los apartamentos del 5 piso, se puede apreciar la Figura 19 que no hay fisuras ni agrietamientos, toda la mampostería conserva el nivel, la estructura de concreto del edificio es la que presenta la separación con relación al punto fijo.

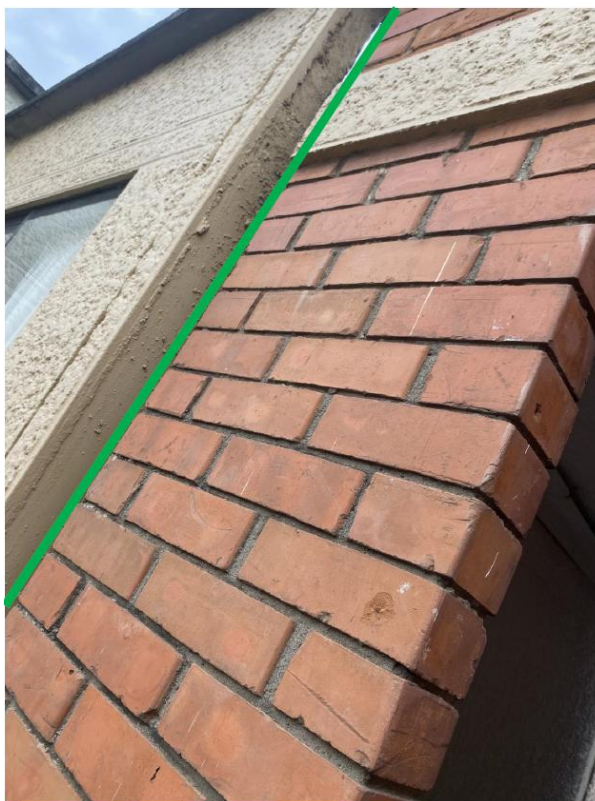


Figura 19. Patologías en el quinto piso del punto fijo de la Torre F.

En la zona del punto fijo que comparten los apartamentos del primero piso de la torre F se aprecia una grieta en piso, ver Figura 20. El tipo de agrietamiento que se aprecia es:

- **La causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como un asentamiento normal (**N**).
- **La orientación de la discontinuidad**, en la imagen 1 se clasifican los pisos, las propensiones más comunes son oblicuas (**O**).
- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tensión o tracción (**T**).
- El tipo de discontinuidad, de acuerdo a la separación es una grieta (**G**).



a) Primer piso Torre F



b) Primer piso Torre F

Figura 20. Patologías en el punto fijo del primer piso de la Torre F.

Inspección del apartamento 102 F

En el apartamento 102 F no se presentan síntomas observables en la estructura, los muros internos divisorios no presentan afectaciones, sin embargo, hay una evidencia en pisos (ver Figura 9), en términos generales está afectada en el piso de forma oblicua rompiendo las piezas de cerámica, este síntoma, de acuerdo con los propietarios es reciente, hace menos de un año.

Esta patología del apartamento 102 F se clasifica como NOTG, y corresponde a:

- **Causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como un asentamiento normal (**N**).
- **La orientación de la discontinuidad**, en la Figura 17 se clasifican los pisos, las propensiones más comunes son oblicuas (**O**).
- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tensión o tracción (**T**).
- **El tipo de discontinuidad**, de acuerdo a la separación es una grieta (**G**).



Figura 21. Evidencias de patología en el apartamento 102 F.

Inspección del apartamento 103 F

Apartamento F 103: el inmueble no presenta fisuras, no hay evidencias de daños estructurales, no existe presencia de agrietamientos, se conserva en buen estado.



Figura 22. Evidencias de patología en el apartamento 103 F.

Inspección del apartamento 401 F

Apartamento F 401: el inmueble presenta fisuras sobre las esquinas de las puertas, puerta de habitaciones y baño, no hay evidencias de daños estructurales, no existe presencia de agrietamientos, los enchapes de baño, cocina y pisos no presentan daños, se conserva en buen estado.



Figura 23. Evidencias de patologías en el apartamento 401 F.

Esta patología del apartamento 401 F se clasifica como UVTG, y corresponde a:

- **Causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como causa de asentamiento no definida (**U**).
- **La orientación de la discontinuidad**, en la Figura 11 se clasifican comúnmente en muros, las propensiones más comunes son verticales (**V**).
- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tensión o tracción (**T**).
- **El tipo de discontinuidad**, de acuerdo a la separación es una grieta (**G**).

Inspección del apartamento 503 F

El apartamento 503 F: el inmueble presenta fisuras en el área como se aprecia en la figura 12 del cielo falso, hay evidencias de daños en muros como se indica en la figura 13, no hay evidencias de daños estructurales, no existe presencia de agrietamientos, los enchapes de baño, cocina y pisos no presentan daños, se conserva en buen estado.



a) muro en dirección de la fachada

b) muro habitación auxiliar

Figura 24. Patologías del apartamento 503 F.

Esta patología del apartamento 503 F se clasifica como UVTG, y corresponde a:

- **Causa probable del movimiento del terreno**, en donde los procesos superficiales más comunes que influyen en el comportamiento geotécnico se definen como causa de asentamiento no definida (**U**).
- **La orientación de la discontinuidad**, en la Figura 24 se clasifican comúnmente en muros en zonas bajas y altas, las propensiones más comunes son verticales (**V**).
- **El tipo de presión aplicada**, es a causa de tensión o tracción (**T**).
- **El tipo de discontinuidad**, de acuerdo a la separación es una grieta (**G**).

Inspección del apartamento 503 G

Apartamento G 303: el inmueble no presenta fisuras en la estructura, los muros internos divisorios no presentan afectaciones, no hay evidencias de daños, no existe presencia de agrietamientos, se conserva en buen estado.



Figura 25. Evidencias de patología en el apartamento 303 G.

Patologías de la Torre F apartamento 102, 103, 401 y 503

En la Torre F del conjunto Remansos de Coomeva, se identificaron diferentes tipos de agrietamientos en los apartamentos inspeccionados, clasificados según la metodología de Audell (1996), lo cual permite entender de manera más precisa las causas, características y mecanismos de daño. La Torre G, en cambio, no presentó síntomas relevantes de patología en el único apartamento evaluado (303G). En la Tabla 11 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 11. Distribución de las patologías en función del nivel.

Nivel de la estructura	Clasificación de agrietamiento	Orientación de grietas
5° Piso 503 F	UVTG Notorias en Muros	Vertical
4° Piso 401 F	UVTG Notorias en Muros	Vertical
3° Piso	UVTG Notorias en Muros	Vertical
2° Piso	UVTG Notorias en Muros	Vertical
1° Piso 102 F y 103 F	NOTG Notorias en sobre piso	Horizontal

De acuerdo con lo anterior, las grietas identificadas en los apartamentos del primer piso (102 y 103) son horizontales sobre el sobrepiso y se asocian con asentamientos

diferenciales del terreno (N) y esfuerzos de tracción. Estas fisuras podrían deberse a la consolidación del terreno de fundación o a deformaciones en la losa de entrepiso

La clasificación de las grietas verticales en muros desde el 2° al 5° piso sugieren la presencia de esfuerzos de tracción posiblemente originados por movimientos diferenciales del terreno o asentamientos irregulares, cuya causa aún no está definida con claridad (U). Su alineamiento vertical y repetitivo sugiere una distribución estructural del daño que podría estar relacionado con la interacción entre elementos no estructurales (muros divisorios o tabiques) y la estructura principal. Las fotografías muestran grietas verticales bien definidas en la junta entre el muro de fachada y el punto fijo, con un aumento progresivo de la separación en los pisos superiores, lo que sugiere un fenómeno de rotación o desplazamiento diferencial del punto fijo con relación a la estructura. Este comportamiento, en conjunto con las observaciones previas, permite concluir lo siguiente:

- Las grietas horizontales sólo se presentan en el primer piso, y están concentradas en el punto fijo y cercanas a él.
- El patrón de fisuramiento vertical muestra que las grietas tienden a abrirse más conforme se asciende en los niveles del edificio, lo cual es un indicador típico de asentamientos diferenciales en la cimentación, que por los daños se concentran en el punto fijo. Este tipo de daño suele producirse cuando una parte de la estructura (por ejemplo, un eje de columnas o una franja de cimentación) se asienta más que otra, generando esfuerzos de tracción en los elementos no estructurales como los tabiques, los cuales no están diseñados para resistir deformaciones diferenciales.
- Es evidente el desacople entre estructura y el punto fijo. Las grietas se localizan en las uniones entre muros de ladrillo y otros materiales (como concreto o placas metálicas), lo cual evidencia pérdida de adherencia o desplazamiento relativo, otro síntoma de movimiento en la base del edificio.

Adicionalmente, las evidencias fotográficas, en conjunto con el patrón de grietas verticales repetitivas y su incremento en altura, apoyan la hipótesis de un asentamiento diferencial progresivo en el sistema de cimentación. Este movimiento ha generado esfuerzos de tracción en los tabiques, los cuales se expresan como grietas verticales en las uniones con

elementos estructurales. El comportamiento detectado es coherente con una condición patológica que podría agravarse si no se estabilizan las condiciones del terreno o si no se mitiga la deformación diferencial mediante intervención estructural o correctiva.

Finalmente, el sistema de cimentación de las unidades de construcción, conformado por pilotes de 40 cm de diámetro y 6 m de longitud con aproximadamente 20 elementos (ver Figura 26), lo que confirma que se presenten desplazamientos entre las unidades de construcción y los puntos fijos y por ende los desplomes.

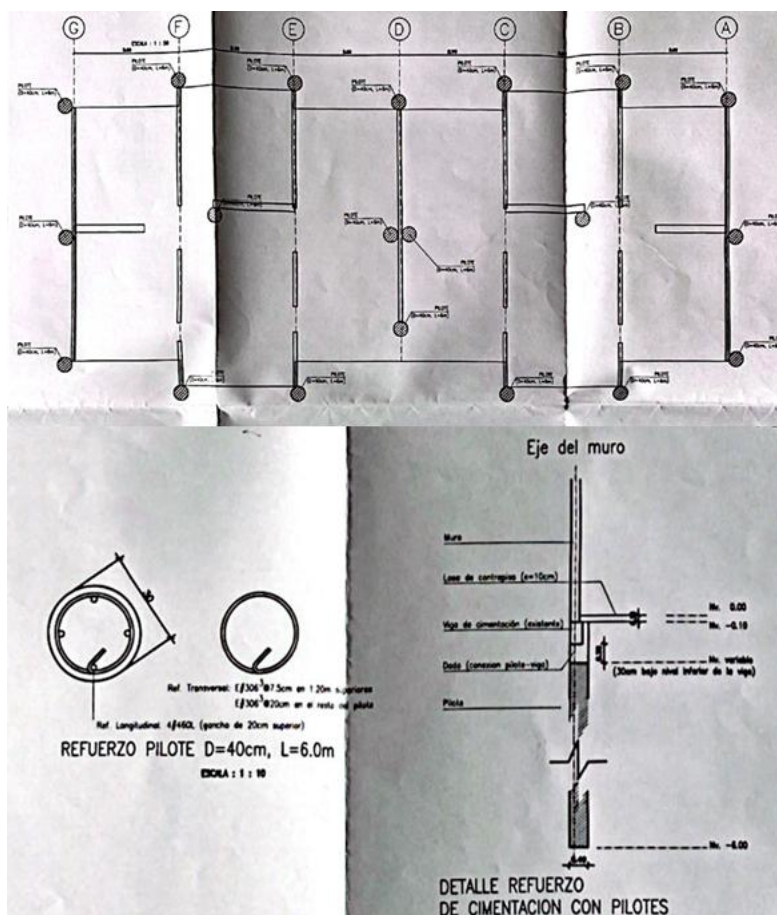


Figura 26. Distribución de pilotes en una unidad de construcción del estudio de caso (Alcandía de Santiago de Cali).

4.2. Estimación de los efectos negativos en función del costo

La manifestación de patologías estructurales en las torres del Conjunto Remansos de Coomeva conllevó no solo afectaciones funcionales y habitacionales, sino también impactos económicos significativos asociados a la necesidad de intervención correctiva.

4.2.1. Costo de reposición total

Tomando como base el área construida del conjunto (7.635,28 m²) y un valor de construcción ajustado de \$2.183.680 COP/m² —estimado a partir de datos estadísticos del entorno urbano—, el costo total estimado para reconstrucción completa asciende a:

- Costo de construcción (*CC*): \$16.675.452.230 COP
- Valor del terreno (6.540,02 m² × \$180.000 COP/m²): \$1.177.203.600 COP
- Total reposición física: \$17.852.655.830 COP

Este valor representa el costo de oportunidad en caso de una demolición y reconstrucción completa del conjunto habitacional.

4.2.2. Costo del reforzamiento estructural de la cimentación

El reforzamiento propuesto incluye la demolición localizada, instalación de micropilotes, reconstrucción parcial de vigas y pisos, y adecuaciones técnicas y arquitectónicas. El valor total asciende a:

- Costo de reparación (*CR*): \$613.351.456 COP

Equivalente al 3,7 % del costo de reposición total. En la Tabla 12 se presenta el detalle de los costos de reparación

Tabla 12. Estimación de los costos de reparación en función de la propuesta de corrección elaborada por el consultor.

Descripción de las actividades	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Preliminares				
Demolición de piso y vigas de cimentación sec. 30*30 aprox.	m ³	200	183.914	36.782.702
Excavaciones y Llenos				
Excavaciones menores varias a mano	m ³	200	65.500	13.100.000
Relleno en material granular seleccionado compactado al 95% del PM	m ³	240	62.408	14.977.920

Descripción de las actividades	Unidad	Cantidad	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)
Micropilote con inyección única global (IU) 21,9 cm de diámetro hasta 15 m de profundidad	ml	1.000	374.000	374.000.000
Estructuras en concreto				
Reforzamiento de pórtico viga cimentación por ML	ml	200	120.000	24.000.000
Corte y realce de cimentación para incrustar pilote por zapata	und	18	600.000	10.800.000
Vigas en concreto por ML	ml	18	120.000	2.160.000
Reconstrucción de vigas de cimentación 0,30*0,30 concreto 3000 PSI	m ³	18	664.290	11.957.220
Acero de refuerzo	kg	1.800	4.275	7.695.000
Retiro de material sobrante	m ³	260	42.693	11.100.180
Reconstrucción de pisos y acabados pisos apartamentos primer piso	m ²	50	104.250	5.212.500
Aseo General	gl	1	1.875.000	1.875.000
Retiro de vegetación y arborización	und	10	1.161.682	11.616.819
Entresuelo	m ²	50	27.035	1.351.751
Adecuaciones de funcionabilidad y estética por M2, reparación de zonas afectadas por demoliciones en zonas comunes.	m ²	100	67.200	6.720.000
Costo directo				533.349.092
Administración			8%	42.667.927
Utilidad			4%	21.333.964
Imprevistos			3%	16.000.473
Costo de reforzamiento CR				613.351.456

4.2.3. Otros costos técnicos asociados

A los costos de reparación se suman los costos técnicos asociados a estudios y diseños, tales como:

- Estudio geotécnico
- Diseño estructural del refuerzo
- Diseño hidrosanitario y revisión de redes

Estos conceptos representan un valor de \$148.831.714 COP, correspondiente al 0,8% del costo total estimado del proyecto.

4.2.4. Evaluación del efecto económico acumulado

El efecto económico total de las patologías estructurales identificadas puede valorarse como el costo conjunto de reparación más consultoría, es decir:

$$\text{Costo total por efectos negativos: } CR + OC = \$762.183.170 \text{ COP}$$

En comparación con el valor de reposición total, esto representa apenas 4,3 %, lo cual sugiere que, si bien el impacto técnico es relevante, el impacto financiero directo es contenido y manejable mediante una adecuada intervención de ingeniería.

4.3. Relación entre los efectos negativos y el cumplimiento normativo

Tal como se mencionó en el Capítulo anterior, se verifica de forma inicial el cumplimiento normativo según la NSR-10 para el estudio geotécnico presentado después de la aparición de la patología, el cual es resumido en la Tabla 7. En general, el estudio cumple parcialmente con los requisitos establecidos en la NSR-10, Título H. Si bien entrega una caracterización adecuada del suelo, presenta deficiencias normativas importantes en la definición de unidades de construcción, la clasificación por categoría, y sobre todo en el número mínimo de sondeos exigidos. Además, no se presenta explícitamente el análisis de capacidad portante ni su comparación con factores de seguridad, lo cual limita su validez como insumo completo para diseño estructural conforme a la norma.

Tabla 13. Análisis del cumplimiento normativo del estudio geotécnico presentado después de las patologías descritas según la NSR-10.

Descripción	Cumplimiento	Observación
H.3.1. Unidad de construcción	No cumple	Se describe adecuadamente la unidad en estudio: Torres C a G del conjunto Remansos de Coomeva, indicando su localización y estado patológico observado. Sin embargo, cada bloque tipo torre está conformado por dos módulos simétricos, usualmente rotulados como 101, 102, 103. Estos módulos están separados estructuralmente, cada uno con su núcleo de escaleras independiente, lo que indica

Descripción	Cumplimiento	Observación
		que se comportan como unidades estructurales autónomas. Por tanto, cada torre contiene dos unidades de construcción.
H.3.1.1 Clasificación de las unidades de construcción por categorías	No cumple	No hay sótanos ni sobrecargas especiales observadas. No se indican cargas específicas, pero por ser vivienda multifamiliar de baja altura, es razonable asumir cargas entre 801 y 4,000 kN, lo cual es típico para estructuras en concreto reforzado sin sobrecargas industriales ni estructuras especiales. Cada unidad de construcción del proyecto se clasifica como Categoría Media, según la Tabla H.3.1-1 de la NSR-10.
H.3.2.5. Número y profundidad de los sondeos	No cumple parcialmente	Se realizaron 5 perforaciones con profundidades entre 5.0 y 10.5 m. Cálculo de número de sondeos exigido: 1. ^a unidad: 3 sondeos 2. ^a a 10. ^a unidad (9 unidades): 50% de 3 = 1.5 → se aproxima a 2 sondeos por unidad × 9 = 18 sondeos Total requerido: 3 (inicial) + 18 (resto) = 21 sondeos
H.3.3.3.1 Propiedades de los suelos	✓ Cumple	El informe incluye los siguientes elementos ✓ Peso unitario: determinado en laboratorio por método ASTM D-2167. ✓ Humedad natural: reportada en todas las capas. ✓ Clasificación completa: granulometría (ASTM D-2487) y límites de Atterberg (ASTM D-4318). ✓ Resistencia: Suelos cohesivos: compresión confinada (qu) reportada por capa. Suelos granulares: SPT realizado en todos los sondeos con valores por profundidad.
H.2.4. Factores de seguridad	Se cumple parcialmente	El informe no presenta una capacidad portante admisible (qa) por lo que no es posible definir si en este aspecto se cumplen los factores de seguridad. Se incluyen factores de seguridad frente a licuación (mayores a 2.0) y se presentan parámetros para diseño (cohesión, peso unitario, ángulo de fricción, etc.).
H.2.2.2.1. Contenido, del subsuelo	✓ Cumple	Se presenta detalladamente la estratigrafía, identificación de capas A,

Descripción	Cumplimiento	Observación
		B1, B2 y C, perfiles y características geotécnicas por sondeo.
H.2.2.2.1. Contenido, recomendaciones para diseño, perfil de diseño sísmico	✓ Cumple	Se clasifica el suelo como tipo E según NSR-10 y se suministran parámetros sísmicos (Fa, Fv, Aa, Av, etc.) conforme a microzonificación.
H.2.2.2.1. Contenido, recomendaciones para diseño, tipo de cimentación y asentamientos	✓ Cumple	Se recomienda profundizar cimentación hasta suelos densos (>5 m) mediante micropilotes, y se analiza la causa de los asentamientos diferenciales.
H.4.2.1 Estados límites de falla, cimentaciones superficiales	✓ Cumple	Si bien es posible estimar estos valores con base en los datos suministrados, la ausencia de este análisis en el informe representa una omisión frente a los requerimientos habituales para el diseño estructural conforme a la NSR-10. Tampoco hay una evaluación de capacidad de carga última ni asentamientos esperados, aunque se reconocen las condiciones de servicio por asentamientos diferenciales.
H.4.2.2. Estados límites de servicio, cimentaciones superficiales	✓ Cumple	Se analiza el comportamiento por asentamientos diferenciales, contracto-expansividad y efecto de árboles, con propuestas de mitigación.
H.9.1. Suelos expansivos	✓ Cumple	Se determina que el suelo tiene alto potencial expansivo (>100% expansión libre), con base en ensayos de laboratorio y clasificaciones reconocidas.

El análisis del cumplimiento normativo del estudio geotécnico realizado posterior a la aparición de las patologías estructurales permite establecer una relación directa entre los efectos negativos observados en la edificación y las deficiencias técnicas del informe frente a lo exigido por la NSR-10. Aunque el estudio, posterior a la construcción, presenta una caracterización detallada del subsuelo y entrega parámetros sísmicos y recomendaciones de cimentación acordes al contexto del sitio, no satisface integralmente los requerimientos normativos esenciales, especialmente en aspectos clave como la definición precisa de las unidades de construcción, su clasificación por categoría y el número mínimo de sondeos necesarios para una adecuada representatividad del terreno.

La omisión del análisis explícito de capacidad portante, junto con la ausencia de una evaluación detallada de factores de seguridad en estado límite último, limita la aplicabilidad del estudio como insumo confiable para el diseño estructural. Esta situación cobra especial

relevancia si se considera que las patologías identificadas —principalmente grietas verticales y asentamientos diferenciales— podrían haberse prevenido o mitigado mediante una caracterización más rigurosa y representativa del terreno desde la etapa inicial del proyecto.

Finalmente, se concluye que existe una relación empírica verificable entre los efectos negativos de origen geotécnico observados y un cumplimiento normativo parcial, lo cual evidencia la necesidad de fortalecer los procesos de control, supervisión y validación de los estudios geotécnicos empleados como base para el diseño estructural en proyectos de vivienda multifamiliar, en concordancia con los lineamientos de la NSR-10.

5. Conclusiones

En este capítulo son incluidas en primera instancia las conclusiones y finaliza con las sugerencias para futuros trabajos.

5.1. Conclusiones

Al final del presente trabajo fue posible concluir que los efectos negativos de origen geotécnico en edificaciones de vivienda pueden ser anticipados y mitigados de forma efectiva si se realiza una adecuada exploración, caracterización del terreno y cumplimiento estricto de los requisitos normativos. La experiencia del caso de estudio demuestra que los impactos económicos y funcionales derivados de deficiencias geotécnicas son prevenibles, y que el cumplimiento técnico de la NSR-10 es una herramienta fundamental no solo para la seguridad estructural, sino también para la sostenibilidad financiera de los proyectos de vivienda.

La caracterización del estudio de caso permitió identificar que las edificaciones analizadas están cimentadas sobre suelos con alto potencial de contracto-expansividad, particularmente sobre limos arcillosos con alta plasticidad. Estos materiales, al estar sometidos a cambios estacionales de humedad, generan asentamientos diferenciales que se manifiestan en fisuramientos, giros de muros y deformaciones en los elementos estructurales. Las causas de esta patología fueron corroboradas tanto por los resultados del estudio de suelos como por la inspección visual de la edificación, evidenciando una problemática típica en sectores urbanos desarrollados sobre antiguos humedales o rellenos antrópicos mal controlados.

Se estimó que el costo total de intervención por reforzamiento estructural asciende a \$762.183.170 COP, lo que representa apenas un 4,3 % del valor estimado de reposición total de la edificación. Este hallazgo demuestra que, si bien las patologías estructurales de origen geotécnico tienen consecuencias técnicas relevantes, su impacto económico puede ser mitigado mediante soluciones estructurales localizadas y técnicamente justificadas. Este resultado valida la pertinencia de implementar correctivos, evitando costos mucho mayores asociados a la demolición y reconstrucción total del inmueble.

El análisis normativo, con base en la NSR-10 Título H, evidenció un cumplimiento parcial por parte del estudio geotécnico. Si bien se cumplió con la caracterización del subsuelo y la identificación de propiedades básicas de los materiales, se detectaron omisiones importantes en cuanto a la definición de unidades de construcción, el número mínimo de sondeos requeridos y la ausencia de un análisis explícito de capacidad portante. Estas omisiones reflejan una relación directa entre el incumplimiento normativo y la ocurrencia de los efectos negativos observados en la edificación, lo cual refuerza la necesidad de aplicar de manera rigurosa los criterios técnicos establecidos en la normativa vigente.

5.2. Sugerencias para trabajos futuros

Desde la perspectiva de la gerencia de la construcción, y con base en los resultados de este trabajo, se identifican oportunidades de investigación y aplicación que permitirían profundizar en la comprensión de los efectos geotécnicos dentro del ciclo de vida de los proyectos habitacionales, así como fortalecer las capacidades de gestión técnica, normativa y financiera en el sector. A continuación, se presentan las principales líneas sugeridas para futuros trabajos:

- Diseño de herramientas de apoyo para la toma de decisiones gerenciales ante patologías geotécnicas.
- Evaluación del impacto financiero de los incumplimientos técnicos en la rentabilidad de proyectos inmobiliarios.
- Incorporación de la gestión del riesgo geotécnico en los sistemas integrados de calidad de obra.
- Modelos de análisis costo-eficiencia de técnicas de reforzamiento estructural aplicadas a vivienda construida

6. Referencias bibliográficas

- Abdul Hamid, A., Wallentén, P., & Johansson, D. (2015). Moisture supply set point for avoidance of moisture damage in Swedish multifamily houses. *Energy Procedia*, 78, 901–906. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.016>.
- Audell, H. S. (1996). Geotechnical nomenclature and classification system for crack patterns in buildings. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2(2), 225–248. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.II.2.225>
- Boscardin, M. D., & Cording, E. J. (1989). Building Response to Excavation-Induced Settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115(1), 1–21.
- Bromhead, E. N. (1984). *The Stability of Slopes*. Surrey University Press.
- Burland, J. B., Boscardin, M. D., & Cording, E. G. (2010). Capítulo 4. Estimación de daños en edificios debidos a la excavación del terreno. UPCommons. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12324/04_Estimaci%C3%B3n%20Da%C3%B1os%28Burland-Boscardin%26Cording%29.pdf.
- Cameron, D. A. (2010). Managing building damage caused by reactive soils. *Australian Journal of Civil Engineering*, 8(1), 49–56.
- Cano, C. A., & Otálvaro, I. F. (2000). Consultoría acerca de los problemas de estabilidad en las veredas Mestizal, Piedra Negra y Llanos de San Juan del municipio de San Jerónimo (Antioquia) causados por la construcción de la interconexión vial entre los valles de Aburrá y del río Cauca (p. 10). Informe técnico.
- Cano, C. A., & Otálvaro, W. (2001). Patología estructural de las viviendas y vías afectadas por la circulación de tráfico pesado en el municipio de Yarumal – Antioquia (p. 8). Informe técnico de consultoría. Alcaldía Municipal de Yarumal.
- Comisión Europea. (1991). Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones sobre las estructuras. Parte 1: Bases de proyecto (ENV 1991-1). Bruselas: CCE.
- Comité Europeo de Normalización (CEN). (1994). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 1: Reglas generales (ENV 1997-1). Bruselas: CEN.

- Comité Europeo de Normalización (CEN). (1998). Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico. Parte 2: Proyecto asistido por ensayos de laboratorio (ENV 1997-2). Bruselas: CEN.
- DANE (2025). Indicadores Económicos Alrededor de la Construcción (IEAC) recuperado de: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/indicadores-economicos-alrededor-de-la-construccion?utm_source=chatgpt.com.
- El Heraldo. (2016, 23 de agosto). Fallo ordena a Distrito y ocho constructoras pagar por Campo Alegre. Recuperado el 2 de julio de 2025, de <https://www.elheraldo.co/local/2016/08/23/fallo-ordena-a-distrito-y-ocho-constructoras-pagar-por-campo-alegre/>
- El Heraldo. (2024, 28 de noviembre). Colapso de edificio en Campo Alegre: confirman hallazgo de cuerpo sin vida de mujer. Recuperado el 2 de julio de 2025, de <https://www.elheraldo.co/judicial/2024/11/28/colapso-de-edificio-en-campo-alegre-confirman-hallazgo-de-cuerpo-sin-vida-de-mujer/>
- El País. (2024, 28 de noviembre). Un edificio se desploma en Barranquilla y deja al menos cinco personas heridas. Recuperado el 2 de julio de 2025, de <https://elpais.com/america-colombia/2024-11-28/un-edificio-se-desploma-en-barranquilla-y-deja-al-menos-cinco-personas-heridas.html>.
- Estudios de Suelo (2022). Hundimiento de cimientos en Luján por suelo colapsable. Recuperado de <https://estudiosdesuelo.com/estudio-geotecnico/precio/>
- Estudios de Suelo (2023). Grietas en muros por expansión de arcillas en Rosario. Recuperado de <https://estudiosdesuelo.com/estudio-geotecnico/precio/>
- Feld, J., & Carper, K. L. (1997). Construction Failure (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Giraldo Ramírez, W., & Ordóñez Carmona, O. (2013). Problema geotécnico del km 6 de la Autopista Medellín-Bogotá: antecedentes, causas y soluciones alternativas. Boletín de Ciencias de la Tierra, (34), 25–33.
- ICONTEC. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS).

- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2014). *Manual de diseño de cimentaciones para puentes y estructuras* (Versión basada en especificaciones AASHTO LRFD). Bogotá: Ministerio de Transporte.
- Integrated Designs. (s.f.). Common geotechnical problems in construction. Recuperado el 2 de julio de 2025, de <https://www.integratedesigns.co.uk/common-geotechnical-problems-in-construction/>
- International Organization for Standardization (ISO). (1997). *ISO 3898: Bases para el proyecto de estructuras. Notaciones. Símbolos generales*. Ginebra: ISO.
- Jones, D. E., & Holtz, W. G. (1973). Expansive soils—the hidden disaster. *Civil Engineering-ASCE*, 43(8), 49–51.
- Jones, L. D., & Jefferson, I. (2012). Expansive soils in the UK. *Proceedings of the ICE – Ground Improvement*, 165(4), 191–200.
- Morgenroth, J. (2008). Root damage of street trees in urban environments. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(6), 303–308.
- Murthy, V. N. S., Prasad, B. R., & Reddy, B. S. (2008). Mitigation of expansive soil problems in India. *Indian Geotechnical Journal*, 38(3), 245–260.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. Wiley.
- Osorio, R. I., & Sierra, G. M. (2008). Construcciones en zonas geológicamente inestables: colapso de una vivienda en la Vía Medellín - Santa Elena. *Revista Universidad EAFIT*, 44(149), 88–108. Recuperado de <https://repository.eafit.edu.co/items/026dc06f-c124-4115-8218-42f5798eb2d7/full>.
- Rodrigues, R. A. (2007). Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático. Tesis de doctorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.18.2007.tde-26072007-162559>

- Santos, A. C. dos, & Lima, D. C. (2022). Artificial neural network architecture for identification of expansive and collapsible soils in Pernambuco. *Research, Society and Development*, 11(6), e22541127465. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.22541>.
- Skempton, A. W., & MacDonald, D. H. (1956). Allowable Settlement of Buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 5(3), 727–768.
- Tokimatsu, K., Mizuno, H., & Kakurai, M. (1996). Building damage associated with geotechnical problems. *Soils and Foundations*, 36(Special Issue), 219–234. https://doi.org/10.3208/sandf.36.Special_219.
- Zhang, Q., Wang, S., Tang, L., & Chen, C. (2018). Cause investigation of damages in existing building adjacent to excavation: A case study. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40703-018-0080-0>.

Referencias

1. Beltrán L. (1991) "Expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados. I ent. Nal. de Ing. de suelos y estructuras". Bogotá
2. Biddle P.G. (1983) "Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity Of trees on clay soils, Geotechnique 33.
3. Coatsworth A. and Evans J (1984) " Discussion on the influence of vegetation on clays. Geotechnique 34 (2).
4. Donaldson G.W. (1873) the prediction of differential movement on expansive soils". 3rd Int. Conf. on expansive soils. Haifa. Israel.
5. Greenway D.R. (1987) "Vegetation and slope stability" "Slope stability" Anderson and Richards John Wiley London
6. Holland J.E. and Richards J. (1984) "The practical design of foundations for light structures on expansive soils". Sth int. Conference on expansive soils. Australia.
7. Lytton, R.L. (1972) "Design method for concrete mats on unstable soils." Third international conf. on materials technology Rio de Janeiro
8. Nelson J.D. and Miller D.J. (1992). "Expansive soils. John Wiley. New York.
9. PTI (1980) "Design and construction of post-tensioned slabs on ground. Post-tensioning Institute. Phoenix.
10. Vargas M. (1988) Collapsing and expansive soils in Brazil". "Geomechanics in tropical soils" Singapore 1988 - Balkema.
11. Villafañe G.A. (1961) "Patología de las edificaciones en suelos expansivos. Ier. encuentro Nacional de Ingenieros de suelos y estructuras. Bogotá.
12. Wallace, G.B. and Otto W.C. (1985) Differential Settlement at Selfridge. Airforce base, Journal SMFD ASCE Vol 80, SMG.
13. Williams A.A.B. and Pidgeon J.T. (1983). "Evapotranspiration and heaving clays". Geotechnique 33 (2)

14. Wray (1987) The principle of soil suction and its geotechnical engineering applications. Sth int. Conf. on expansive soils. Australia.