ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA DE UN SISTEMA DE EXCAVACIÓN PARA SÓTANOS EN BOGOTÁ D.C., ESTUDIO DE CASO: TORRE ADMINISTRATIVA SENA

Jazmin Natalia Pedreros Alba
Nancy Viviana Roncancio Cabrejo

Monografía para optar por el título de
INGENIEROS CIVILES

Tutor
Jorge Arturo Pineda Jaimes
Magíster en Ingeniería Civil
Doctor en Ingeniería

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Proyecto Curricular De Ingeniería Civil
Bogotá D.C.
Año 2022

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del director del proyecto

_____

Firma del jurado

Este trabajo se desarrolló al interior del Grupo de Investigación en Atención y Prevención de Desastres, Riesgos y Resiliencia - GIDPAD, en la línea de investigación "Resiliencia y gestión integral del riesgo para el desarrollo del territorio".

Bogotá D.C.

DEDICATORIA

A mi familia, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente a lo largo de mi vida y mi etapa educativa, su compañía me ha motivado a esforzarme con tenacidad para lograr metas, su sinceridad y amor me han convertido en una persona determinada y valiosa capaz de avanzar y aportar a la sociedad. A los docentes que han aportado sus conocimientos durante mi tiempo en la universidad. A mis compañeros por su ayuda, su compañía y aporte en cada momento que vivimos juntos.

JAZMIN NATALIA PEDRREROS ALBA

A mí familia que ha sido un apoyo constante en este proceso, que siempre ha confiado en que alcanzaré este logro y que me ha motivado para no renunciar. A mis compañeros de universidad que han recorrido el camino conmigo y que han aportado enormemente a mi crecimiento personal y académico. A mis profesores que son ejemplo de constancia y representan el lugar en donde quiero estar en un futuro que se construirá a partir de hoy. Gracias a Dios y la vida por guiarme hasta este punto y permitirme mejorar mi calidad de vida y poder aportar a la sociedad desde el conocimiento.

NANCY VIVIANA RONCANCIO CABREJO

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan agradecimiento a aquellos que de una u otra forma aportaron a la realización de este trabajo:

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, nuestra Alma Máter, por permitir educarnos profesionalmente y personalmente como Ingenieros Civiles, gracias a los espacios de aprendizaje hemos adquirido aptitudes para superar nuevos retos.

A los docentes que a lo largo de nuestro proceso de formación en la universidad aportaron en nosotros la cultura de la curiosidad, la investigación, el criterio y la responsabilidad dentro de nuestra profesión, gracias por su apoyo y por compartir parte de sus conocimientos con el fin de aportar en nuestro proyecto profesional.

Al tutor del presente trabajo, el ingeniero Jorge Arturo Pineda Jaimes, le presentamos agradecimientos por su asesoría y paciencia durante la concepción del presente trabajo.

Finalmente, a nuestras familias por ser el apoyo incondicional durante nuestras vidas y nuestra etapa educativa, a nuestros compañeros y amigos de la universidad, que nos acompañaron en este largo proceso.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 14
ABSTRACT 16
1. INTRODUCCIÓN 18
2. OBJETIVOS 21
2.1. OBJETIVO GENERAL 21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21
3. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 22
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 22
3.2. JUSTIFICACIÓN 22
4. MARCO DE REFERENCIA 24
4.1. MARCO DE ANTECEDENTES 24
4.1.1. GENERALIDADES 24
4.1.2. RESILIENCIA EN DIFERENTES CAMPOS DE ESTUDIO 24
4.1.3. RESILIENCIA EN LA INGENIERÍA CIVIL 26
4.1.4. RESILIENCIA EN COLOMBIA 31
4.1.5. RESILIENCIA EN EXCAVACIONES 33
4.2. MARCO CONCEPTUAL 35
4.2.1. GENERALIDADES 35
4.2.2. CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL ÍNDICE DE RESILIENCIA 35
4.2.3. CONCEPTOS RELACIONADOS CON EXCAVACIONES 42
4.2.3. CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA ESTABILIDAD DE EXCAVACIONES 46
5. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA EN EXCAVACIONES PARA SÓTANOS 52
5.1. GENERALIDADES 52
5.2. ÍNDICE DE RESILIENCIA EN EXCAVACIONES PARA SÓTANOS 52
5.3. CRITERIO DE ROBUSTEZ 55
5.3.1. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE FONDO EN EL TERRENO EXCAVADO 55
5.3.2. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN SUPERFICIE 57
5.3.3. DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DE LAS PANTALLAS 59
5.3.4. ESTADO DEL ENTORNO (EDIFICACIONES Y VÍAS) 60

5.3.5. ESTADO DE LAS OBRAS DE CONTENCIÓN PARA PROTECCIÓN DE COLINDANCIAS 61
5.3.6. CUMPLIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO PROGRAMADO 61
5.3.7. CONTROL DE NIVEL FREÁTICO EN LA EXCAVACIÓN 62
5.3.8. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA ROBUSTEZ 63
5.4. CRITERIO DE REDUNDANCIA 64
5.4.1. FACTOR DE SEGURIDAD POR FALLA DE FONDO Y/O ESTABILIDAD GEOTÉCNICA 65
5.4.2. PROBABILIDAD DE FALLA DE FONDO 66
5.4.3. VÍAS ALTERNAS 66
5.4.4. REDES DE SERVICIOS 67
5.4.5. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA 69
5.5. CRITERIO DE CAPACIDAD DE GESTIÓN 70
5.5.1. POLÍTICAS DE RIESGO EN LA ZONA CIRCUNDANTE DE LA EDIFICACIÓN 70
5.5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN 71
5.5.3. VELOCIDAD DE RESPUESTA DE ENTIDADES COMPETENTES 71
5.5.4. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GESTIÓN 72
5.6. CRITERIO DE RECUPERACIÓN 73
5.6.1. ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA EXCAVACIÓN 73
5.6.2. IMPACTO SOCIAL 74
5.6.3. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN 74
6. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA 76
6.1. GENERALIDADES 76
6.2. LOCALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA 76
6.3. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA 78
6.3.1. SABANA DE BOGOTÁ 78
6.3.2. LOCALIDAD DE CHAPINERO 81
6.4. HIDROGEOLOGÍA DE LA LOCALIDAD DE CHAPINERO 84
6.4.1. POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA 85

6.5. SISMOLOGÍA 86
6.6. PROCESO CONSTRUCTIVO CONSIDERADO EN EL DISEÑO DEL PROYECTO 88
6.7. PROCESO CONSTRUCTIVO CONSIDERADO POR EL CONTRATISTA DEL PROYECTO 90
6.7.1. CRONOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE LA EXCAVACIÓN ANALIZADA . 91
6.7.2. IMPREVISTOS PRESENTADOS EN LA ETAPA CONSTRUCTIVA 93
7. ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DE RESILIENCIA EN EL CASO DE ESTUDIO ANALIZADO 96
7.1. GENERALIDADES 96
7.2. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE ROBUSTEZ 96
7.2.1. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE FONDO EN EL TERRENO EXCAVADO 96
7.2.2. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LA SUPERFICIE 97
7.2.3. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DE LAS PANTALLAS 99
7.2.4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ENTORNO (EDIFICACIONES Y VÍAS) . 100
7.2.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DE LAS OBRAS DE CONTENCIÓN PARA PROTECCIÓN DE COLINDANCIAS 101
7.2.6. ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO PROGRAMADO 102
7.2.7. ANÁLISIS DEL CONTROL DE NIVEL FREÁTICO EN LA EXCAVACIÓN 103
7.2.8. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA ROBUSTEZ 104
7.3. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE REDUNDANCIA 105
7.3.1. ANÁLISIS FACTOR DE SEGURIDAD DE LA EXCAVACIÓN 105
7.3.2. ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE FALLA DE FONDO 108
7.3.3. ANÁLISIS DE VÍAS ALTERNAS 108
7.3.4. ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS 110
7.3.5. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA 112
7.4. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE CAPACIDAD DE GESTIÓN 113
7.4.1. ANÁLISIS EXISTENCIA DE POLÍTICAS DE RIESGO EN LA ZONA CIRCUNDANTE DE LA EDIFICACIÓN 114

7.4.2. ANÁLISIS DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN 117
7.4.3. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE RESPUESTA DE ENTIDADES COMPETENTES 118
7.4.4. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GESTIÓN 121
7.5. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE RECUPERACIÓN 122
7.5.1. ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA EXCAVACIÓN 123
7.5.2. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIAL 125
7.5.3. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN 127
8. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA PARA EL CASO DE ESTUDIO 129
8.1. GENERALIDADES 129
8.2. ESTIMACIÓN ÍNDICE DE RESILIENCIA 129
8.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS 132
9. CONCLUSIONES 136
10. RECOMENDACIONES 138
REFERENCIAS 139
ANEXOS 142

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Modelo de causalidad (queso suizo) para la gestión de riesgos 28
Ilustración 2. Relación entre los componentes de gestión de riesgo y los factores de la resiliencia en la Ingeniería Civil 29
Ilustración 3. Tiempo vs Desarrollo de una ciudad resiliente y una ciudad no resiliente 30
Ilustración 4. Ciclo de gestión de riesgos 31
Ilustración 5. Aspectos de las excavaciones profundas que influyen en las sociedades sostenibles y resilientes 34
Ilustración 6. Curva de funcionalidad de una estructura 36
Ilustración 7. Sistema con alta robustez y redundancia 38
Ilustración 8. Sistema con alta capacidad de gestión 39
Ilustración 9. Sistema con alta capacidad de recuperación 39
Ilustración 10. Modelo explicativo para la gestión de riegos 40
Ilustración 11. Pasos para la construcción de un escenario de riesgo 41
Ilustración 12. Equilibrio de masas y energía para una excavación profunda 43
Ilustración 13. Modelo gráfico de una excavación para sótano 45
Ilustración 14. Relación que define el factor de seguridad 46
Ilustración 15. Muros berlineses para contención en excavaciones 47
Ilustración 16. Muros berlineses para contención en excavaciones 47
Ilustración 17. Mecanismo de terzaghi - prandtl para la falla de fondo de excavaciones 49
Ilustración 18. Ubicación de la excavación para sótanos objeto de determinar el índice de resiliencia 76
Ilustración 19. Fachada norte del proyecto construcción de la nueva torre administrativa del SENA 77
Ilustración 20. Ubicación de la sabana de Bogotá respecto a Colombia 78
Ilustración 21. Mapa geológico de Bogotá - Servicio Geológico Colombiano 80
Ilustración 22. Ubicación de la localidad de Chapinero respecto a la ciudad de Bogotá 81
Ilustración 23. Geología de la localidad de Chapinero 83
Ilustración 24. Columna estratigráfica generalizada de la provincia Cordillera Oriental 84
Ilustración 25. Unidades hidrológicas de la localidad de Chapinero 84
Ilustración 26. Caracterización de los acuíferos en la localidad de Chapinero 85
Ilustración 27. Mapa de subcuencas hidrogeológicas 86
Ilustración 28. Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá 87
Ilustración 29. Ubicación maquinaria para el proceso de excavación del proyecto analizado 88
Ilustración 30. Proceso de excavación propuesto para el diseño por el especialista del proyecto 89
Ilustración 31. Proceso de excavación realizado por el contratista del proyecto 90
Ilustración 32. Excavación pilotes y muro pantalla de borde en la excavación analizada ... 91
Ilustración 33. Excavación viga cinturón para sótano 1 91
Ilustración 34. Talud 1 a 1 para excavación sótano 1 92

Ilustración 35. Excavación zona central hasta nivel -7.3 metros para fundida de viga puntal 92
Ilustración 36. Excavación hasta nivel de cimentación 93
Ilustración 37. Invasión de la excavación por aguas del nivel freático 93
Ilustración 38. Separación de juntas en las pantallas de la excavación 94
Ilustración 39. Muestra de las patologías desfavorables en las construcciones aledañas a la excavación 95
Ilustración 40. Separación de muros pantalla 100
Ilustración 41. Calle 57 con Carrera 9, se evidencia que no existen colindantes 101
Ilustración 42. Calle 57 con Carrera 8B, se evidencia que no existen colindantes 101
Ilustración 43. Calle 58 bis con Carrera 9, se evidencia colindantes zona norte 102
Ilustración 44. Excavación costado occidental de la excavación analizada 103
Ilustración 45. Excavación del núcleo de la zona norte, se evidencia el aumento en el nivel freático de la excavación analizada 104
Ilustración 46. Ubicación de la excavación para análisis de flujo de tránsito y vías alternas (parámetro de redundancia) 109
Ilustración 47. Sentido de flujo de tránsito de las vías circundantes a la excavación analizada 109
Ilustración 48. Red de alcantarillado circundante a la excavación analizada 111
Ilustración 49. Red de acueducto circundante a la excavación analizada 112
Ilustración 50. Ocurrencia de movimientos en masa en Bogotá D.C por localidades 115
Ilustración 51. Revisión de las unidades de construcción aledañas al proyecto analizado 117
Ilustración 52. Ubicación hospitales en el área de influencia de la excavación analizada. 119
Ilustración 53. Ubicación bomberos en el área de influencia de la excavación analizada. 120
Ilustración 54. Ubicación Defensa Civil en el área de influencia de la excavación analizada 120
Ilustración 55. Ubicación Policía Nacional en el área de influencia de la excavación analizada 121
Ilustración 56. Uso de suelo de la localidad de Chapinero 123
Ilustración 57. Ubicación de las empresas de la cadena de construcción e Ingeniería Civil en la localidad de Chapinero 124
Ilustración 58. Establecimientos económicos en el área de influencia de la excavación analizada 125
Ilustración 59. Ubicación de las empresas de la cadena de productos alimenticios en la localidad de Chapinero 126
Ilustración 60. Ubicación de las empresas de la cadena textil en la localidad de Chapinero 127
Ilustración 61. Comparación de los parámetros de resiliencia para el caso analizado en cada tiempo referenciado 131
Ilustración 62. Comparación del índice de resiliencia entre diferentes tipos de sistemas.. 135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. NSR-10 Titulo H - clasificación de las unidades de construcción por categorías 71
Figura 2. Desplazamientos verticales software del corte A-A 98
Figura 3. Desplazamientos verticales software del corte B-B 98
Figura 4. Resultados para el factor de seguridad y probabilidad de falla de la excavación analizada, para corte B-B' en obra 106
Figura 5. Resultados para el factor de seguridad y probabilidad de falla de la excavación analizada, para corte A-A' en obra 107
Figura 6. Clasificación de riesgo y amenazas en las diferentes UPZ de la localidad de Chapinero 114
Figura 7.Clasificación de las unidades de construcción según la NSR-10 117
Figura 8. Participación de los ejecutores en los servicios de respuesta 118

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Severidades desplazamientos de fondo en el terreno excavado 56
Tabla 2. Determinación desplazamientos verticales de fondo (parámetro robustez) 57
Tabla 3. Severidades desplazamientos superficiales en el entorno al terreno excavado 58
Tabla 4. Deformaciones tolerables (SGC) 58
Tabla 5. Determinación desplazamientos verticales superficiales (parámetro robustez) 58
Tabla 6. Desplazamientos horizontales en las pantallas (parámetro robustez) 60
Tabla 7. Estado del entorno (parámetro robustez) 60
Tabla 8. Obras de contención para protección de colindancias (parámetro robustez) 61
Tabla 9. Cumplimiento al proceso constructivo programado (parámetro robustez) 62
Tabla 10. Control de nivel freático en la excavación 62
Tabla 11. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de robustez 63
Tabla 12. Valoración de factor de seguridad en la excavación (parámetro de redundancia) 65
Tabla 13. Valoración de probabilidad de falla de fondo en la excavación (parámetro de redundancia) 66
Tabla 14. Valoración de vías alternas en el entorno de la excavación (parámetro de redundancia) 67
Tabla 15. Valoración de redes de servicio en la excavación (parámetro de redundancia) ... 68
Tabla 16. Parámetros para el análisis de redundancia de un sistema de excavación 69
Tabla 17. Valoración de la existencia de políticas de gestión de riesgo (parámetro de capacidad de gestión) 70
Tabla 18. Valoración para la clasificación de las unidades de construcción (parámetro de capacidad de gestión) 71
Tabla 19. Valoración de la velocidad de respuesta entidades competentes (parámetro de capacidad de gestión) 72
Tabla 20. Parámetros para el análisis de la capacidad de gestión de un sistema de excavación 72
Tabla 21. Valoración de actividades económicas en la zona de influencia de la excavación (parámetro de recuperación) 73
Tabla 22. Valoración del impacto social (parámetro de recuperación) 74
Tabla 23. Parámetros para el análisis de la recuperación de un sistema de excavación 75
Tabla 24. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de redundancia 113
Tabla 25. Servicios para la atención de emergencias 116
Tabla 26. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de la capacidad de gestión 122
Tabla 27. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de recuperación del sistema de excavación 128
Tabla 28. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros de resiliencia 130

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de la resiliencia según Basu & Lee 26
Ecuación 2. Ecuación del índice de resiliencia 52
Ecuación 3. Ecuación de la resiliencia para el instante antes del evento disruptivo $(t1)$ 54
Ecuación 4. Ecuación de la resiliencia para el instante después del evento disruptivo $(t2)$ 54
Ecuación 5. Robustez en el instante 1 64
Ecuación 6. Robustez en el instante 2 64
Ecuación 7. Redundancia en el instante 1 69
Ecuación 8. Redundancia en el instante 2 69
Ecuación 9. Capacidad de gestión en el instante 1 72
Ecuación 10. Capacidad de gestión en el instante 2 73
Ecuación 11. Recuperación en el instante 1 75
Ecuación 12. Recuperación en el instante 2 75
Ecuación 13. Solución de la ecuación de la Robustez en el instante 1 104
Ecuación 14. Solución de la ecuación de la Robustez en el instante 2 104
Ecuación 15. Solución de la ecuación de la redundancia en el instante 1 113
Ecuación 16. Solución de la ecuación de la redundancia en el instante 2 113
Ecuación 17. Solución de la ecuación de capacidad de gestión para el instante 1 122
Ecuación 18. Solución de la ecuación de capacidad de gestión para el instante 2 122
Ecuación 19. Solución de la ecuación de la recuperación en el instante 1 128
Ecuación 20. Solución de la ecuación de la recuperación en el instante 2 128
Ecuación 21. Ecuación de resiliencia en el instante 1 (Previo al evento disruptivo) 130
Ecuación 22. Ecuación de resiliencia en el instante 2 (Posterior al evento disruptivo) 130
Ecuación 23. Solución de la ecuación de resiliencia en el instante 1 131
Ecuación 24. Solución de la ecuación de resiliencia en el instante 2 131
Ecuación 25. Solución de la ecuación del índice de resiliencia 131

RESUMEN

Todos los proyectos ingenieriles, que implican intervención antropogénica del medio físico, requieren un análisis de gestión de riesgos, con el fin de crear estructuras resistentes y resilientes capaces de mitigar cualquier impacto generado por eventos disruptivos, de origen natural y antropogénico, para la preservación de las vidas humanas que hacen uso de las estructuras.

El índice de resiliencia, en el campo de la ingeniería, permite estimar la capacidad de recuperar el estado inicial de una estructura después de un evento disruptivo, y se presenta como una solución, dentro de la gestión del riesgo en la Ingeniería Civil, para disminuir la vulnerabilidad de las construcciones civiles frente a un evento disruptivo. Por lo anterior, y a partir de la revisión de casos de inestabilidad geotécnica presentados históricamente en la ciudad de Bogotá D.C. se planteó la necesidad de determinar un índice de resiliencia para estructuras de sótanos en edificaciones, esto desde el análisis de los principales criterios que abarcan la resiliencia a nivel ingenieril.

Para estimar el índice de resiliencia de un sistema se requiere de una metodología cualitativa – cuantitativa, que permita abarcar gran parte de las características que afectan la resiliencia del mismo. Por ello, el hallazgo del índice de resiliencia para este trabajo, se realizó a partir del cociente de la función de desempeño del sistema en dos tiempos, los cuales estarán definidos por la ocurrencia de un evento abrupto: instante antes y después del mismo, y se sustenta en el análisis de cuatro parámetros fundamentales, tenido en cuenta dentro del concepto de resiliencia en la Ingeniería Civil como robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación.

Los anteriores parámetros fueron revisados y analizados de acuerdo a las características cualitativas y cuantitativas de una excavación para sótanos, se contempló en general, los desplazamientos en el terreno de la excavación, el estado del entorno, el proceso constructivo, la existencia de vías alternas, factores de seguridad, políticas de riesgo en el sector, entre otros aspectos que puedan afectar la resiliencia del sistema de excavación. A cada criterio se le asigno una ponderación y una evaluación numérica siguiendo la teoría de simulación estadística de Montecarlo.

Una vez se asignaron las ponderaciones y las evaluaciones se aplicó la metodología propuesta, en virtud de los criterios cuantitativos y cualitativos correspondientes a los sistemas de excavaciones para sótanos, en el estudio de caso planteado, ubicado en un predio de la ciudad de Bogotá en la calle 57 entre carreras 8B y 9A, donde se construirá la Torre Administrativa del SENA.

Se revisaron las características particulares de la excavación de caso con el fin de establecer un valor numérico para la resiliencia en el estado inicial, antes de un evento disruptivo, y

final, después de un evento disruptivo. Para lo cual se obtuvieron unos resultados de resiliencia de 0.6 en el instante 1 y 0.8 en el instante 2.

El cociente de los anteriores valores mencionados, resultó en un valor de índice de resiliencia de 0.75. En términos generales, el estudio de caso presentó buenas características de resiliencia en ambos tiempos analizados. Sin embargo, la robustez presentó bajas aportaciones en el momento antes y en el momento después a la ocurrencia del evento disruptivo, por lo que se evidenció que la estructura tuvo falencias durante su concepción y requiere de correcciones en algunos aspectos que afectan su funcionalidad y estabilidad (mejoramientos que pueden ser analizados en un trabajo posterior al tratado en el presente documento).

ABSTRACT

All engineering projects, which involve anthropogenic intervention of the physical environment, require a risk management analysis, in order to create resistant and resilient structures capable of mitigating any impact generated by disruptive events, of natural and anthropogenic origin, for the preservation of the human lives that make use of the structures.

The resilience index, in the field of engineering, allows estimating the ability to recover the initial state of a structure after a disruptive event, and is presented as a solution, within risk management in Civil Engineering, to reduce the vulnerability of civil constructions in the face of a disruptive event. Due to the above, and from the review of cases of geotechnical instability presented historically in the city of Bogotá D.C. the need to determine a resilience index for basement structures in buildings was raised, this from the analysis of the main criteria that encompass resilience at the engineering level.

To estimate the resilience index of a system, a qualitative-quantitative methodology is required, which allows covering a large part of the characteristics that affect its resilience. For this reason, the finding of the resilience index for this work was made from the quotient of the performance function of the system in two times, which will be defined by the occurrence of an abrupt event: instant before and after it, and it is based on the analysis of four fundamental parameters, taken into account within the concept of resilience in Civil Engineering such as robustness, redundancy, management capacity and recovery.

The previous parameters were reviewed and analyzed according to the qualitative and quantitative characteristics of an excavation for basements, it was contemplated in general, the displacements in the excavation land, the state of the environment, the construction process, the existence of alternate routes, safety factors, risk policies in the sector, among other aspects that may affect the resilience of the excavation system. Each criterion was assigned a weighting and a numerical evaluation following the Monte Carlo statistical simulation theory.

Once the weightings and evaluations were assigned, the proposed methodology was applied, by virtue of the quantitative and qualitative criteria corresponding to the excavation systems for basements, in the proposed case study, located on a property in the city of Bogotá in the Calle 57 between Carreras 8B and 9A, where the SENA Administrative Tower will be built.

The particular characteristics of the case excavation were reviewed in order to establish a numerical value for resilience in the initial state, before a disruptive event, and final, after a disruptive event. For which resilience results of 0.6 at time 1 and 0.8 at time 2 were obtained.

The quotient of the aforementioned values resulted in a resilience index value of 0.75. In general terms, the case study presented good resilience characteristics at both times analyzed. However, the robustness presented low contributions in the moment before and in the

moment after the occurrence of the disruptive event, so it was evident that the structure had shortcomings during its conception and requires corrections in some aspects that affect its functionality and stability (improvements that can be analyzed in a subsequent work to the one treated in this document).

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos naturales de la corteza terrestre del planeta Tierra, son dinámicos y generan cambios constantes en el suelo del planeta, algunos de estos cambios son producto de eventos masivos como sismos o erupciones volcánicas, cuya afectación es importante en la supervivencia del ser humano y su cotidianidad. Adicionalmente, la globalización y el interés de mejorar el modo de vida del ser humano, acelera la transformación de las ciudades en sistemas urbanos complejos (desde el enfoque de la Ingeniería Civil la globalización implica nuevas vías, edificios más grandes, entre otros nuevos requerimientos) que puede aumentar la vulnerabilidad en la infraestructura y que implican un aumento en la afectación del medio físico, especialmente en entornos urbanos.

Todos los cambios en el subsuelo, producto de un proceso natural o por causas antropogénicas, pueden generar eventos catastróficos que comprometan (parcial o totalmente) la funcionalidad de las estructuras y generen pérdidas en la sociedad. Pareciera que la gestión de riesgos (como preparación y accionar ante un evento natural y antrópico) no tuviera relación con la ingeniería, ya que prevalece la idea de que estos debieran ser solamente tratados por los gobiernos y entidades luego de la ocurrencia de los eventos, sin embargo, el concepto de resiliencia en estructuras puede aportar a dicha gestión, como preparación ante una amenaza y está relacionado directamente con la ingeniería civil.

Por lo anterior, se identifica el concepto de resiliencia, como aporte innovador de los campos ingenieriles a la gestión de riesgos y desarrollo de las ciudades. La resiliencia es la capacidad de recuperar el estado inicial después de una perturbación, y se presenta como una solución para disminuir la vulnerabilidad de las construcciones civiles frente a un evento catastrófico.

La resiliencia, en general, tiene diferentes aplicaciones dependiendo el área de estudio que la analice y la apropie. Sin embargo, la constante en el concepto es la capacidad de recuperarse después de un evento que haya producido consecuencias negativas en un individuo, sistema, material, sociedad o estructura. Debido a que el concepto implica la forma de respuesta ante la adversidad, representada por un evento disruptivo, la resiliencia puede ser predicha antes de que ocurra dicho evento, con el fin de aplicar mejoras que permitan optimizar y reducir las consecuencias frente a cualquier evento.

La ingeniería de la resiliencia es un concepto que surge para analizar y ajustar un sistema, antes, durante y después de una perturbación; con el fin de mantener los requerimientos de funcionamiento de dicho sistema a pesar de condiciones no esperadas. Este enfoque es muy aplicable a los sistemas de excavaciones para sótanos, donde se implican afectaciones de grandes magnitudes al ambiente y con la participación de grandes cantidades de personas.

En el caso de las excavaciones para sótanos, que generan una modificación (a causa de actividades antropogénicas) directa al estado de esfuerzos del subsuelo, desde su composición hasta la distribución de cargas soportadas por éste; requieren un análisis

específico de resiliencia para analizar el comportamiento del sistema (en este caso, la excavación, sus elementos de contención y los elementos del entorno físico en la superficie).

El diseño y construcción de una estructura tipo sótano debe acoplarse adecuadamente a las condiciones propias del suelo afectado para reducir el impacto en el ambiente y evitar la falla de la estructura y del entorno circundante. Además, ya que el subsuelo es un entorno dinámico y heterogéneo, la estructura construida también debe ser capaz de re-acoplarse y recuperar su estado de funcionalidad (resiliencia) con el fin de garantizar su adecuado desempeño en el tiempo.

El presente proyecto, se constituye como una primera aproximación a la estimación del índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, a partir de la revisión y análisis de dichas estructuras, mediante la revisión de las condiciones geotécnicas de la zona, algunas características de la estructura y la modelación de los parámetros relacionados con la resiliencia en el campo ingenieril.

Según la guía de resiliencia probabilística de infraestructura (Salem, Siam, El.Dakhakhni, & Tait, 2020) se requiere de un estudio de caso detallado, para asociar una toma de datos y modelación de índice de resiliencia, por lo que para el presente trabajo se realiza la revisión del índice de resiliencia de un caso específico de excavaciones para sótanos, esto asociado a la construcción de la torre administrativa del SENA (calle 57 N° 8 B 20) en Bogotá D.C. para hacer un adecuado análisis de las condiciones y parámetros de resiliencia asociados a las excavaciones para sótanos.

El presente documento, donde se plasma el trabajo realizado respecto al índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, se compone de diez (10) capítulos, como se menciona a continuación:

Capítulo 1: Introducción. Se presenta la identificación y descripción del problema que dá origen a la idea a tratar en el presente trabajo de grado, además se presenta una descripción general del desarrollo del trabajo de grado.

Capítulo 2: Objetivos. Se describen el objetivo general y los objetivos específicos planteados para el desarrollo del proyecto.

Capítulo 3: Justificación y descripción del problema. Se presenta el motivo que justifica la realización del presente documento, así como la descripción detallada del mismo.

Capítulo 4: Marco de referencia. Se presentan los marcos teóricos y de antecedentes relacionados con el concepto de resiliencia y las estructuras tipo excavaciones para sótanos.

Capítulo 5: Metodología para la estimación del índice de resiliencia en excavaciones para sótano. Se describe la forma en la que se avaluarán las ponderaciones de los parámetros que influyen en la estimación del índice de resiliencia, aplicado a excavaciones para sótanos.

Capítulo 6: Caracterización de la estructura analizada. Se presentan las características de la estructura caso a analizar en el presente proyecto, la ubicación, descripción del subsuelo, etapas de ejecución de la excavación, entre otros aspectos que permiten la evaluación del proyecto a analizar en el presente trabajo.

Capítulo 7: Análisis de los componentes de resiliencia en la estructura analizada. Se describen los análisis y resultados de cada uno de los aspectos propuestos para el análisis del índice de resiliencia en excavaciones (capítulo 4).

Capítulo 8: Estimación y análisis del índice de resiliencia para la estructura analizada. Se desarrolla la propuesta inicial para la estimación del índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, y para el caso específico el predio ubicado en la calle 57 entre carreras 8B y 9A (Chapinero), donde se construirá la Torre Administrativa del SENA.

Capítulo 9: Conclusiones. Se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la estimación del índice de resiliencia para excavaciones de sótanos.

Capítulo 10: Recomendaciones. Se plantean las recomendaciones para tener en cuenta en el desarrollo de futuros trabajos relacionados con el índice de resiliencia en la Ingeniería Civil.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar el índice de resiliencia de excavaciones para sótanos, ubicadas en la ciudad de Bogotá (Estudio de caso Torre Administrativa Sena).

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

i. Determinar los criterios que afectan la resiliencia en sistemas de excavaciones para sótanos a partir del análisis de los parámetros de resiliencia (robustez, redundancia, capacidad de gestión y reconstrucción).

ii. Realizar una caracterización detallada del sistema de excavación correspondiente al caso analizado con el fin de cuantificar la resiliencia de dicho sistema en un instante determinado.

3. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La resiliencia es un concepto amplio, aplicado en diferentes áreas del saber humano, para el caso de la Ingeniería Civil, la resiliencia se asocia a la capacidad de una estructura para recuperarse y mantenerse funcional después de un evento disruptivo. El concepto de resiliencia en la Ingeniería Civil está en función de cuatro aspectos: robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación, que varían con respecto al tipo de sistema que se analice, ya que las características que aportan a dichos parámetros son diferentes respecto a la estructura y al entorno de la misma.

Es por ello que se debe realizar un estudio especializado que permita determinar las características que definen la resiliencia (aplicada en la Ingeniería Civil) en diferentes tipos de sistemas, como por ejemplo las excavaciones para sótanos, que en la actualidad han sido usados masivamente debido a su atractivo y eficiente uso del terreno de construcción de un proyecto.

Por su carácter constructivo, los sótanos presentan características distintas a las estructuras convencionales y requieren un estudio especializado que mitigue su invasión a las condiciones naturales de los suelos. Es por ello que se requiere el desarrollo de investigaciones que amplíen el conocimiento del comportamiento de estas estructuras (desde su concepción, diseño hasta su construcción y mantenimiento en el tiempo) como un aporte al avance de la Ingeniería Civil.

3.2. JUSTIFICACIÓN

Desde el enfoque de la gestión del riesgo, la falta de resiliencia es uno de los elementos que configuran la vulnerabilidad, la resiliencia propone una posición proactiva frente al riesgo y permite identificar las capacidades del sistema analizado y las características que permitan la recuperación del sistema después de materializado el riesgo, por ende, la resiliencia se presenta como una de las soluciones para la reducción de la vulnerabilidad, ya que se permite conocer si el sistema analizado cumple con la funcionalidad para el cual fue concebido frente a una eventualidad atípica.

Aplicado a la ingeniería, se enfoca la resiliencia como un proceso dinámico que conlleva a una adaptación positiva en contextos de gran adversidad, se identifica la importancia de la interacción del sistema analizado y su entorno.

Este trabajo se encuentra asociado al índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, con el fin de proyectar estructuras capaces de mantener estabilidad frente a diferentes eventos naturales que modifiquen las condiciones iniciales de diseño y de esta manera garantizar una vida útil, óptima y funcional, en dicha estructura.

El índice de resiliencia en la ingeniería se realiza mediante una comparación entre dos estados de un sistema (estado inicial, antes de un evento disruptivo, y estado final, luego de un evento disruptivo), estudiado a través de inspecciones técnicas y análisis probabilísticos de características cualitativas y cuantitativas del sistema analizado, teniendo en cuenta los factores externos e internos detonantes e incidentes en la probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de producir daño.

Además de plantear una metodología para el cálculo del índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, agrupando las características particulares de este tipo de sistemas y su entorno, se aplica esta metodología al caso de estudio asociado a la excavación de la nueva torre administrativa del SENA en Bogotá, ubicado en la calle 57 No. 8 B 20 (localidad de Chapinero).

La contribución de este trabajo, permite definir nuevas estimaciones asociadas a riesgos y amenazas, que faciliten una mejor planificación del entorno urbano, y de esta manera presentar un modelo de análisis específico de estructuras para reducir la vulnerabilidad de las construcciones y las poblaciones en general. También, relacionando la resiliencia con el desarrollo sostenible, la creación de estructuras resilientes, permiten reducir el impacto ambiental de consumo de recursos, ya que una estructura resiliente absorbe todo el impacto negativo de los eventos disruptivos, reduce los desastres y restablecen de manera más rápida los daños causados y su funcionalidad.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. MARCO DE ANTECEDENTES

4.1.1. GENERALIDADES

En ingeniería el termino resiliencia se refiere a la recuperación de un sistema afectado (por un evento externo) una vez que termina la causa de la afectación. Así, la resiliencia es necesaria para recuperar la funcionalidad después de una situación adversa, lo cual es un aporte al objetivo principal de una estructura, el cual es resistir los suficiente para brindar funcionalidad y seguridad a sus ocupantes.

Ante eventos inevitables, causados naturalmente como los sismos o producto de una intervención antropogénica como distorsiones en los estados de esfuerzo del suelo, la resiliencia cobra importancia, ya que, dentro de la concepción de un proyecto, además de la resistencia de uso, brinda una capacidad de recuperación después de la afectación causada en dicho evento, aportando así al desarrollo sostenible de la ingeniería y de la sociedad en general.

La resiliencia en ingeniería se logra desde la concepción de su definición en diferentes áreas del saber humano, por lo que es importante conocer el desarrollo de la resiliencia y su aplicación progresiva a la Ingeniería Civil, es por ello que en este capítulo se espera proyectar los antecedentes de la resiliencia, desde el concepto en general, hasta la relación de dicho concepto con el desarrollo sostenible y la gestión de riesgos para apropiar mejor este concepto en la ejecución del presente proyecto.

4.1.2. RESILIENCIA EN DIFERENTES CAMPOS DE ESTUDIO

La resiliencia es un concepto propuesto inicialmente en el campo de la ecología, su primera definición en este campo fue propuesta por Holling en 1973 y se refería a la capacidad de un ecosistema de auto mantenerse y persistir frente a perturbaciones y cambios.

A través del tiempo el concepto de resiliencia ha ido evolucionando y adaptándose a otras áreas como son la psicología, la física de materiales, la ingeniería, la sociología, la economía, entre otros. En el ensayo “Resiliente” (Sosa García, 2017) se nos muestran definiciones cortas de la resiliencia en diferentes campos del saber:

- En un sentido etimológico, el concepto de resiliencia es un término que proviene del latín resilire que significa “saltar hacia atrás, rebotar” lo que se relaciona con la capacidad de regresar al estado inicial de un sistema (estado sin perturbación).

- En sistemas tecnológicos, resiliencia es la capacidad de un sistema de soportar y recuperarse ante desastres y perturbaciones.

- En derecho, la resiliencia jurídica es la capacidad de las personas de recuperar su estado original de libertad, igualdad e inocencia, después de haber sido sometidas a las acciones de fuerza del Estado.

- En sociología, resiliencia es la capacidad que tienen los grupos sociales para sobreponerse a los resultados adversos, reconstruyendo sus vínculos internos, a fin de hacer prevalecer su homeostasis colectiva de modo tal que no fracase en su propia sinergia.

- En ecología, la resiliencia ambiental es la capacidad de un sistema para que recupere el equilibrio después de haber sufrido una perturbación.

- En física, la resiliencia es entendida como una propiedad de los materiales, en la que acumulan energía ante una situación de estrés y no son dañados, además tienen la capacidad de volver a la normalidad.

- En ingeniería, la resiliencia en un material es la energía de deformación que se recupera después de que dicho material es deformado.

- En administración, la resiliencia es la capacidad que tiene el emprendedor para confrontar situaciones que compliquen la generación y desarrollo de su plan de negocios o su proyecto emprendedor, generando sinergia con sus socios ante la previsión del riesgo. En el ámbito de la gestión, la resiliencia organizacional implica gran equilibrio emocional en las personas para enfrentar situaciones laborales difíciles.

- En psicología, resiliencia es la capacidad de una persona para hacer frente a sus propios problemas, superar los obstáculos y no ceder a la presión, independientemente de la situación. Es la capacidad de un individuo para sobreponerse a períodos de dolor emocional y traumas.

- En la gestión de desastres, la resiliencia es la capacidad de que una comunidad afectada por amenazas pueda resistir la pérdida de recursos y pueda regenerarse y reorganizarse en un tiempo determinado.

En conclusión, la resiliencia se define como la capacidad de afrontar situaciones desfavorables, donde se implica reestructurar los recursos de un sistema ante nuevas circunstancias, con lo cual un sistema resiliente es capaz de sobreponerse a las adversidades.

A pesar de que el concepto de resiliencia se enfatiza en diferentes características según la disciplina sobre la cual se esté estudiando, si se sintetizan las definiciones de resiliencia desde distintos enfoques, se observa que se utilizan diferentes términos para representar propiedades que son similares, como ocurre en el caso de la persistencia y la resistencia, así como en la solidez de los recursos, el ingenio y la capacidad de gestión.

4.1.3. RESILIENCIA EN LA INGENIERÍA CIVIL

El término resiliencia relacionado con la ingeniería se origina a principios del siglo XIX por la Royal Navy británica (Rubio Romero y Bestratén Bellovi, 2018) para explicar cómo algunas maderas soportaban cargas importantes sin llegar a romperse. Desde allí se trata la resiliencia como una característica o capacidad de un material. Años más tarde el ecologista Crawford Holling relaciona la resiliencia con la estabilidad, concepción que también puede ser aplicada a la Ingeniería Civil.

La perspectiva de la resiliencia a la Ingeniería Civil fue introducida por Pimm (1984), quien define la resiliencia como "el tiempo que tarda un sistema en regresar a un estado previo al disturbio, es decir, la rapidez con la que una variable desplazada desde el equilibrio retorna al mismo (tiempo de retorno)", concepto resumido en qué tan rápido un sistema regresa a las condiciones previas a la perturbación.

La resiliencia, generalmente, ha sido considerada como un atributo global: la capacidad de recuperación del sistema de forma holística, como un todo. Sin embargo, en ocasiones, una perturbación puede no alterar las propiedades de todos sus elementos, es decir, el impacto de un fenómeno no es uniforme en todos sus componentes, indicando que los elementos individuales pueden tener características resilientes heterogéneas (Yánez Contreras et al., 2020). Por ello, una vez aceptado el concepto de resiliencia en la ingeniería, se presenta la necesidad de establecer los métodos para cuantificarla, la resiliencia no debe ser solamente un concepto teórico. Inicialmente se propone especificar las perturbaciones de interés, que afectan a la resiliencia, en el sistema analizado (Carpenter, 2001).

A partir del enfoque de la ingeniería de la infraestructura a la resiliencia, se establecen cuatro propiedades que afectan a la resiliencia estructural: Robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación. Estos parámetros se evalúan de manera cualitativa y cuantitativa.

En ingeniería, se propone que la resiliencia sea cuantificada en términos del cambio en el rendimiento y/o desempeño en un tiempo determinado, como se presenta en la Ecuación 1 donde la resiliencia se calcula como la integral de una función de desempeño conocida con respecto al tiempo, siendo los intervalos límites, el momento en el que se produce la interrupción en el sistema y un momento de inspección determinado (Basu y Lee, 2017).

$$R = \frac{1}{t_h}\int_{t_d}^{t_d+t_h} Q(t)dt$$

Ecuación 1. Ecuación de la resiliencia según Basu & Lee

La anterior ecuación representa el área bajo la curva formada por la degradación y recuperación de la funcionalidad de un sistema en términos de la resiliencia a lo largo del tiempo, donde td representa el inicio de una interrupción al sistema, la funcionalidad

interrumpida puede continuar afectada indefinidamente o puede ser recuperada en un intervalo de tiempo específico.

4.1.3.1. Construcción Resiliente

La estabilidad de los sistemas ha adquirido importancia en las últimas décadas, convirtiéndose en objeto de análisis e investigaciones en diversos campos de estudio, ya que un sistema resiliente es capaz de generar un proceso de recuperación que permite llegar a su estado inicial (antes de la perturbación).

La aplicación del concepto de resiliencia, en diferentes áreas, ha provocado la aparición de nuevos términos como la resiliencia urbana, la resiliencia estructural, entre otras relacionadas con la construcción resiliente.

Desde la perspectiva de la construcción de edificaciones resilientes, se han explorado diferentes aspectos, donde se incorpora el uso de cuatro componentes: robustez, ingenio, recuperación y redundancia, en donde:

- La redundancia representa los recursos de respaldo en cado de falla de un sistema, por lo que debe ser considerada al planificar el proyecto.

- La robustez se refiere a la capacidad de mantener operaciones y funciones ante una crisis. Especialmente constituye el diseño de un sistema.

- La recuperación es la capacidad de retornar o reconstruir las operaciones normales del sistema de forma rápida y eficiente, esto luego de un evento disruptivo.

- El ingenio, o capacidad de gestión, se refiere a la capacidad de prepararse hábilmente, responder y manejar de forma eficiente una crisis o interrupción al sistema analizado.

La construcción resiliente permite mejorar la curva costo beneficio de un sistema, ya que se garantiza seguridad y durabilidad en una estructura, además de asegurar una recuperación del sistema original y no requerir costos de realizar un nuevo proyecto desde cero.

4.1.3.2. Resiliencia y la gestión de riesgo en la Ingeniería Civil

Conforme la resiliencia ha sido estudiada se ha identificado la importancia de conocer la capacidad de resiliencia de un sistema antes de que ocurra un evento disruptivo, para predecir la respuesta que tendrá cierto sistema antes un peligro y no solo cuando se materializa. Por lo anterior, se relaciona la resiliencia con los conceptos de riesgo y amenaza, los cuales permiten crear planes de acción ante una catástrofe y de esta forma reducir la cantidad de pérdidas generadas, en la Ilustración *1*, se muestra la relación de riesgo con las pérdidas después de un evento disruptivo: los huecos son generados por los fallos no corregidos en el

sistema lo que causa que el peligro inminente genere pérdidas en los procesos, estas pérdidas pueden ser reducidas analizando conceptos como la resiliencia.

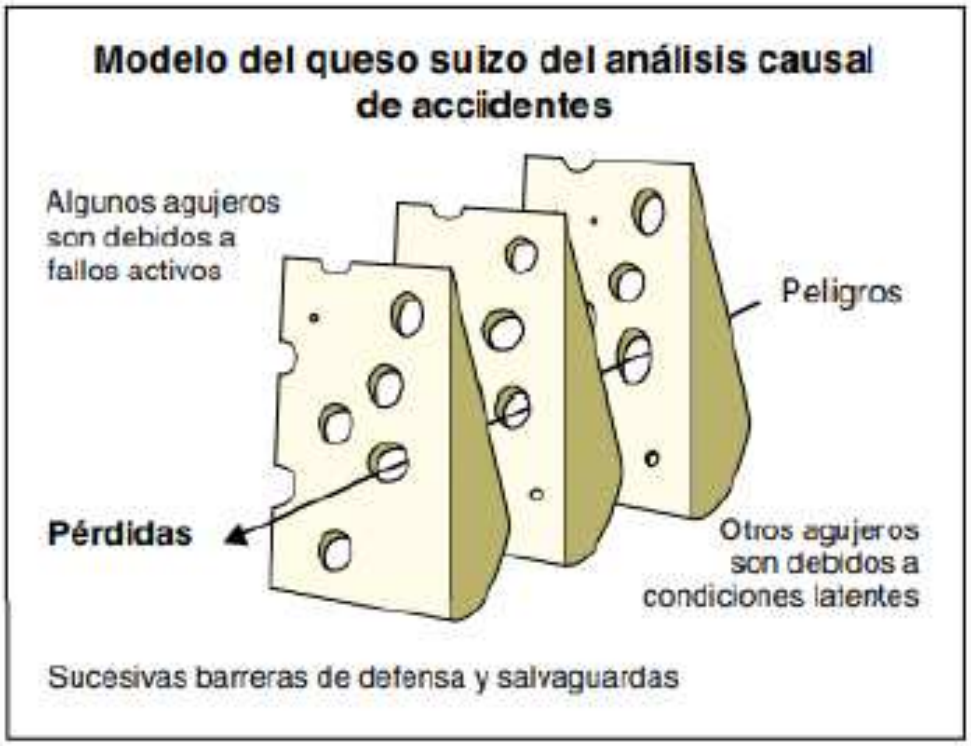


Ilustración 1. Modelo de causalidad (queso suizo) para la gestión de riesgos
Fuente: Ingeniería de la resiliencia: conceptos básicos del nuevo paradigma en seguridad (Rubio Romero y Bestratén Bellovi, 2018)

La resiliencia no solamente es útil para reducir el riesgo de amenaza ante un evento imprevisto, sino que también permite recuperar la funcionalidad del sistema después de una situación adversa, es un concepto que relaciona la capacidad de adaptación, la vulnerabilidad y la sostenibilidad de un sistema; aplicar características resilientes en diseños de estructuras es de vital importancia, y las excavaciones se intensifica su importancia ya que es la base de cualquier estructura construida. Así, se identifica que la resiliencia no sólo es una cualidad de algunas estructuras, es una necesidad a cumplir para garantizar la calidad y vida útil de una construcción (Iñiguez Siguenza, 2017).

El estudio de la resiliencia, aplicada en una estructura, ha adquirido la capacidad de reducir las falencias y reorientar los procesos y mejoras, desde varios ámbitos relacionados con el contexto de la estructura: factores sociales, económicos y ambientales se han relacionado con la resiliencia para proteger el desarrollo sostenible en las ciudades. Esta relación de la resiliencia con desarrollo sostenible permite la reducción de los recursos naturales invertidos en recuperación de estructuras (generadas por fallas debidas a cualquier tipo de evento catastrófico). Disponer de información sobre la resiliencia de un sistema, permite conocer

cómo ese sistema respondería ante eventos adversos y se generaría una ventaja a la hora de tomar las decisiones orientadas a mitigar los efectos producidos por una presión externa.

Como se presentó anteriormente, la resiliencia se contempla como un análisis integrado de varios términos y factores de los proyectos, en ingeniería se utiliza la robustez, la redundancia, la capacidad de gestión (ingenio o similares) y la recuperación, estos factores se pueden relacionar directamente con factores de la gestión de riesgos como la amenaza y la vulnerabilidad, según se muestra en la Ilustración *2*.

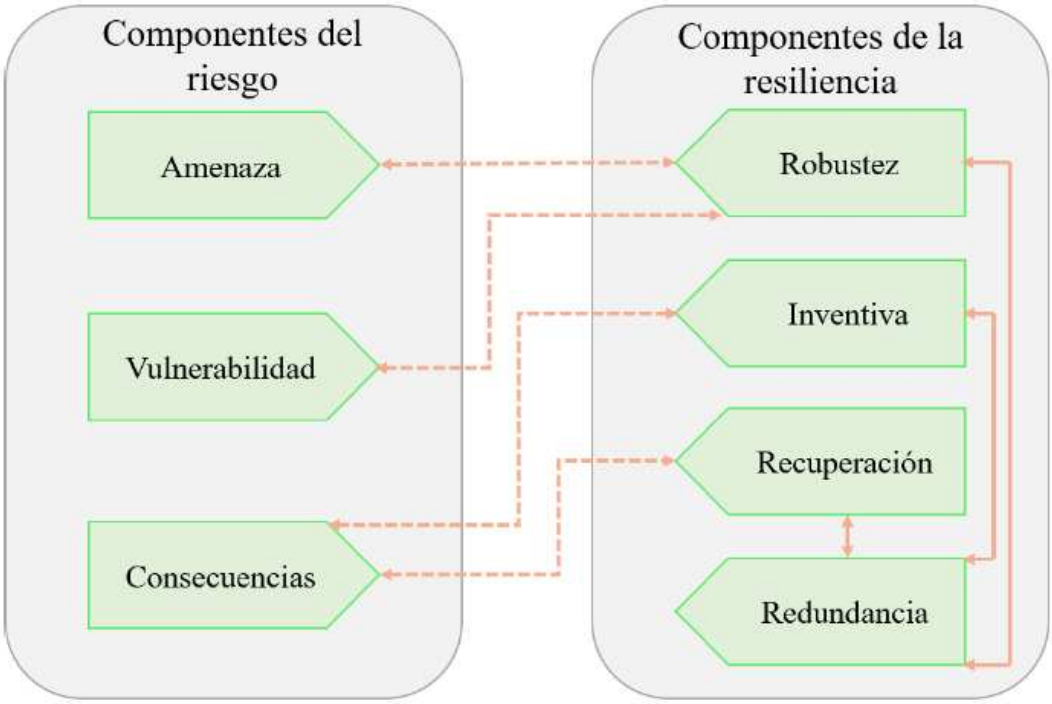


Ilustración 2. Relación entre los componentes de gestión de riesgo y los factores de la resiliencia en la Ingeniería Civil
Fuente: Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá (Rincón y Bonilla, 2021)

También se ha presentado un enfoque de resiliencia hacia la gestión del cambio, en donde la resiliencia es un conjunto dinámico de condiciones que implica el aprendizaje, la adaptación, la anticipación y la mejora de estructuras, actores y funciones básicas. A partir de esto, se han propuesto proyectos de gestión del riesgo eficaces, donde se unifican las similitudes entre el riesgo y la resiliencia dentro de un marco organizativo, lo que implica que, un sistema que sea eficaz en la gestión del riego, se vuelva más resistente a los impactos y a los esfuerzos.

Esta visión de aprendizaje se ha unificado con la presencia de eventos naturales de gran magnitud de la última década (eventos de México en 2005, Chile en 2010 y Japón en 2011), en donde se ha evidenciado que a pesar de que no se pueda retener un fenómeno natural, es posible reducir los daños provocados por los mismos en la infraestructura, incrementando la

resiliencia de las mismas. Desde allí, algunos países en Sudamérica han comenzado a estudiar y analizar programas ingenieriles basados en la resiliencia, obteniendo edificaciones sostenibles y mejorando, a su vez, el desarrollo de las ciudades, esta relación se evidencia en la Ilustración *3*, que permite identificar el comportamiento de una estructura resiliente contra una que no lo es y cómo la resiliencia de una ciudad afecta directamente al desarrollo de esta.

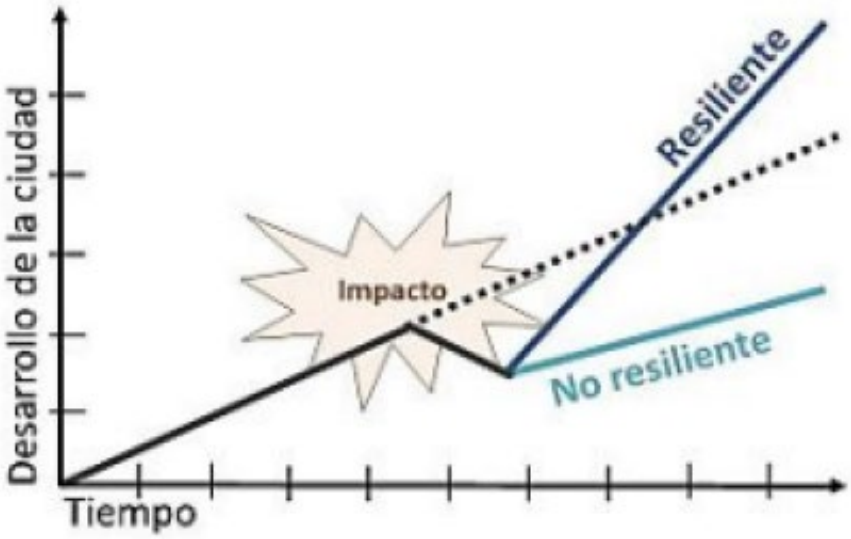


Ilustración 3. Tiempo vs Desarrollo de una ciudad resiliente y una ciudad no resiliente
Fuente: Análisis de la resiliencia ante la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en la ciudad de Machala (Iñiguez Siguenza, 2017)

El artículo "Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán" (Dominguez y Ibrahimbegovic, 2013) menciona el diseño basado en resiliencia (DBR) como un cambio en el paradigma en relación a cómo prevenir, actuar y reaccionar ante los desastres naturales, allí, el complejo urbano es considerado como un sistema, en donde se debe garantizar la seguridad y la operatividad de cada parte del sistema una vez que el desastre haya ocurrido. También se incluye la magnificación del riesgo antes de su ocurrencia para la planeación de casos de cargas en las estructuras y con ello predecir su comportamiento ante la ocurrencia del evento.

De esta manera se evidencia la aplicación de estudios de resiliencia en estructuras desde su diseño (para estructuras nuevas) y estudios de casos de estructuras ya construidas con el fin de establecer la capacidad de resiliencia de las mismas y realizar las mejoras correspondientes con el fin de garantizar su funcionalidad ante un evento natural catastrófico. Así se genera un ciclo de gestión de riesgo relacionado con la resiliencia (Salem et al., 2020) que incorpora elementos de mitigación, reparación recuperación y respuesta, como se observa en la Ilustración *4*.



Ilustración 4. Ciclo de gestión de riesgos
Fuente: Adaptado de Probabilistic Resilience-Guided Infrastructure (Salem, Siam, El.Dakhakhni, & Tait, 2020)

En Hazard Resilient Construction Series No. 1 (Research y Development Programme of National Build, 2015) se presentan recomendaciones para la construcción de casas sencillas. Exponen recomendaciones para cada etapa de la edificación. En las cimentaciones resilientes en casas, se recomienda crear diseños que contengan asentamientos del suelo, permitan la reducción de deformaciones y que no afecten a otras edificaciones aledañas. Se da especial importancia a la capacidad de carga del suelo y se da una muestra de algunos tipos de suelos comunes y sus requerimientos para la identificación sencilla de tipo, profundidad y tamaño de cimentaciones.

4.1.4. RESILIENCIA EN COLOMBIA

En Colombia, el Fondo de Adaptación (FA) se ha encargado de intervenir estructuras para que sean resilientes (Núñez et al., 2019) y se han trabajado algunos artículos e investigaciones con el objetivo de estudiar casos de resiliencia en todos sus posibles ámbitos de estudio (psicología, ingeniería, sociedad).

Sobre la resiliencia estructural se han enfocado estudios hacia la resiliencia de los territorios, integrando factores sociales, económicos, uso del suelo y similares, los siguientes trabajos son muestra del enfoque a la gestión de riesgos de la resiliencia en edificaciones:

“Cálculo y análisis de la resiliencia de los departamentos de Colombia” (Yánez Contreras et al., 2020), donde se comparan la resiliencia de los departamentos de Colombia para mitigar

los efectos de eventos adversos. En este trabajo se analizaron variable como la diversidad de suelos, diversidad de empresas, índice de desempeño integra y la capacidad de carga del ecosistema para calcular un índice de resiliencia.

"Nuevas formas para optimizar la gestión del riesgo desde la perspectiva de territorios resilientes en Colombia" (Vesga Rojas, 2017), donde se hace una revisión de las propuestas de desarrollo de territorios resilientes, donde se busca dar respuesta a la falencia que existe en el desconocimiento del término, reconociendo la importancia de su implementación según sus principios teóricos y prácticos.

4.1.4.1. Resiliencia en estructuras

La guía para el conocimiento y la reducción del riesgo de desastres en los municipios colombianos "Territorios resilientes" (Peralta Buriticá et al., 2010), que tiene la intención de apoyar la gestión del desarrollo municipal desde una perspectiva integral de la gestión de los riesgos de desastres, con la finalidad de hacer un país más humano, seguro, resiliente y ambientalmente sostenible. Mediante la guía se pretende orientar los procesos de planificación de territorio.

Respecto al estudio de la resiliencia en casos de estructuras específicas, analizando el entorno interno y externo de ciertas edificaciones, tenemos ciertos trabajos de grado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, que como el presente trabajo se estudió la resiliencia en función de cuatro parámetros (conocidos como las 4R de la resiliencia): robustez, capacidad de gestión, recuperación y redundancia.

La tesis "Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá" (Rincón y Bonilla, 2021) se enfoca en la obtención, estudio y análisis del índice de resiliencia en muros de contención, en dicho trabajo parten de los parámetros 4R para el análisis de la resiliencia. Además, se estableció que de los cuatro parámetros base del estudio, los más relevantes son la robustez y la redundancia, aunque esta valoración puede deberse a las condiciones propias de las estructuras de contención evaluadas. Luego de determinar el índice de resiliencia se concluyó que el hecho de que una estructura presente una resiliencia óptima antes de un evento abrupto, no implica un índice de resiliencia alto. Sin embargo, una limitante de este proceso investigativo, fue la ausencia de estudios geotécnicos de la estructura evaluada, complicando el proceso de análisis general del proyecto.

"Estimación del índice de resiliencia para un grupo de estructuras del entorno urbano que pueden verse afectadas por el uso de tecnología trenchless en un sector de la primera línea del metro de Bogotá D.C." (Gómez y Benitez, 2021) otra tesis de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, presenta el estudio del índice de resiliencia en el entorno urbano alrededor del uso de la tecnología Trenchless o sin zanja en el traslado de redes de alcantarillado (en el marco de la primera línea del metro de Bogotá D.C.) derivado de la

determinación de los cuatro componentes de la resiliencia en la Ingeniería Civil. Se trabajaron distintos aspectos técnicos, geotécnicos, criterios de sismo resistencia basado en medir los riesgos de desplazamientos en la superficie (subsidencias) debidos a las prácticas Trenchless y modelarlos mediante el método de elementos finitos, para con ello determinar el índice de resiliencia. Los resultados de la resiliencia menores a 1 evidenciaron un entorno no resiliente y se concluyó que un valor de resiliencia alto o bajo no determina un índice de resiliencia similar. También se predijeron posibles afectaciones en la funcionalidad de la zona y la aparición de subsidencias, debidas a la baja robustez y redundancia en el terreno.

4.1.5. RESILIENCIA EN EXCAVACIONES

El desarrollo de la resiliencia en la infraestructura, como parte de la generación de entornos resilientes puede involucrar todos los procesos relacionados con la construcción de edificios, en donde se catalogan las excavaciones para sótanos como una alternativa al aprovechamiento de un terreno, comúnmente usados en los nuevos edificios de la ciudad de Bogotá.

Las excavaciones para sótanos implican la interacción de diferentes aspectos geotécnicos del subsuelo, por lo que su estudio para el índice de resiliencia requiere un análisis minucioso que abarque todos los aspectos que inciden en la estabilidad de una excavación, además de las características del entorno que influyan o se vean influidas por una obra de este tipo.

En “Cimentaciones Especiales Para Construcción De Un Sótano En Edificio Histórico. Estudio de caso: Antiguo Colegio de La Sagrada Familia en Cali (Colombia)” (Arias Londoño, 2017) se concientiza el hecho de que el diseño de excavaciones para sótanos no solo se proyecta en estructuras nuevas, sino que también se adecuan sótanos en edificios existentes (normalmente para destinarlos a estacionamientos) sin embargo se evidencia el riesgo de generar asentamientos excesivos en el terreno debido a cualquier cambio en la carga base del mismo.

Actualmente, las investigaciones que abarcan la resiliencia en estructuras específicas han sido limitadas, pero han sido investigaciones de caso especializadas y con estudios de caso que aportan al análisis de la resiliencia en la Ingeniería Civil. Para el caso de excavaciones para sótanos existen investigaciones centradas en diferentes aspectos que buscan asegurar la estabilidad de estas estructuras, dichas investigaciones contienen análisis profundos que permiten identificar aspectos que afectan los parámetros de la resiliencia en excavaciones para sótanos.

Inicialmente, con el fin de evitar siniestros causados por malas prácticas en las actividades de excavación para sótanos, se han creado diferentes guías de trabajo para excavaciones, con el fin de establecer procesos, actividades, precauciones y recomendaciones a tomar en cuenta para las obras de excavaciones profundas. Por ejemplo para Colombia está la Guía trabajo seguro en excavaciones (Ministerio del Trabajo, 2014), que especifica las características

técnicas y ciertos parámetros que ayudan a garantizar la estabilidad de una excavación, además de presentar la influencia que pueda tener una excavación en las estructuras adyacentes a la misma, y se resalta la importancia de una adecuada señalización y cerramiento previo a los trabajos, como parte de las buenas prácticas al momento de realizar actividades relacionadas con excavaciones profundas.

La investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala "Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios" (Moscozo Barrios, 2011) presenta a los sótanos para edificios como una buena opción para la solución de problemas de espacios, sin embargo caracteriza que este tipo de actividades puede generar contratiempos y sobrecostos en el caso de no ejecutarla con precaución, es por ello que en dicho trabajo se realiza una recopilación de los aspectos técnicos que deben tenerse en cuenta al momento de ejecutar una excavación para sótanos de edificios y se hace especial hincapié en los aspectos de seguridad a fin de evitar riesgos. También se analizan los tipos de suelos y cómo esto incide en las complejidades de la excavación. Además, se recalca la importancia de considerar los muros de contención que soportan las cargas de las tierras vecinas al sótano que está construyéndose.

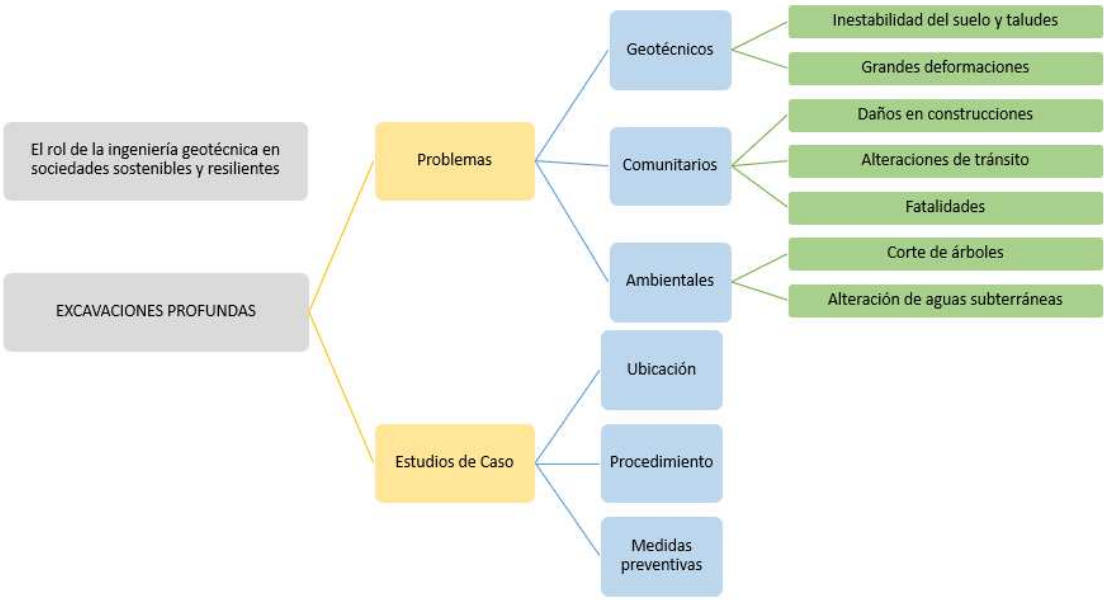


Ilustración 5. Aspectos de las excavaciones profundas que influyen en las sociedades sostenibles y resilientes
Fuente: Adaptado de (Peña Florez et al., s.f.)

En general, se consideran como principales problemas a tratar durante una obra de excavación los factores geotécnicos, los comunitarios (o del entorno) y los ambientales. En donde para los factores geotécnicos se analiza la inestabilidad del suelo y de taludes y las deformaciones en el terreno; daños en las construcciones aledañas, alteraciones de tráfico y accidentes de trabajo son ejemplos de factores comunitarios; y finalmente como parte de la alteración ambiental se deben tener en cuenta la afectación de la capa vegetal superficial y las alteraciones en las aguas subterráneas. El análisis de estos los mencionados factores, en

conjunto con el análisis de caso permitirán reconocer los parámetros que afectan la resiliencia en una excavación, tal y como se muestra en la Ilustración *5*.

Para el caso de Bogotá D.C., se debe tener en cuenta la predominancia suelos arcillosos en el subsuelo de la ciudad para el análisis de los aspectos que influyen en la estabilidad de una excavación para sótanos. En "Aproximación a la estimación de la amenaza geotécnica originada por excavaciones profundas en arcillas de Bogotá: Una contribución a la sustentabilidad en entornos urbanos" (Pineda Jaimes et al., 2020) además de la identificación de la predominancia de suelos sedimentarios arcillosos de origen lacustre en las zonas de expansión de la ciudad de Bogotá D.C. se establece que este tipo de suelos requiere un análisis exhaustivo de la estimación de desplazamientos en la superficie del terreno para las excavaciones en general. En dicho trabajo se evalúa la amenaza originada por las excavaciones en zonas de suelos arcillosos blandos en la ciudad de Bogotá D.C. a partir de la identificación de la probabilidad de ocurrencia de fallas de fondo y desplazamientos en la superficie.

4.2. MARCO CONCEPTUAL

4.2.1. GENERALIDADES

En esta sección se desarrolla la revisión bibliográfica de los conceptos asociados a la estimación y evaluación del índice de resiliencia en excavaciones para sótanos, desde las definiciones de excavaciones para sótanos hasta la determinación de los factores que componen la resiliencia.

Es importante conocer de manera previa al análisis del índice de resiliencia en excavaciones, los conceptos y tipos de excavaciones, los conceptos de probabilidad de falla de fondo, factor de seguridad, reconocer patologías de falla en excavaciones.

Además, es importante generar la revisión del entorno de las excavaciones, analizando riegos, factores intrínsecos y extrínsecos del proceso de excavación para sótanos de un proyecto. También revisar conceptos de amenaza, riesgo y sustentabilidad, permitiendo así un análisis completo de la resiliencia objeto a analizar.

4.2.2. CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL ÍNDICE DE RESILIENCIA

4.2.2.1. Resiliencia

Según la real academia española (RAE) la resiliencia proviene del latín resilire, que significa saltar hacia atrás o rebotar, y se entiende como la capacidad de un material, un mecanismo o un sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado una perturbación a la que había estado sometido.

Partiendo de la definición se han derivado aplicaciones de la palabra resiliencia a diferentes campos de estudio del ser humano, desde las áreas de la salud hasta la física e ingeniería; pero en general se ha usado para tratar temas de adaptación y recuperación de un estado sin perturbación. Debido a que el fin último que representa el concepto de resiliencia es superar perturbaciones con rapidez y sin influir negativamente en el estado óptimo del sistema analizado.

En general, la resiliencia es la capacidad que tiene un sistema de recomponerse después de haber sufrido un evento traumático. Dicho de otra manera, la estructura recupera la funcionalidad luego de un acontecimiento adverso. La resiliencia de la estructura, facilita la disipación de la energía sin que esto implique consecuencias irreparables.

El propósito fundamental de la resiliencia es resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de un impacto negativo de forma oportuna y eficiente. La aplicación de este parámetro en el diseño de estructuras ayuda a mitigar los efectos de los desastres naturales, para que las estructuras puedan recuperarse después de estos impases, generando menos gastos de refuerzo.

La curva de funcionalidad de una estructura como se evidencia en la Ilustración *6* permite representar la resiliencia en términos de la operacionalizad de una estructura frente a un evento disruptivo. En donde se inicia con el funcionamiento normal de una estructura (punto A) hasta que un evento ocurre (punto B), la funcionalidad cae (punto C) y desde allí, sí existe resiliencia se empezará a recuperar la funcionalidad inicial hasta alcanzar nuevamente el nivel inicial (punto D).

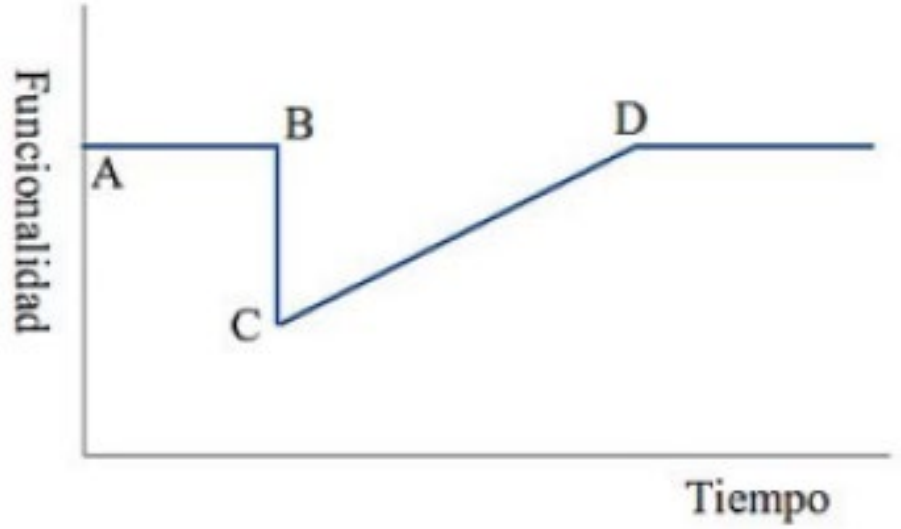


Ilustración 6. Curva de funcionalidad de una estructura
Fuente: (Iñiguez Siguenza, 2017)

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil estructural, la resiliencia se refiere no solamente a la seguridad de estructuras convencionales (edificios, hospitales, etc.) respecto a riesgos naturales tales como los huracanes, sino también a la seguridad de infraestructura

convencional y no convencional. En otras palabras, el área urbana completa debe ser tratada como un sistema complejo, en donde su buen funcionamiento depende de garantizar la seguridad y desempeño de cada uno de los componentes de sistema. Por lo tanto, en un sistema basado en resiliencia, la infraestructura cumple un rol tan importante como vigilar la seguridad de las estructuras (Dominguez y Ibrahimbegovic, 2013).

4.2.2.2. Índice de resiliencia

Factor numérico que se determina a partir de un análisis cualitativo, semi - cuantitativo y probabilístico de una estructura, mediante el uso de programas especializados empleando como base cuatro criterios fundamentales: Robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación, que permiten estimar la capacidad de resiliencia de una estructura y, de esta forma, determinar la probabilidad de falla de la misma en un tiempo determinado y bajo unas condiciones geomorfológicas, geológicas y de drenaje específicas (National Institute of Building Sciences, 2018).

Dentro de hallazgos significativos en la gestión del riesgo se tiene los propuestos por los investigadores MCEER quienes proponen la gestión basados en cuatro postulados; robustez, enfocado a la capacidad de los sistemas, los elementos del sistema, y otras unidades de análisis para soportar desastres sin degradación significativa o pérdida de la actuación; redundancia, enfocado a la capacidad de sustituirse para satisfacer los requisitos funcionales; ingenio, hace referencia a la capacidad de diagnosticar y dar prioridad a los problemas e iniciar soluciones identificando y movilizando los elementos económicos, informativos, tecnológicos y humanos necesarios para una respuesta rápida y oportuna y rapidez, la capacidad de restaurar la funcionalidad de manera oportuna y evitar interrupciones (Vesga Rojas, 2017).

- Robustez

Es la capacidad de mantener operaciones y funciones ante un evento atípico, en donde se incluye la estructura analizada y el diseño de dicha estructura. Dentro de la resiliencia, la robustez se define como la habilidad de los elementos, sistemas y otras unidades de análisis de soportar presiones o demandas sin sufrir daño, degradación o pérdida de función (Rincón y Bonilla, 2021).

- Redundancia

Se refiere a la medida en que los elementos, sistemas y otras unidades de análisis pueden cumplir funcionalmente los requerimientos propios en caso de disrupción en los sistemas primarios. Este criterio involucra la capacidad de seguir funcionando una vez se ha deformado la configuración principal del sistema (Rincón y Bonilla, 2021).

- Capacidad de gestión

Hace referencia a la capacidad de preparase hábilmente, responder y manejar un evento atípico de forma rápida y eficiente. Dentro de este parámetro se toma en cuenta el mantenimiento de la estructura y la gestión alrededor de la misma (Rincón y Bonilla, 2021).

- Reconstrucción/ Recuperación

Es la capacidad de regresar o reconstruir las operaciones normales de manera más rápida y eficiente posible, luego de un evento atípico (Rincón y Bonilla, 2021).

En general, la resiliencia permite identificar la capacidad con la que un sistema se recupera y continúa con su funcionamiento normal después de que se presenta un evento atípico.

A continuación, se observa, mediante las siguientes gráficas, la forma detallada de la incidencia de cada uno de los parámetros descritos anteriormente (robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación) en la determinación de la Resiliencia, respecto a la curva de funcionalidad de la Ilustración 6.

- En un sistema con alta robustez y redundancia, se disminuye la afectación del sistema a causa del evento, tal y como se evidencia en la Ilustración *7*.

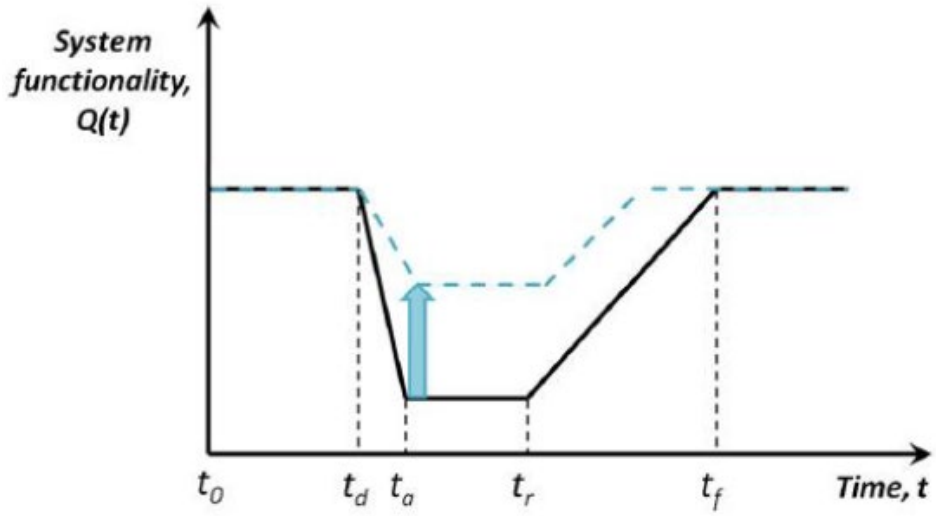


Ilustración 7. Sistema con alta robustez y redundancia
Fuente: (Basu & Lee, 2017)

- Un sistema de alta capacidad de gestión se disminuye el tiempo con el que la estructura recupera su funcionalidad después del evento disruptivo, como se observa en la Ilustración *8*.

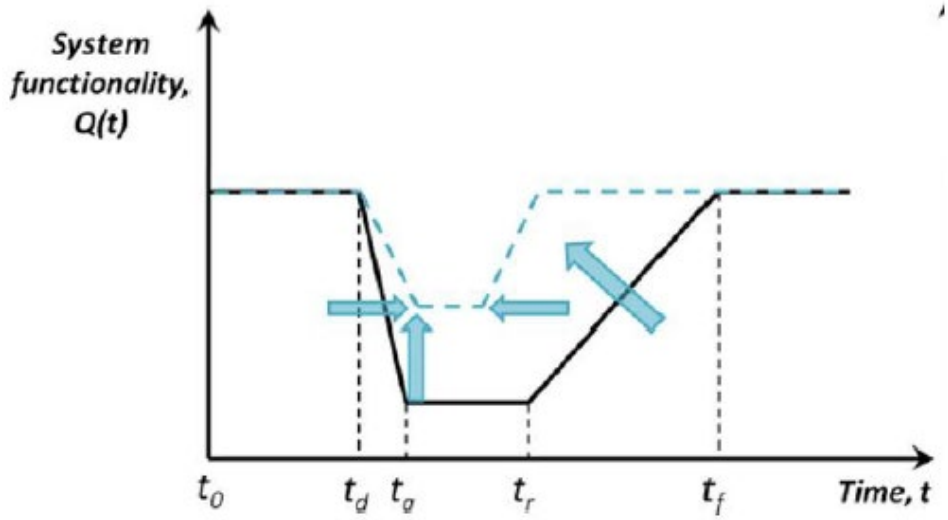


Ilustración 8. Sistema con alta capacidad de gestión
Fuente: (Basu & Lee, 2017)

- La alta recuperación de una estructura permite que la reconstrucción general de la misma sea en tiempos rápidos como se evidencia en la Ilustración *9*.

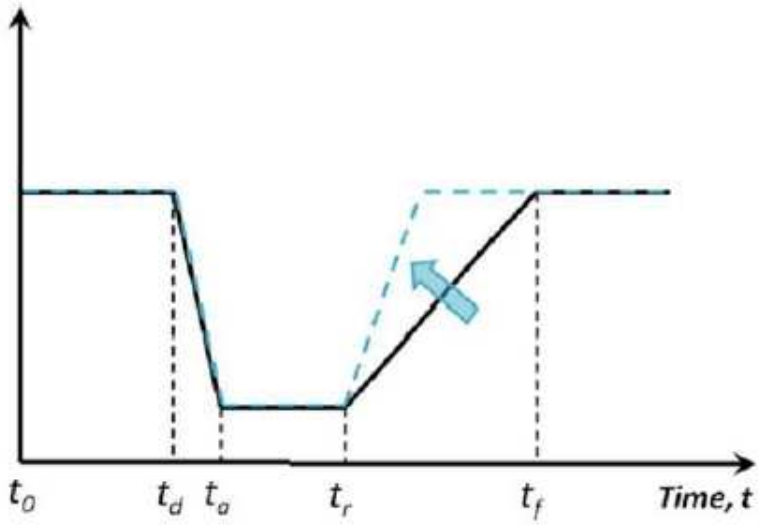


Ilustración 9. Sistema con alta capacidad de recuperación
Fuente: (Basu & Lee, 2017)

4.2.2.3. Gestión de riesgos

El riesgo es evaluado teniendo en cuenta básicamente las amenazas para identificar y evaluar la vulnerabilidad.

La gestión de riesgos implica el cálculo anticipado de los efectos o pérdidas y por tanto la posibilidad de reducirlos. Es necesario entonces, definir en primera instancia las variables con las que se puede cuantificar cada uno de los factores que constituyen el riesgo. Para ello

se pueden incorporar conceptos, conocimientos y herramientas para prever dónde, cuántos, cuáles son los elementos del entorno natural, social, material que resultarán afectados y el costo de dicha afectación, estas condiciones específicas del riesgo responden a características locales tal y como se muestra en la Ilustración *10* (Peralta Buriticá et al., 2010).

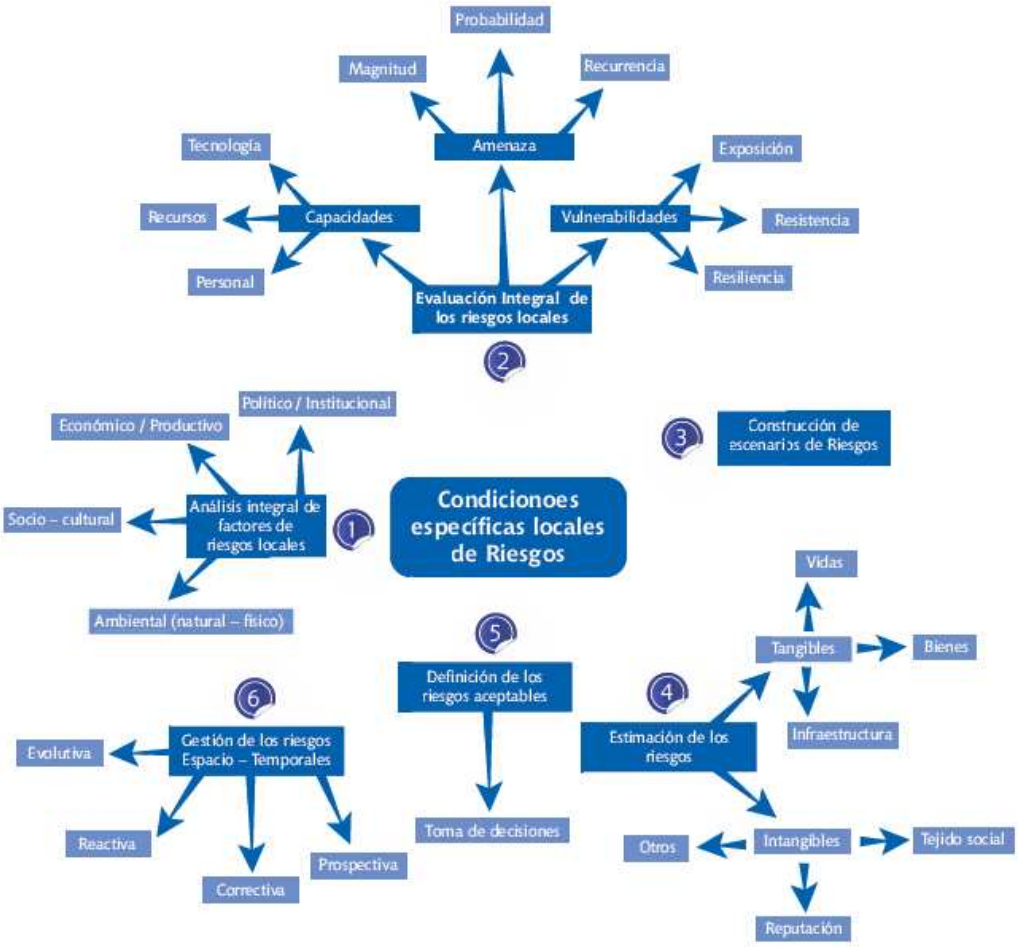


Ilustración 10. Modelo explicativo para la gestión de riegos
Fuente: (Peralta Buriticá, Velasquez Peñalosa, & Enciso Herrera, 2010)

La estimación de la redundancia se relaciona directamente con la gestión de riesgos, y el análisis general del índice de redundancia es similar a la construcción de un escenario de riesgo, lo que permite una toma de decisiones frente a la optimización de un sistema.



Ilustración 11. Pasos para la construcción de un escenario de riesgo
Fuente: (Peralta Buriticá, Velasquez Peñalosa, & Enciso Herrera, 2010)

- Amenaza

La amenaza es un factor de riesgo que puede constituir un peligro para la integridad de los seres humanos y sus bienes. Para que exista amenaza debe existir, consecuentemente, algo o alguien que esté expuesto y que sea vulnerable ante ella (Peralta Buriticá et al., 2010).

En la guía de territorios resilientes (Peralta Buriticá et al., 2010) se especifica que, para el caso de las amenazas naturales, generadas en la dinámica del planeta tierra y que generan peligro sobre la ocupación de un territorio, se debe tener en cuenta estos factores:

- La posibilidad que un fenómeno potencialmente peligroso se manifieste en un lugar y período determinado (por ej. recurrencia en términos de días, meses, años, décadas, siglos, etc.).

- Una cobertura dada (es decir un área de impacto o radio de acción).

- Una magnitud asociada (por ej. cantidad de energía liberada en términos de volúmenes de agua o tierra desplazada, altura de inundación, etc.).

- Una duración en términos de tiempo (inicio y fin del fenómeno); por ej., súbitos, como los terremotos, o lentos, como las inundaciones en zonas de valle).

- La presencia de uno o varios elementos/sistemas expuestos (sociales, económicos, físicos, ambientales, etc.) en el aérea de ocurrencia del (los) fenómeno (s), que puedan resultar afectados o dañados.

- Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es la exposición, la debilidad interior, exclusiva, que afecta a un grupo social, económico, político, físico, ambiental, humano, o a una infraestructura ubicada en un territorio susceptible de ser afectada (qué tan débiles o frágiles pueden llegar a ser) de sufrir daño o recuperarse posteriormente en el menor tiempo posible (capacidad - resiliencia) debido a la afectación de un fenómeno amenazante (Peralta Buriticá et al., 2010).

La guía de territorios resilientes (Peralta Buriticá et al., 2010) expresa que sí un elemento expuesto a una amenaza no tiene riesgo de dañarse, entonces este no es vulnerable, por lo que determina que la vulnerabilidad en una sociedad se relaciona con la interacción de dicha sociedad y los recursos naturales que ocupa en su entorno. Adicionalmente, la vulnerabilidad condiciona la calidad de la existencia de una sociedad, ya que al determinar los factores que inciden en la generación de vulnerabilidad, se logra comprender el punto fundamental para intervenir las causas de ésta y no las consecuencias, como usualmente se hace.

La Ilustración 11, permite visualizar gráficamente el proceso para la construcción e identificación de escenarios de riesgo, lo cual es fundamental para la creación de condiciones resilientes.

4.2.3. CONCEPTOS RELACIONADOS CON EXCAVACIONES

4.2.3.1. Excavación

Una excavación es la operación de cortar y remover cualquier clase de suelo independiente de su naturaleza o de sus características físico-mecánicas, dentro o fuera de los límites de construcción. Su ejecución incluye las operaciones de nivelación y evacuación del material removido a su lugar de disposición final (Moscozo Barrios, 2011).

Una excavación es un movimiento de tierra cuyo objetivo se enfoca en el retiro de esta, con el fin de facilitar las condiciones del terreno, para la construcción de una obra nueva, actividades de minería e inclusive la construcción de túneles. Según la guía de trabajo seguro en alturas (Ministerio del Trabajo, 2014) una excavación es el corte, cavidad, zanja o depresión hecha por el hombre mediante la remoción de tierra, arena, gravilla, rajón, recebo, etc.

Aplicar actividades de excavación implica la presencia de riesgos que deben ser mitigados con el objetivo de garantizar la seguridad de quienes realizan dicha actividad. Algunas de las actividades realizadas para asegurar la estabilidad de una excavación son: Tablestacado, Enmallado, Talud, Entibado y Baranda.

4.2.3.2. Tipos de excavaciones

Según SENA (1991) la clasificación más general de las excavaciones es según la técnica usada: excavación mecánica y excavación manual. Las excavaciones mecánicas son aquellas en las que se utiliza cualquier equipo con una fuente de potencia específica (electricidad, presión, motor de combustión o la gravedad). Las excavaciones manuales son ejecutadas por el personal de obra correspondiente con ayuda de herramientas como palas, picos, etc.

También, dependiendo de otros aspectos, hay otras clasificaciones de excavaciones como: por profundidad, por nivel de detalle, por tipo de material excavado y por grado de humedad (Moscozo Barrios, 2011).

- Clasificación excavaciones por profundidad

Las excavaciones por profundidad se subdividen en poco profundas y profundas. Las excavaciones poco profundas son aquellas menores a cinco metros de profundidad, normalmente se estabilizan con taludes y apuntalamientos. Las excavaciones profundas tienen una profundidad mayor a cinco metros, en este tipo de excavaciones se usan complejos sistemas de protección de taludes (enclavado, micropilotes, pilotes, tablestacas), se deben contemplar también la construcción de rampas de acceso de maquinaria y personal a la rampa.

En las excavaciones profundas se debe tener en cuenta el equilibrio de masa y energía en cada parte del terreno, como se evidencia en la Ilustración *12*, esto para evitar inestabilidad y colapsos. Además, es recomendable usar muros de contención construidos en conjunto como avanza la excavación.

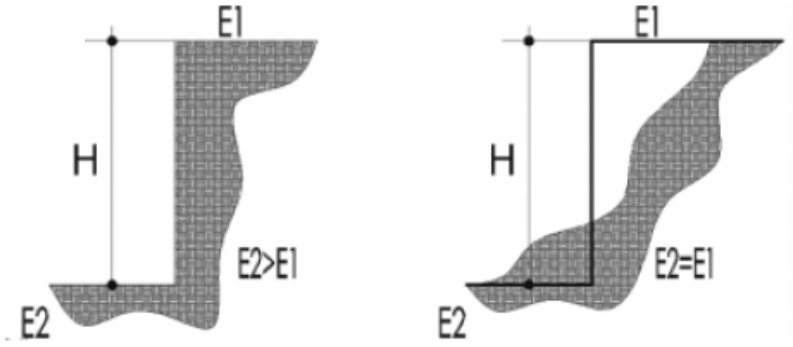


Ilustración 12. Equilibrio de masas y energía para una excavación profunda
Fuente: (Moscozo Barrios, 2011)

- Clasificación excavaciones por nivel de complejidad

Las excavaciones por profundidad se subdividen en masivas, estructurales y en rampa. Las excavaciones masivas son aquellas en las que se realizan grandes movimientos de suelo y se emplea maquinaria de más de 80 HP de potencia. Las excavaciones estructurales son las que se realizan para realizar las franjas de cimentación de una construcción, en este tipo de excavaciones se remueven entre 50 y 60 metros cúbicos de material por hora. Las excavaciones en rampa son las que se realizan para remover las rampas de salida de vehículos creadas en excavaciones de alto volumen, el rendimiento de este tipo de excavaciones oscila entre 50 y 60 metros cúbicos por hora.

- Clasificación excavaciones por tipo de material excavado

Las excavaciones por profundidad se subdividen en excavación en roca y excavación en material común tierra, conglomerado o roca descompuesta. Las excavaciones en roca se realizan en materiales de tamaños mayores a 50 cm, en este tipo de excavaciones se deben realizar demoliciones controladas y fractura de material. La excavación común en tierra, conglomerado o roca descompuesta es aquella en donde el material no es roca definida y puede extraerse por métodos convencionales sin mayores problemas. Entre los materiales comunes de la tierra están las arcillas, limos, arenas y piedras pequeñas.

- Clasificación excavaciones por grado de humedad

Las excavaciones por grado de humedad se subdividen en húmedas y secas. Las excavaciones húmedas son las que se ejecutan por debajo del nivel freático por lo que se requieren equipos de bombeo para la extracción de agua. Las excavaciones secas son aquellas que no se asimilen con la definición de excavación húmeda.

4.2.3.3. Excavaciones para sótanos

Un sótano es una estructura que se encuentra debajo del nivel natural del suelo (Moscozo Barrios, 2011) en su mayoría se usan para la ubicación de elementos complementarios al uso del edificio, elementos como cuarto de bombas, estacionamientos y plantas eléctricas son comúnmente ubicados en los sótanos de las construcciones. En la Ilustración *13*, puede observarse gráficamente un modelo de excavaciones para sótanos, donde el nivel natural del terreno se identifica de color, el amarillo es la profundidad a la que se excavo, es decir, el nuevo nivel de superficie y el gris, hace las veces de paramento o muro de contención para el soporte de las laderas.

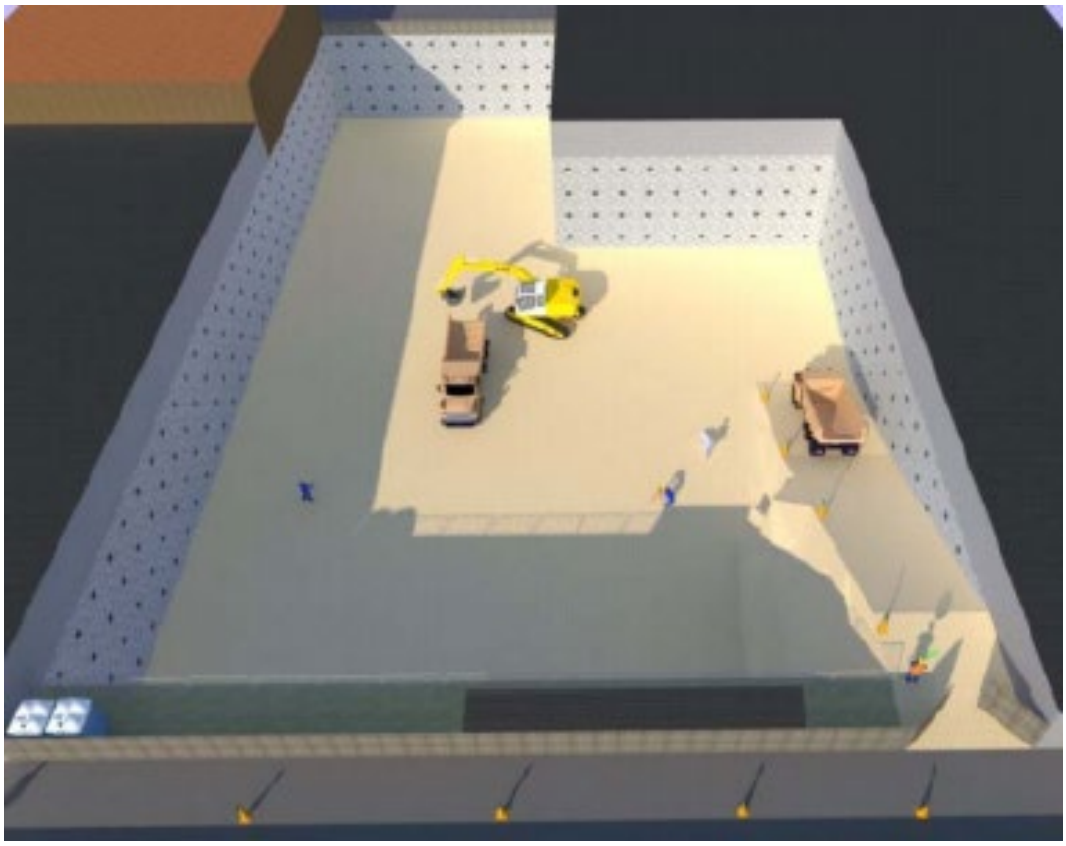


Ilustración 13. Modelo gráfico de una excavación para sótano
Fuente: (Moscozo Barrios, 2011)

4.2.3.4. Estudios necesarios para la ejecución de una excavación

Según “Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios” (Moscozo Barrios, 2011) para ejecutar los trabajos de excavación de tierra, se debe contar con estudios previos, estos estudios deben aportar información concreta de las características del suelo a remover, antes de iniciar las labores de excavación.

Para iniciar una excavación se aconseja tener conocimiento de los siguientes parámetros:

- Estudio estratigráfico del subsuelo a intervenir, en donde se identifiquen los tipos de suelo bajo la superficie.

- Ubicación exacta del nivel freático del lugar, esto permite determinar el proceso constructivo con el fin de evitar invasión de aguas en el proyecto.

- Ubicación de edificaciones vecinas, en lo posible se debe conocer la estructura y cimentación de las edificaciones adyacentes al proyecto.

- Cota de la máxima profundidad de la excavación.

- Proyectar los obstáculos existentes en el subsuelo que pudiera afectar la excavación. Por ejemplo, las redes de comunicaciones (líneas de teléfono, internet, etc.), redes de agua potable, redes de drenaje u otros sistemas.

4.2.3. CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA ESTABILIDAD DE EXCAVACIONES

4.2.3.1. Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) en la Ingeniería Civil es el cociente de la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes de un sistema, en la Geotecnia el factor de seguridad relaciona las fuerzas o esfuerzos cortantes resistentes y los esfuerzos cortante actuantes. Tal y como se representa en la Ilustración *14*.

$$FS = \frac{F_R}{F_A} \qquad FS = \frac{\tau_f}{\tau_a}$$

Ilustración 14. Relación que define el factor de seguridad
Fuente: (Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), 2016)

El factor de seguridad se utiliza para evaluar los estados límites de un sistema, pueden aplicarse manera directa e indirecta. En Colombia, la NSR-10 define ciertos valores de seguridad (básico o directo e indirecto) dependiendo de la magnitud de la obra, las consecuencias de una posible falla en la estructura, la calidad del suelo sobre el cual se dispondrá la estructura.

4.2.3.2. Pantallas de contención

Normalmente se utilizan pantallas de hormigón o acero para la contención de un terreno en una excavación, esto para contrarrestar los empujes que produce el subsuelo al momento de modificar las cargas y presiones naturales que tiene en su estado natural.

Las contenciones de pantallas comprenden la pantalla en sí y el sistema de apoyos inferiores (clavas) y anclajes que le permiten cumplir su función de contención.

Según “La excavación urbana y los edificios vecinos” (García Carrera, 2015) los métodos más convencionales utilizados como muros pantalla de contención son:

- Muros berlineses: Elementos de estructura vertical, perfiles metálicos I o H, entre los que se dispone alternativamente anclajes y apoyos (a medida que avanza la excavación, vigas o placas que refuerzan el terreno), tal y como se muestra en la Ilustración *15* e Ilustración *16*.

Usualmente se utiliza este tipo de pantalla de contención en muros temporales de fosas de cimentación sobre el nivel freático.



Ilustración 15. Muros berlineses para contención en excavaciones
Fuente: https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/soluciones/diseno-de-excavacion/diseno-de-muro-berlines/

- Muros compuestos por pilotes o micropilotes: Formados por elementos verticales tipo pilotes.

- Cortinas de tablestaca: Son paredes hechas de elementos prefabricados, de acero o de hormigón especialmente proyectados para los trabajos de cimentación y contención del suelo o de agua (según los requerimientos de la estructura). Las tablestacas son elementos estructurales largos que se hincan en sentido vertical con el fin de formar paredes o muros continuos. Las cortinas de tablestacas tienen cierta flexibilidad que permiten dimensiones longitudinales mayores a otros tipos de pantallas de contención.

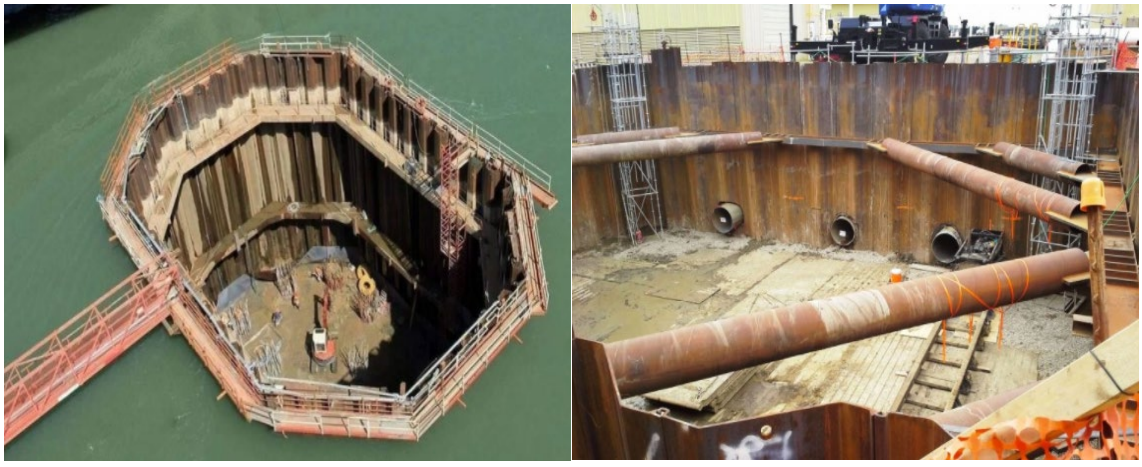


Ilustración 16. Muros berlineses para contención en excavaciones
Fuente: https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/tablestaca/

- Muros pantalla: Se construyen perforando tramos reducidos para luego llenarlos de hormigón, también se pueden disponer paneles prefabricados.

4.2.3.3. Estado límite en excavaciones

Un estado límite es una situación en la que al sobrepasar cierta magnitud física se produzca una falla parcial o total en un sistema, también se puede producir la pérdida de funcionalidad de dicho sistema. Este concepto se utiliza para aportar seguridad a la integridad de una estructura.

Según la NSR-10 en el diseño de excavaciones se consideran los estados límite de falla y de servicio:

- Estado límite de falla

La verificación del estado límite de falla permite revisar la seguridad del terreno respecto a la resistencia al corte del mismo. El estado límite de falla involucra las cargas que el suelo va a soportar y los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante dicho suelo (ángulo de fricción interna del suelo y cohesión).

Según la NSR-10 el estado límite de falla considera el colapso de los taludes de una excavación, la falla en los cimientos o construcciones de apoyo, las fallas de fondo de la excavación (por corte o por sub presión) y el colapso de estructuras adyacentes a la excavación.

Dentro de la seguridad y estabilidad de una excavación, para el estado límite de falla, se debe tener en cuenta la influencia de la presión de agua en el subsuelo, la profundidad de excavación, la inclinación de taludes y estabilidad de la contención de la excavación.

El análisis de estabilidad debe realizarse con un enfoque a corto y largo plazo, evitando también afectaciones en los predios vecinos a la excavación. Para el análisis de estabilidad de taludes se usará un método de equilibrio límite tomando en cuenta las discontinuidades del suelo y las sobrecargas en la orilla de la excavación (Norma Sismorresistente 2010).

- Estado límite de servicio

En la revisión del estado límite de servicio se analizan los posibles asentamientos del terreno a consecuencia del incremento de esfuerzos ocasionados por su intervención debido a una estructura. Los asentamientos analizados pueden ser a corto y a largo plazo. Las deformaciones del suelo pueden ser por la reacomodación de las partículas del mismo (disminución de la relación de vacíos de las partículas de suelo) o una deformación de los granos de suelo.

La NSR-10 especifica que los valores esperados de los movimientos verticales y horizontales en el área de una excavación y sus alrededores deben ser menores a los que puedan causar daños a construcciones o instalaciones aledañas, además se debe evitar que no se ocasionen movimientos intolerables en el edificio relacionado con la excavación realizada.

La estimación de los movimientos verticales del área de excavación se realiza, según la NSR-10, teniendo en cuenta la teoría de la elasticidad, en donde se estiman los decrementos de los esfuerzos verticales del suelo.

4.2.3.4. Falla de fondo

La falla de fondo en excavaciones profundas, en arcillas blandas y saturadas, se manifiesta como un levantamiento brusco del fondo de la excavación a la vez que se presenta el hundimiento de la superficie del terreno aledaño a la excavación, es posible que se cause también el colapso de la estructura de contención de la excavación.

En suelos cohesivos se puede producir una rotura del fondo de la excavación debida al descenso de la tensión vertical por efecto de la excavación. Así mismo, en suelos muy pre consolidados, la tensión efectiva horizontal bajo el fondo de la excavación se reduce en menor proporción que la vertical, logrando estados de plastificación (García Carrera, 2015).

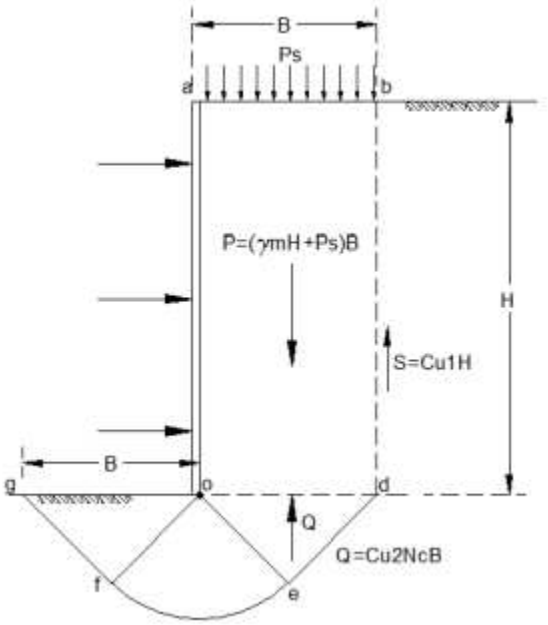


Ilustración 17. Mecanismo de terzaghi - prandtl para la falla de fondo de excavaciones
Fuente: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/430/A5.pdf?sequence=5

Para analizar la condición crítica de este tipo de falla, Terzaghi propuso un mecanismo en donde se presenta la sección transversal de una excavación en donde la profundidad H, la longitud L de la excavación y el espesor Z del estrato de arcilla se consideran infinitos, justo como se muestra en la Ilustración *17*.

El mencionado mecanismo de falla se conforma de un prisma rectangular (formado por los puntos "abdo" en la Ilustración 17) de suelo cuyo peso descansa sobre un mecanismo de capacidad de carga (formado por los puntos "defg" en la Ilustración 17), el peso se empieza a deslizar sobre el interior de la excavación y se genera sobre el plano "go" un desplazamiento ascendente y sobre el plano "do" un desplazamiento hacia abajo.

La NSR-10 especifica que la falla de fondo en excavaciones, producida por flujo de agua o por erosión interna, debe ser analizada en suelos especiales sin cohesión. Se debe analizar además la estabilidad de los elementos de contención (fallas de fondo y estructural). Este análisis de estabilidad debe ser realizado por medio de un método de análisis límite.

4.2.3.5. Análisis de comportamiento geotécnico de excavaciones

El análisis de estabilidad es un proceso físico matemático en el que se relacionan las fuerzas actuantes en un sistema de talud o excavación analizado, de esta manera se determina el comportamiento y condiciones de estabilidad de dicho sistema. Existen diversos métodos de análisis de estabilidad en suelos, donde se destaca el modelo probabilístico de elementos finitos.

- Método de elementos finitos

Este método se basa en la división de la masa del sistema analizado en elementos finitos interconectados por medio de nodos, los resultados de este análisis se presentan en esfuerzos y desplazamientos en los nodos. El método de elementos finitos se caracteriza por ser preciso, además que permite la consideración de variedad de factores que afectan la estabilidad de un sistema.

Las condiciones de falla presentadas a través de este método son independientes a la geometría de la superficie de rotura, lo cual permite obtener resultados de esfuerzos y desplazamientos a partir de una superficie infinita (Gómez Martín, 2020).

4.2.3.6. El entorno de la excavación

La influencia del entorno del emplazamiento de la obra puede tener un papel relevante, según (García Carrera, 2015) la presencia de edificios o instalaciones y las características de los mismos (distancia, profundidad, dimensiones) se deben tener en cuenta para determinar su influencia en la estabilidad de una excavación.

En el trabajo realizado por (García Carrera, 2015) se establecer cuatro factores importantes para analizar la influencia de una excavación en su entorno:

- Localización de instalaciones: Se recomienda revisar el emplazamiento urbano de conductos de servicios públicos.

- Rebatimiento del nivel freático: Se debe revisar la dinámica hídrica del subsuelo y la permeabilidad del mismo.

- Ejecución de la contención de la excavación: Controlar el proceso de la excavación permite controlar los cambios de esfuerzos en el subsuelo debido a la excavación, con ello se logra también que las cimentaciones aledañas también se ajusten a los nuevos esfuerzos del subsuelo.

- Construcción de cimentaciones profundas: Utilizar una correcta cimentación permite superar los retos que el subsuelo proponga para la nueva estructura, por lo que la destinación de que tipo de cimentación usar debe ser analizada con rigor teniendo en cuenta las características del suelo y de la estructura proyectada.

5. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA EN EXCAVACIONES PARA SÓTANOS

5.1. GENERALIDADES

Durante el desarrollo de un proyecto de construcción se cuenta con cierto grado de incertidumbre respecto a eventos externos que puedan generar afectaciones al mismo, por esta razón es de gran importancia contar con una herramienta que permita estimar la resiliencia o capacidad de recuperación ante un evento disruptivo o imprevisto durante cualquier etapa del desarrollo del proyecto.

Es por esta razón que se busca establecer una metodología que permita cuantificar y cualificar cada uno de los factores influyentes en la determinación de la resiliencia de un proyecto.

Con el objeto de delimitar las condiciones a evaluar en pro de la definición de resiliencia, se tomaron parámetros enfocados a la excavación y su entorno. Las ponderaciones otorgadas a cada uno de estos factores se asignaron con base a la relevancia que poseen, el objetivo es abarcar todas las condiciones importantes en el marco del desarrollo de esta actividad.

En este capítulo se presenta la forma en la que fue considerada la evaluación y ponderación de la resiliencia y cada uno de los criterios que la componen, estos criterios serán analizados en dos momentos específicos respecto al un evento disruptivo (antes y después del dicho evento).

5.2. ÍNDICE DE RESILIENCIA EN EXCAVACIONES PARA SÓTANOS

El índice de resiliencia, como se ha definido a lo largo del presente trabajo, representa la capacidad que tiene un sistema, en este caso un sistema de excavación para sótanos (donde se incluyen las etapas de excavación, el sistema de contención de la excavación, y todos aquellos elementos que están expuestos en la superficie del medio físico de la excavación), de recuperarse de un evento disruptivo y se puede representar de acuerdo con la Ecuación 2:

$$IR = \frac{R(t_1)}{R(t_2)}$$

Ecuación 2. Ecuación del índice de resiliencia

La Ecuación 2 propone evaluar el índice de resiliencia (IR) a partir de un periodo inicial $R(t_1)$, en donde la estructura se encuentra funcionando normalmente, y un periodo final $R(t_2)$, en el momento después de que se ha presentado un evento disruptivo y las condiciones de la estructura cambian de acuerdo a la magnitud de dicho evento.

Los criterios que hacen parte de la resiliencia en la ingeniería son: robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación. Cada uno de ellos cuenta para su definición con la

evaluación de factores cualitativos y cuantitativos que dan cuenta del estado de la estructura y su entorno, para este caso, serán evaluadas las características de un sistema de excavaciones para sótanos.

La resiliencia propiamente evaluada en excavaciones para sótanos ha sido poco estudiada, razón por la cual, con este trabajo se pretende definir una directriz para que en el futuro pueda haber un mayor análisis en construcciones de este tipo, que permitan prever posibles irregularidades y asegurar un comportamiento resiliente en función de la aplicación de los parámetros evaluados.

En la mayoría de los casos, las dificultades que presentan las excavaciones obedecen principalmente al desplazamiento lateral del suelo confinado posterior al movimiento de tierras, y el nivel freático que pueda existir una vez es retirado el material de excavación. Sin embargo, existen otras condiciones que en ocasiones pasan desapercibidas, pero son importantes en el éxito de una excavación, por lo que son contempladas y definidas en el desarrollo de este proyecto. Con lo anterior, se parte de la definición de las actividades relacionadas al trabajo de excavación, facilitando de esta forma la determinación de los parámetros relacionados a la resiliencia de la misma.

En el mencionado análisis del índice de resiliencia y los factores que lo determinan se utilizó una metodología probabilística, donde usando técnicas estadísticas subjetivas se hizo una estimación, prueba y predicción de los factores que se identificaron en las excavaciones y que afectan el índice de resiliencia de las mismas. Se debe tener en cuenta que el método probabilístico conlleva riesgos e incertidumbres, que pueden ser analizadas en un futuro trabajo. De esta manera para la presente investigación se estimaron parámetros de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación de manera subjetiva al nivel de afectación que genera dicho parámetro en la funcionalidad del sistema analizado.

Para la evaluación cuantitativa de la resiliencia y de los parámetros se propuso un índice variable entre 0 y 1, donde 1 representa una mayor influencia del parámetro analizado y 0 representa la carencia del parámetro evaluado.

Por otra parte, para la evaluación general y particular de cada criterio, se propuso una ponderación de 0% a 100%, donde entre mayor sea este valor, mayor es la importancia del aspecto según sea el caso. Al final, en cada parámetro, los factores de ponderación evaluados deben sumar el 100%.

Como primera aproximación y teniendo como base la revisión bibliográfica presentada en los antecedentes, los factores de ponderación que afectan a cada uno de los aspectos de los parámetros que componen la resiliencia y el propio índice de resiliencia, fueron determinados de acuerdo con la importancia que representaron el instante previo al evento disruptivo y el momento luego de que ocurre dicho evento.

De acuerdo a lo anterior se proponen las siguientes ecuaciones para el cálculo de la resiliencia en los tiempos mencionados:

$$R(t_1) = 0.35(Rb_1) + 0.35(Rd_1) + 0.20(Cg_1) + 0.10(Re_1)$$

Ecuación 3. Ecuación de la resiliencia para el instante antes del evento disruptivo (t_1)

$$R(t_2) = 0.15(Rb_2) + 0.20(Rd_2) + 0.30(Cg_2) + 0.35(Re_2)$$

Ecuación 4. Ecuación de la resiliencia para el instante después del evento disruptivo (t_2)

De las anteriores ecuaciones se tiene que:

$R(t_i) \rightarrow Valor\ de\ la\ resiliencia\ en\ el\ momento\ i$
$(Rb_i) \rightarrow Valor\ del\ parámetro\ de\ la\ robustez\ en\ le\ momento\ i$
$(Rd_i) \rightarrow Valor\ del\ parámetro\ de\ la\ redundancia\ en\ el\ momento\ i$
$(Cg_i) \rightarrow Valor\ del\ parámetro\ de\ la\ capacidad\ de\ gestión\ en\ momento\ i$
$(Re_i) \rightarrow Valor\ del\ parámetro\ de\ la\ recuperación\ en\ el\ momento\ i$

Los coeficientes de las ponderaciones obedecen al tiempo en que se están evaluando. Previo al evento disruptivo, es decir, en el tiempo 1 los parámetros que más relevancia tienen son los de robustez y redundancia, debido a que permiten evidenciar si la estructura se encuentra en un estado óptimo. La previsión de fallas estructurales o ausencia de elementos de soporte deben ser detectadas en la fase inicial, ya que en el caso de que la estructura falle después del evento, la robustez y la redundancia no tienen un aporte significativo.

En ese mismo sentido, en el tiempo 2, después de ocurrido el evento disruptivo; la capacidad de gestión y la recuperación del sistema representan la respuesta para la mitigación de los efectos del evento y la posible reconstrucción del sistema o de algún elemento del mismo.

Los coeficientes mencionados en la Ecuación 1 y en la Ecuación 2, son propuestos a partir de conceptos de ingeniería relacionados con los sistemas de excavación, ya que la asignación de estos valores no cuenta con una referencia totalmente explícita pues ha sido poco estudiado en esta rama.

El análisis de la resiliencia está directamente asociado a los riesgos que puede sufrir un sistema. Bajo el entendido que entre más vulnerable sea, mayor riesgo existe y peores pueden ser las consecuencias, impidiendo así su recuperación.

La evaluación detallada de cada uno de los parámetros asociados a la resiliencia facilita la previsión, planificación y paralelamente una mejor respuesta ante cualquier evento inesperado. Razón por la cual, este trabajo pretende abarcar la mayor cantidad de criterios que puedan ser evaluados y cuantificados, con el objeto de que pueda ser aplicable a cualquier excavación para sótano y surta los efectos esperados.

La evaluación y cuantificación de los criterios que afectan cada parámetro del índice de resiliencia, se realizará creando posibles escenarios y generándole un aporte numérico siguiendo la simulación estadística de Montecarlo (método utilizado para resolver problemas matemáticos a través de la generación de variables aleatorias), teniendo un mínimo aporte de 0% en los casos más desfavorables y un máximo de 100% cuando se cumplen a cabalidad las condiciones analizadas. Esta metodología se utilizó siguiendo la investigación "Gestión probabilística de riesgos de infraestructura guiada por la resiliencia" (Salem et. Al, 2020)

5.3. CRITERIO DE ROBUSTEZ

Este criterio está relacionado directamente a la reacción de una estructura frente a un evento disruptivo, si el sistema constructivo soporta satisfactoriamente los requerimientos de resistencia y evita que el daño se propague se concluye que cuenta con este parámetro.

Para la evaluación de la robustez se estiman ciertos criterios, entre los que se contemplan simulaciones numéricas, visitas en sitio y datos secundarios que aportan información vital sobre la estructura y su entorno. En ese sentido, los parámetros a evaluar son de carácter cuantitativo y cualitativo, contando con un valor en porcentaje conforme a su importancia en virtud de definir la robustez de una estructura.

Teniendo en cuenta las condiciones de un sistema de excavación, se evaluarán los siguientes aspectos:

- Desplazamientos verticales de fondo en el terreno excavado
- Desplazamientos verticales de la superficie
- Desplazamientos horizontales de las pantallas
- Estado del entorno (Edificaciones y vías)
- Estado de las obras de contención para protección de colindancias
- Cumplimiento al proceso constructivo programado
- Control de nivel freático en la excavación

5.3.1. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE FONDO EN EL TERRENO EXCAVADO

En la monografía "Estimación De Desplazamientos En Excavaciones Profundas Empleadas En Infraestructura Vial Urbana En Bogotá D.C. Y Su Relación Con Los Métodos Constructivos" (Gómez Martín, 2020) se presenta la ocurrencia de posibles desplazamientos en el fondo y superficie del terreno durante la ejecución de excavaciones profundas como un problema potencial en los suelos de Bogotá, debido a que los materiales de la sabana cuentan con baja resistencia al corte que además produce una alta compresibilidad en los suelos. Es por ello que el hundimiento (fallas) en la integridad del suelo y en las estructuras de la superficie son un problema que se debe considerar para evitar daños en las estructuras y pérdida de vidas humanas.

De esta forma se evidencia la importancia de realizar un análisis de los desplazamientos verticales de fondo en el terreno excavado, siguiendo cada una de las etapas planteadas para un proyecto de excavación profunda, esto con el fin de predecir fallas de fondo y de esta manera analizar cuantitativamente un aspecto que incide en la rigidez de las excavaciones profundas.

Las fallas de fondo, de acuerdo con la monografía titulada "Metodología de evaluación y mitigación de riesgos en excavaciones profundas en los suelos arenosos de Bogotá" (Rodriguez Castilla, 2017), se dividen en tres tipos. Por sub-presión, por expansión y por carga en el fondo de la excavación.

Los desplazamientos verticales de fondo en el terreno excavado se pueden analizar cuantitativamente revisando el comportamiento del terreno después de cada una de las etapas de excavación y definiendo la severidad de los asentamientos, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Severidades desplazamientos de fondo en el terreno excavado

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Severidad Baja	Menor de 20 mm
Severidad Media	Entre 20 mm y 40 mm
Severidad Alta	Mayor de 40 mm

En ocasiones definir los asentamientos en un terreno que ha sido excavado no resulta tan sencillo de identificar. Es por esta razón que cuando no se cuenta con medidas cuantitativas, se puede inferir la posibilidad de una falla de fondo de maneras más subjetivas, pero igualmente confiables.

Las fallas de fondo debidas a la expansión del terreno, generalmente se identifican a partir del levantamiento que puede presentar el suelo, cuando la excavación profunda se ejecuta para sótanos trae consigo la sub-presión completa de las presiones verticales que inicialmente actuaban en el suelo, por esta razón, el suelo se levanta, una vez inicia la construcción del edificio (Rodriguez Castilla, 2017), es decir, que la presencia de una posible falla de fondo por expansión se puede evidenciar en las primeras etapas de la actividad por medio de la evaluación del levantamiento del suelo.

Las fallas de fondo como consecuencia de la sub-presión o presión hidrostática pueden ser evitadas mediante el control del nivel freático en la excavación. La presencia de esta condición en un terreno de excavación genera aumento de presiones sobre la placa de fondo y ocasiona su colapso. Por ello, una forma de evaluar la posibilidad de que la excavación presente falla de fondo por presión hidrostática es evaluar el nivel freático.

Por último, una falla de fondo por corte se evidencia mediante un levantamiento brusco del fondo de la excavación, lo que puede ocasionar a la par un hundimiento de la zona opuesta a la levantada. Al ser una condición de fácil verificación visual puede definirse si existe falla de fondo o no.

Para evaluar la posibilidad de que se presente falla de fondo, se verifica en campo la presencia de las condiciones anteriormente relacionadas (Rodriguez Castilla, 2017). Es así que las ponderaciones para evaluar la existencia de este parámetro se describen en la Tabla 2:

Tabla 2. Determinación desplazamientos verticales de fondo (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Se presenta un adecuado manejo del nivel freático de la excavación, no se evidencian alteraciones de la placa o asentamientos	1.00
Existe presencia de aguas y asentamientos leves de acuerdo con la tabla de severidades	0.50
Se evidencian hundimientos importantes y mal manejo de nivel freático.	0.00

5.3.2. DESPLAZAMIENTOS VERTICALES EN SUPERFICIE

El suelo bogotano se caracteriza por poseer depósitos lacustres jóvenes, ligeramente sobre consolidados en superficie, de resistencias bajas y niveles freáticos altos en su mayoría, razón por la cual existe una alta probabilidad de presentar fallas superficiales posterior a la ejecución de un trabajo de excavación.

Estas deformaciones pueden llevar a las estructuras al colapso, además de afectar al entorno de la excavación cuando se presentan asentamientos no admisibles. Los desplazamientos verticales son fallas que ocurren con frecuencia en la ciudad de Bogotá (Gómez Martín, 2020), donde también se establece el caso de estudio del presente trabajo.

No obstante, de acuerdo con el título H de la Norma Sismorresistente Colombiana NSR-10, se establece que los asentamientos superficiales asociados a estas excavaciones dependen del grado de cedencia lateral que se permita en los elementos de soporte y estas depreciaciones deben ser modeladas teniendo en cuenta el proceso constructivo con el objeto de definir las medidas de seguridad a implementar.

Estos desplazamientos verticales deben ser evaluados pues significan una irrupción en la estabilidad de la obra. Por lo anterior se definen los rangos de desplazamiento vertical, asignándoles una valoración de acuerdo con los rangos admisibles según norma.

Los desplazamientos verticales de superficie se evalúan en el entorno cercano del terreno excavado y se pueden analizar cuantitativamente revisando el comportamiento del terreno después de cada una de las etapas de excavación y definiendo la severidad de los asentamientos, como se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Severidades desplazamientos superficiales en el entorno al terreno excavado

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Severidad Baja	Menor de 20 mm
Severidad Media	Entre 20 mm y 40 mm
Severidad Alta	Mayor de 40 mm

Una vez se define la severidad del daño, identificando los asentamientos evidenciados en mm, se procede a evaluar las deformaciones tolerables. Para cual se realiza una adaptación de la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Donde se apropia la Tabla 4, que relaciona la deformación obtenida, la cual ya fue evidenciada en campo y el umbral de tolerancia para este parámetro.

Tabla 4. Deformaciones tolerables (SGC)

RELACIÓN DEFORMACIÓN/ UMBRAL TOLERABLE	$I_{i\text{-}def}$
<0,2	0,1
0,2-0,4	0,2
0,4-0,6	0,4
0,6-0,8	0,6
0,8-1,0	0,8
1,0-1,2	0,9
≥1,2	1,0

Es así que se adaptan los asentamientos medidos con las deformaciones y umbrales de tolerancia definidos por en la "Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa" (Servicio Geológico Colombiano, 2016) presentados en la Tabla 4, se obtendrán índices de deflexiones en el terreno, los cuales se valorarán de acuerdo con la Tabla 5:

Tabla 5. Determinación desplazamientos verticales superficiales (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es menor o igual a 0.20	1

La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor que 0.20 y menor o igual a 0.40	0.80
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor que 0.40 y menor o igual a 0.60	0.60
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor que 0.60 y menor o igual a 0.80	0.40
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor que 0.80 y menor o igual a 1.00	0.20
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor que 1.00 y menor o igual a 1.20	0.10
La relación $\left(\frac{Deformación}{Umbral\ tolerable}\right)$ es mayor a 1.20	0.00

5.3.3. DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DE LAS PANTALLAS

La estructura objeto de estudio cuenta con pantallas en concreto reforzado que hacen las veces de muro de contención con el fin de facilitar las labores de excavación en todas sus etapas y reducir la cedencia de los suelos.

Un adecuado proceso de excavación reduce los riesgos de desplazamientos de las pantallas lo que a su vez puede generar pérdida de verticalidad en los demás elementos, la presencia de una falla de fondo, afectaciones en el espacio público (vías y andenes) y en las edificaciones aledañas.

El desplazamiento horizontal de las pantallas, si bien es una afectación a la excavación, de acuerdo con el título H de la NSR "*Los valores esperados de los movimientos verticales y horizontales en el área de excavación y sus alrededores deberán ser suficientemente pequeños para que no causen daños a las construcciones e instalaciones adyacentes ni a los servicios públicos*". Es decir, que si bien, se espera que ocurran movimientos, estos no deben exceder el máximo tolerable según la NSR-10, Titulo H.

En ese mismo sentido, se considera como estado límite del servicio del muro pantalla, aquella condición en la que la deformación repercute en el funcionamiento de las estructuras vecinas o genera afectaciones en otras estructuras.

En ese sentido, a partir de la definición de estado límite de una estructura de contención, se realizará la evaluación de las condiciones en campo de las pantallas construidas, conforme a lo estipulado en la Tabla 6:

Tabla 6. Desplazamientos horizontales en las pantallas (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
No hay afectaciones a las estructuras aledañas, no se evidencian movimientos horizontales visualmente identificables. El muro pantalla contiene las laderas de la excavación	1.00
No hay afectaciones a las estructuras aledañas, pero se evidencian movimientos horizontales visualmente identificables. El muro pantalla no contiene las laderas de la excavación	0.30
Hay afectaciones a las estructuras aledañas, se evidencian movimientos horizontales visualmente identificables. El muro pantalla no contiene las laderas de la excavación	0.00

5.3.4. ESTADO DEL ENTORNO (EDIFICACIONES Y VÍAS)

Como ya se mencionó el movimiento de tierras puede ocasionar una cedencia en los suelos que a su vez implica daños a la infraestructura cercana a la excavación. Por esta razón se debe evaluar, previo a la ejecución de la actividad, el estado de las edificaciones aledañas que puedan resultar afectadas, así como de andenes y vías.

El registro del estado de las edificaciones se condensa en actas de vecindad que deben ser realizadas previo al inicio de las labores. Por su parte, para identificar las afectaciones al espacio público se realizará por medio de la evaluación de asentamientos que fue resuelta en el ítem 4.3.2. Desplazamientos verticales en superficie.

De acuerdo con la proporción de similitudes encontradas, se asignan unas ponderaciones que van en función del grado de correspondencia que exista entre lo registrado en acta y lo encontrado en campo luego de ocurrido el evento, tal y como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Estado del entorno (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Las afectaciones son similares con respecto a las registradas en las actas de vecindad	1.00
Las afectaciones son mayores a las registradas en las actas de vecindad. Sin embargo, no son considerables	0.50
Las afectaciones son mayores a las registradas en las actas de vecindad. Presentando afectaciones estructurales	0.00

5.3.5. ESTADO DE LAS OBRAS DE CONTENCIÓN PARA PROTECCIÓN DE COLINDANCIAS

Para evitar daños a las estructuras aledañas, debido a la diferencia de niveles generados por la excavación, se debe contar con un sistema de protección adecuado al tipo de suelo con el que se cuenta y con el tipo de edificaciones que se ven afectadas (Moscozo Barrios, 2011).

El Sistema de protección debe ser propuesto por un experto, que debe considerar las características del proyecto y del suelo excavado. Las condiciones de dichas obras de contención pueden informar acerca de la estabilidad del suelo aledaño a la excavación, por lo que se analizarán las condiciones de las obras de contención, conforme a la Tabla 8.

Tabla 8. Obras de contención para protección de colindancias (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Las condiciones de las obras de contención para la protección de colindantes se han concebido de acuerdo a los diseños y programación constructiva del proyecto. Además, se encuentran en óptimas condiciones.	1
Las condiciones de las obras de contención para la protección de colindantes se han concebido de acuerdo a los diseños y programación constructiva del proyecto. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones imprevistas del terreno han presentado pequeñas grietas que no afectan su funcionalidad.	0.50
Las condiciones de las obras de contención para la protección de colindantes se han concebido de acuerdo a los diseños y programación constructiva del proyecto. Sin embargo, de acuerdo a las condiciones imprevistas del terreno han presentado grietas considerables que afectan su funcionalidad.	0.00

5.3.6. CUMPLIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO PROGRAMADO

Todo proyecto debe contar con un proceso constructivo definido para la concepción segura de la excavación, este proceso, analizado por un profesional especializado, deberá ajustarse a las condiciones de la excavación según la naturaleza y el terreno afectado.

En la guía de trabajo seguro en excavaciones (Ministerio del Trabajo, 2014) se especifica que en el proceso constructivo de una excavación se debe tener en cuenta aspectos como el tránsito de personas, vehículos y equipos, el tipo de suelo, los niveles de aguas subterráneas, las redes de servicios públicos de la zona, entre otros aspectos.

Otros autores como (Moscozo Barrios, 2011) también presentan la importancia de seguir una metodología definida con procesos detallados para la concepción de un proyecto de excavación, la importancia se incrementa también conforme la magnitud de la excavación se mayor y además se deben tomar en cuenta todos los factores, internos y externos, que hacen parte del proyecto. El cumplimiento de este proceso se evalúa a partir de las condiciones expuestas en la Tabla 9.

Tabla 9. Cumplimiento al proceso constructivo programado (parámetro robustez)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Durante las etapas de construcción se ha llevado estricto cumplimiento al proceso constructivo propuesto por el personal geotécnico experto, y no se han presentado imprevistos en las etapas de construcción.	1
Durante las etapas de construcción se han modificado ítems del proceso constructivo propuesto por el personal geotécnico experto, sin embargo, dichos cambios se han estudiado y aprobado por los profesionales competentes del proyecto.	0.50
Durante las etapas de construcción se ha variado indiscriminadamente las etapas constructivas propuestas por el personal experto, sin realizar los estudios y socializaciones correspondientes con los profesionales competentes del proyecto.	0.00

5.3.7. CONTROL DE NIVEL FREÁTICO EN LA EXCAVACIÓN

Cuando se realiza una excavación, la presencia de agua subterránea genera problemas, no solo dificulta el desarrollo de los trabajos, sino que también debilita los taludes o el fondo, comprometiendo su estabilidad (Yepes Piqueras, 2020). Por esta razón el control del nivel de agua en la excavación es de vital importancia para la estabilidad de la misma, dicho control se hace con diferentes métodos que van desde impedir la entrada de agua a la excavación hasta la modificación de las propiedades del terreno (inyecciones en el terreno, congelación).

Tabla 10. Control de nivel freático en la excavación

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Durante las etapas de construcción no se han presentado problemas de irrupción de aguas subterráneas en la excavación.	1

Durante las etapas de construcción se han presentado, en mínima escala, problemas de irrupción de aguas subterráneas en la excavación. Estas aguas han sido retiradas de manera óptima del sitio de excavación.	0.70
Durante las etapas de construcción se han presentado, de forma masiva, problemas de irrupción de aguas subterráneas en la excavación. Sin embargo, las aguas han sido retiradas de manera óptima del sitio de excavación.	0.40
Durante las etapas de construcción se han presentado, de forma masiva, problemas de irrupción de aguas subterráneas en la excavación. Y se ha tenido dificultad en el bombeo de dichas aguas fuera del sitio de excavación.	0.00

5.3.8. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA ROBUSTEZ

Para definir la robustez, se tomaron en cuenta los parámetros más relevantes tanto de la excavación como del entorno y a cada uno se le asignó un valor según su importancia a la hora de evaluar el criterio.

La suma de las ponderaciones de los siete criterios de robustez es igual a uno, por lo que cada uno tiene una asignación en tanto por uno distinta. Una vez se determinan todos los parámetros con su respectiva ponderación, se multiplica por el valor asignado y posteriormente estos valores se suman.

La Tabla 11 relaciona las ponderaciones obtenidas para el parámetro permitiendo un análisis completo del estudio de caso y una fácil visualización de las fallas que se generaron:

Tabla 11. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de robustez

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN	
	Inicial	Final
Desplazamientos verticales de fondo en el terreno excavado	0.10	0.175
Desplazamientos verticales de la superficie	0.10	0.175
Desplazamientos horizontales de las pantallas	0.10	0.175
Estado del entorno (edificaciones y vías)	0.20	0.10

Estado de las obras de contención para protección de paramentos y elementos adyacentes a la excavación	0.20	0.10
Cumplimiento al proceso constructivo programado	0.20	0.10
Control de nivel freático en la excavación	0.10	0.175

Se definen las ecuaciones para dos instantes, antes y después de la ocurrencia de un evento disruptivo para determinar la robustez de la estructura:

$$Rob\ (t_1) = 0.10(R_1) + 0.10(R_2) + 0.10(R_3) + 0.20(R_4) + 0.20(R_5) + 0.20(R_6) + 0.10(R_7)$$

Ecuación 5. Robustez en el instante 1

$$Rob\ (t_2) = 0.175(R_1) + 0.175(R_2) + 0.175(R_3) + 0.10(R_4) + 0.10(R_5) + 0.10(R_6) + 0.175(R_7)$$

Ecuación 6. Robustez en el instante 2

De acuerdo, con la teoría de la estabilidad de una excavación se tiene que el cumplimiento al proceso constructivo es fundamental por lo cual se le ha asignado una valoración del 20%, de igual manera el estado de las obras de contención y del entorno permiten identificar las condiciones de estabilidad de la estructura. En segundo plano, teniendo un análisis métrico a través de la modelación de las condiciones de la excavación se tiene dentro del aporte de la robustez los desplazamientos verticales y horizontales del subsuelo, que cuando superan los estados límites de la excavación pueden generar una falla en el sistema. Finalmente, se otorga un aporte del 10% a las condiciones de nivel freático ya que el nivel de aguas de la excavación puede afectar la estabilidad de la misma y generar repercusiones en los avances de obra de la excavación analizada.

La robustez en el instante 2, es decir, después del evento disruptivo las obras de contención o el estado de las vías pueden fallar, por lo que su aporte al concepto de robustez disminuye. Sin embargo, los desplazamientos en el fondo de la excavación y en la superficie de la misma pueden aumentar e identificarse con su valor real, por ello se aumenta su aporte en la Ecuación 6. Robustez en el instante 2.

5.4. CRITERIO DE REDUNDANCIA

Se denomina redundancia a la capacidad de un sistema de continuar trabajando a pesar del deterioro de sus elementos, teniendo en cuenta la posibilidad de que estos sean sustituibles.

Este criterio implica una reducción en las posibilidades de colapso total de la estructura debido a que el fallo de alguno de sus elementos, no implica necesariamente la falla del sistema.

De forma similar a la evaluación de la robustez; la redundancia contempla el análisis de ciertos factores cualitativos y cuantitativos que poseen una importancia dentro de la evaluación del criterio y que deben ser definidos. De esta manera los criterios evaluados poseen una valoración que corresponde a la importancia que tiene el parámetro dentro del análisis de redundancia.

Para la redundancia de un sistema de excavación se revisan los aspectos de:

- Factor de seguridad por falla de fondo y/o estabilidad geotécnica
- Probabilidad de falla de fondo en la excavación
- Vías alternas
- Redes de servicios

5.4.1. FACTOR DE SEGURIDAD POR FALLA DE FONDO Y/O ESTABILIDAD GEOTÉCNICA

Factor de seguridad se define como la relación entre la resistencia cortante promedio del suelo y el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie de falla supuesta (Guitierrez Tovar, 2016), de esta manera se obtiene un valor numérico que determina la posibilidad de falla, para este caso falla de fondo, de un sistema.

Un factor de seguridad se convierte en crítico cuando tiene un valor igual a 1, es decir las fuerzas actuantes son iguales a las resistentes, la probabilidad de falla de la estructura es elevada cuando el valor del factor de seguridad es menor a 1, en el caso de que el factor de seguridad se mayor a 1, entre mayor sea dicho valor, mayor es la estabilidad de la estructura.

Con lo anterior, se definen ponderaciones del factor de seguridad por falla de fondo y/o estabilidad geotécnica, del sistema de excavación conforme a la Tabla 12:

Tabla 12. Valoración de factor de seguridad en la excavación (parámetro de redundancia)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Factor de seguridad mayor o igual a 2.00	1.00
Factor de seguridad menor a 2.00 y mayor o igual a 1.50	0.70
Factor de seguridad menor a 1.50 y mayor a 1.00	0.50
Factor de seguridad igual a 1.00	0.20
Factor de seguridad menor a 1.00	0.00

5.4.2. PROBABILIDAD DE FALLA DE FONDO

Es indispensable el análisis de estabilidad del fondo de la excavación, con el fin de determinar la probabilidad de falla de fondo en la misma. La falla de fondo ocurre cuando se presenta un asentamiento en el terreno vecino y un levantamiento en el fondo de la excavación.

La probabilidad de falla de fondo puede ser determinada mediante el análisis de equilibrio límite de manera determinística o probabilística, empleando softwares de modelación de terrenos, teniendo en cuenta características del sistema como peso unitario, cohesión no drenada y ángulo de resistencia no drenado. Según (Rodriguez Castilla, 2017) en caso de presentarse agua freática es vital su control y extracción con el objetivo de la disminución del riesgo de falla de fondo por sub presión.

En el artículo Aproximación a la estimación de la amenaza geotécnica originada por excavaciones profundas en arcillas de Bogotá: Una contribución a la sustentabilidad en entornos urbanos (Pineda Jaimes et al., 2020) se analizan excavaciones profundas en la ciudad de Bogotá y se modelan factores de seguridad y probabilidades de falla de fondo para diferentes excavaciones presentes en la ciudad. De esta manera se adaptan los resultados del mencionado artículo para el análisis de probabilidad de falla de fondo en excavaciones, en ese sentido se otorgan unas valoraciones, condensadas en la Tabla 13:

Tabla 13. Valoración de probabilidad de falla de fondo en la excavación (parámetro de redundancia)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
La probabilidad de falla de fondo es mayor a 0 % y menor a 10 %	1.00
La probabilidad de falla de fondo es mayor o igual a 10 % y menor a 50 %	0.70
La probabilidad de falla de fondo es mayor o igual a 50 % y menor a 80 %	0.40
La probabilidad de falla de fondo es mayor o igual a 80 % y menor a 10 %	0.20
La probabilidad de falla de fondo es 100%	0.00

5.4.3. VÍAS ALTERNAS

Por las intervenciones en el terreno, las vías aledañas al mismo pueden verse afectadas o cerradas temporalmente, por ello requieren de vías alternas para permitir la circulación de la población cercana al proyecto de excavación.

De esta manera las vías cercanas a la zona de estudio serán analizadas, teniendo en cuenta las características principales que definen una vía (tráfico, carriles y circulación) y la posibilidad que tienen de suplir los requerimientos teniendo en cuenta que son consideradas vías de desvío, conforma a la Tabla 14.

Tabla 14. Valoración de vías alternas en el entorno de la excavación (parámetro de redundancia)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Las vías alternas permiten suplir el flujo vehicular con los mismos resultados de la vía cerrada.	1.00
Las vías alternas permiten suplir el flujo vehicular sin mayor problema, cubriendo aproximadamente una demanda del 70%	0.70
Existen vías alternas que permiten controlar parte del flujo vehicular, pero tiene tendencia a presentarse embotellamientos debido a que solo se cubre el 50% – 70% de la solicitud vehicular.	0.50
Existen vías alternas que permiten controlar parte del flujo vehicular, pero tiene tendencia a presentarse embotellamientos debido a que solo se cubre el 30 – 50% de la demanda.	0.30
Vías alternas insuficientes para suplir el flujo de tránsito, con un porcentaje menor al 30% de la solicitud. No es útil la vía de desvío.	0.00

5.4.4. REDES DE SERVICIOS

Típicamente las estructuras cuentan con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado, electricidad, telecomunicaciones y suministro de gas natural. La irrupción por causas externas, en este caso como consecuencia de un mal procedimiento o desconocimiento de la presencia de estas redes subterráneas en zonas aledañas a la excavación debe ser considerada, y evaluarse la manera de suplir estas solicitudes para los usuarios que pudiesen verse afectados.

En ese sentido se definirá de forma preliminar la prevalencia de cada uno de estos servicios, identificando cual debe tener prioridad de atención de presentarse un evento abrupto, ligado a la posibilidad de reposición en términos de tiempo de los servicios mencionados:

- Se contempla que, en el evento de presentarse un daño, irrupción o corte el servicio de gas debe ser el que se atienda inicialmente debido a su capacidad de combustión, y afectación toxicológica.

- El servicio de electricidad tiene una prevalencia de segundo orden debido a la posibilidad de presencia de cortos y exposición de personas a la electricidad que puede terminar en resultados fatales.

- En tercera instancia, las fallas de acueducto deben ser atendidas debido a que el agua es un servicio vitalicio y su suspensión no puede ser tardía.

- El servicio de acueducto ocuparía la cuarta posición por la exposición a olores ofensivos y contaminación del entorno debido a su colapso.

- En última medida el servicio de telecomunicaciones ocupa el quinto lugar pues su falla si bien implica una desconexión, no compromete la integridad de los afectados.

Una vez catalogadas la importancia de cada servicio público usado comúnmente en la ciudad, se establecerá la ponderación del parámetro de redes de servicio respecto a la relevancia del tipo de red encontrada en la zona de afectación de la excavación, la cual se condensa en la Tabla *15*, ya que es esta característica lo que permitirá un posible reemplazo o redireccionamiento en las conexiones de las redes de servicios públicos de la zona circundante a la excavación analizada:

- Una red de tercera o de menor categoría puede ser reconectada a otra fuente de abastecimiento cercana, además de que su afectación a la población es mínima, de esta manera se establece una ponderación de 1.00 en el parámetro de redundancia de redes de servicio.

- Una red secundaría tiene una población de afectación mayor, por lo que su intervención (relacionada a las actividades de excavación, analizados en el presente trabajo) pueda requerir un mayor análisis.

- Una red principal es vital para el suministro de servicios públicos en la ciudad, por lo que su intervención debe evitarse al máximo, es más complicado re establecer un flujo de servicio normal si se afecta una red principal de servicio, por ello su valoración es la menor en el parámetro de redundancia en los servicios públicos de la excavación.

Tabla 15. Valoración de redes de servicio en la excavación (parámetro de redundancia)

DESCRIPCION	PRIORIDAD
No existen redes principales o secundarias que pasan por la zona afectada y puedan alimentar los predios.	1.00
Existen varias redes secundarias que pasan por la zona afectada y facilitan la alimentación de los predios	0.75
Existe una red principal que pasa por la zona afectada y alimenta varias redes secundarias.	0.00

5.4.5. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA

Como primera aproximación al criterio de redundancia en excavaciones profundas, se proponen ecuaciones que relacionan de manera lineal los aspectos que determinan la redundancia en el sistema.

Para la evaluación de la redundancia, en el primer instante del análisis de índice de resiliencia, se plantean los aspectos de factor de seguridad y probabilidad de falla de fondo como los parámetros más relevantes en la redundancia del sistema, pues aportan a la rigidez del sistema antes de un evento disruptivo, seguido del análisis de vías alternas y redes de servicio.

Para el segundo instante, después de un evento disruptivo toman más relevancia las vías alternas y las redes de servicio afectadas, pues evitan que la zona sea afectada en su totalidad permitiéndole continuar funcionando mientras se recupera.

En la Tabla 16 se muestran las valoraciones propuestas para los criterios que afectan el análisis de redundancia en los dos instantes analizados, respecto al evento disruptivo.

Tabla 16. Parámetros para el análisis de redundancia de un sistema de excavación

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN	
	Inicial	Final
Factor de seguridad de la excavación	0.30	0.30
Probabilidad de falla de fondo en la excavación	0.30	0.20
Análisis de vías alternas	0.20	0.30
Redes de servicios	0.20	0.20

Con lo anterior se definen las siguientes ecuaciones (determinadas para los dos instantes en que se analiza la redundancia de la estructura):

$$\text{Red}\,(t_1) = 0.30(R_1) + 0.30(R_2) + 0.20(R_3) + 0.20(R_4)$$

Ecuación 7. Redundancia en el instante 1

$$\text{Red}\,(t_2) = 0.30(R_1) + 0.20(R_2) + 0.30(R_3) + 0.20(R_4)$$

Ecuación 8. Redundancia en el instante 2

5.5. CRITERIO DE CAPACIDAD DE GESTIÓN

La capacidad de gestión es la condición que representa la facilidad de respuesta de la estructura ante un evento disruptivo, comprende la capacidad de prepararse, responder y manejar un evento irregular de forma rápida y eficiente.

Dentro de este criterio se contempla el mantenimiento de la estructura y la gestión alrededor de la misma, además de las personas y organizaciones involucradas en mitigar la situación adversa. Por lo cual, los siguientes parámetros permiten evaluar si la estructura cuanta con capacidad de gestión o carece de ella.

- Políticas de riesgo en la zona circundante de la edificación
- Clasificación de las unidades de construcción
- Velocidad de respuesta de entidades competentes

5.5.1. POLÍTICAS DE RIESGO EN LA ZONA CIRCUNDANTE DE LA EDIFICACIÓN

La existencia de políticas de gestión de riesgo zonales, establecidas por los entes gubernamentales, permiten la contención y accionar ante un evento disruptivo que no solo afecte la edificación analizada, sino que también genere fallas en la zona aledaña a la edificación caso del presente trabajo. Es por ello que la revisión de políticas de gestión de riesgo en la zona se hace importante para el análisis de la capacidad de gestión del proyecto. La existencia de estas políticas se evalúa en la Tabla 17, como un criterio a considerar en el análisis de la capacidad de gestión del proyecto.

Tabla 17. Valoración de la existencia de políticas de gestión de riesgo (parámetro de capacidad de gestión)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Existen políticas de gestión del riesgo que comprendan la atención de diferentes eventos disruptivos y además posee procedimientos específicos para la atención de emergencias relacionadas con dichos eventos disruptivos	1.00
Existen políticas de gestión del riesgo que comprendan la atención de eventos disruptivos, pero no posee procedimientos específicos para la atención de emergencias asociadas a dichos eventos disruptivos	0.60
Las políticas de gestión del riesgo son deficientes y no contemplan procedimientos específicos para la atención de emergencias	0.30
No existen políticas de gestión asociadas a la atención de emergencias en la edificación	0.00

5.5.2. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN

En ese orden de ideas, la clasificación de la estructura juega un papel fundamental al generar un indicador relevante al momento de establecer un proceso reconstructivo. La NSR-10 clasifica las estructuras de acuerdo con el número de niveles y cargas máximas de servicio, tal y como se observa en la tabla H.3.1-1, correspondiente a la Figura 2 del presente proyecto.

Tabla H.3.1-1
Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4,000 kN
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

Figura 1. NSR-10 Titulo H - clasificación de las unidades de construcción por categorías

En ese sentido se presenta la Tabla 18, la cual condensa la valoración de índices. Se establece que para construcciones más complejas hay una valoración menor, debido a la dificultad que presentan en tiempo y recursos para ser reconstruidas.

Tabla 18. Valoración para la clasificación de las unidades de construcción (parámetro de capacidad de gestión)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Baja	0.40
Media	0.30
Alta	0.20
Especial	0.10

5.5.3. VELOCIDAD DE RESPUESTA DE ENTIDADES COMPETENTES

Una vez ocurrido un evento disruptivo, la velocidad de respuesta de las entidades es de vital importancia en la atención de emergencias y reconstrucción, al contar con mayor disponibilidad de recursos, tiempo y distancia de dichas entidades, el proyecto podrá garantizar una reconstrucción integral eficiente.

A continuación, en la Tabla 19, se muestra las ponderaciones propuestas según la capacidad de respuesta de las entidades de atención de emergencias en la zona de influencia de la excavación analizada.

Tabla 19. Valoración de la velocidad de respuesta entidades competentes (parámetro de capacidad de gestión)

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
Distancia de entidades de atención a emergencias menor a 1 km	1.00
Distancia de entidades de atención a emergencias menor a 10 km	0.50
Distancia de entidades de atención a emergencias menor a 100 km	0.00

5.5.4. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GESTIÓN

Partiendo de que la capacidad de gestión involucra los posibles planes de contingencia ante un evento adverso, debe contemplarse el tipo de estructura que lo requiere. En ese sentido se otorga una ponderación mayor a la existencia de planes de contingencia en la zona donde se ubica la estructura analizada para los dos instantes de tiempo, seguida de la velocidad de respuesta de los entes competentes y por último una ponderación menor a la clasificación de la estructura analizada, tal y como se muestra en la Tabla 20, para el instante uno.

De forma paralela en el instante dos, la velocidad de respuesta de las entidades competentes es vital, pues a mayor rapidez en la implementación de los planes de acción aumenta la posibilidad de que el sistema no genere pérdidas significativas.

Tabla 20. Parámetros para el análisis de la capacidad de gestión de un sistema de excavación

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN	
	Inicial	Final
Políticas de riesgo en la zona circundante de la edificación	0.50	0.50
Clasificación de las unidades de construcción	0.20	0.10
Velocidad de respuesta de entidades competentes	0.30	0.40

Con lo anterior se definen las siguientes ecuaciones que determinará la capacidad de gestión de una estructura, en los dos momentos analizados:

$$CGes\ (t_1) = 0.50(R_1) + 0.20(R_2) + 0.30(R_3)$$

Ecuación 9. Capacidad de gestión en el instante 1

$$CGes\ (t_1) = 0.50(R_1) + 0.10(R_2) + 0.40(R_3)$$

Ecuación 10. Capacidad de gestión en el instante 2

Los parámetros R1, R2 y R3 corresponden a políticas de riesgo en la zona circundante de la edificación, clasificación de las unidades de construcción y velocidad de respuesta de entidades competentes, respectivamente.

5.6. CRITERIO DE RECUPERACIÓN

Este criterio está enfocado en la capacidad que tiene la estructura de superar percances, soportado por la rapidez para atender dificultades constructivas, lo que facilita la recuperación del daño generado posterior a la ocurrencia del evento abrupto con celeridad y permitiendo que la estructura continúe con su función.

Según (Gómez y Benitez, 2021) en "Estimación Del Índice de Resiliencia Para Un Grupo De Estructuras Del Entorno Urbano Que Pueden Verse Afectadas Por El Uso De Tecnología Trenchless En Un Sector De La Primera Línea Del Metro De Bogotá D.C." en la recuperación actúan planes de contingencia, operaciones de emergencia, personal y recursos idóneos en los lugares correctos. Por ello se tiene en cuenta para el parámetro de la recuperación aspectos como:

- Actividades económicas en la zona de afectación de la excavación analizada.
- Impacto social de las actividades de excavación en la zona de influencia de la misma.

5.6.1. ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA EXCAVACIÓN

Un evento disruptivo en una excavación puede generar desplazamientos en la superficie aledaña a la obra, la corrección del terreno afectado requiere de insumos, materiales, herramientas, personal y demás relacionados para lograr una reconstrucción rápida de la zona. De acuerdo con lo anterior es preferible que dentro de la zona aledaña a la excavación existan actividades económicas que contribuyan a la recuperación del sector, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Valoración de actividades económicas en la zona de influencia de la excavación (parámetro de recuperación)

DESCRIPCION	VALORACIÓN
Se desarrollan actividades económicas que pueden proveer insumos, maquinaria, equipos, herramientas y demás elementos que puedan utilizarse para la recuperación de la zona de influencia de la excavación	1.00

Se desarrollan actividades económicas que pueden proveer insumos, maquinaria, equipos, herramientas y demás elementos que puedan utilizarse para la recuperación, si embargo se encuentran fuera de la zona de influencia de la excavación	0.50
No se desarrollan actividades económicas que pueden proveer insumos, maquinaria, equipos, herramientas y demás elementos que puedan utilizarse para la recuperación en la zona de influencia y en la cercanía de la zona	0.00

5.6.2. IMPACTO SOCIAL

Cuando ocurre un evento disruptivo es importante evaluar la afectación que puede tener sobre la zona de influencia de la obra, identificando el impacto social de la excavación en su entorno, esto mediante el análisis de la población cercana a la obra, conforme a los criterios establecidos en la Tabla 22.

Tabla 22. Valoración del impacto social (parámetro de recuperación)

DESCRIPCION	VALORACIÓN
Se desarrollan actividades fundamentales para el abastecimiento, fabricación, transporte y comercialización de mercancías, transporte de la población de alto impacto.	1.00
Se desarrollan actividades de abastecimiento, fabricación, transporte y comercialización de mercancías, transporte de la población de impacto medio.	0.50
Se desarrollan actividades de comunicación y transporte básico de población.	0.00

5.6.3. ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN

Como primera aproximación al criterio de recuperación en excavaciones profundas, se proponen ecuaciones que relacionan de manera lineal los aspectos que determinan la recuperación en el sistema.

Para la evaluación de la recuperación, en el primer instante del análisis de índice de resiliencia, se plantean los aspectos de impacto social como el parámetro más relevante en la capacidad de recuperación del sistema, puesto que dependiendo de la caracterización de la comunidad se pueda priorizar la recuperación de la estructura y evitar afectaciones prolongadas.

Para el instante dos se propone una valoración del 50% para cada parámetro, ya que asegurar la continuidad de las actividades sociales y económicas de la zona en que se ubica el sistema son factores importantes para influir en la recuperación del mismo.

En la Tabla 23 se observan las valoraciones propuestas para los parámetros que afectan la recuperación de un sistema de excavación de acuerdo al análisis realizado anteriormente.

Tabla 23. Parámetros para el análisis de la recuperación de un sistema de excavación

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN	
	Inicial	Final
Actividades económicas en la zona de influencia de la excavación	0.30	0.50
Impacto social	0.70	0.50

Con lo anterior se definen las siguientes ecuaciones (determinadas para los dos instantes en que se analiza la recuperación de la estructura):

$$\mathrm{Rec}\,(t_1) = 0.30(R_1) + 0.70(R_2)$$

Ecuación 11. Recuperación en el instante 1

$$\mathrm{Rec}\,(t_2) = 0.50(R_1) + 0.50(R_2)$$

Ecuación 12. Recuperación en el instante 2

Los parámetros R1 y R2 corresponden a los parámetros de las actividades económicas en la zona de influencia y al impacto social, respectivamente.

6. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA ANALIZADA

6.1. GENERALIDADES

En este capítulo se presentan la caracterización de la estructura caso analizada, en donde se espera abarcar la descripción general de la estructura, las características generales de la zona aledaña a la estructura, la descripción geológica del suelo, las condiciones geotécnicas del suelo y demás parámetros claves para referenciar la estructura caso del presente trabajo.

La caracterización de la estructura caso permitirá una introducción al análisis de los criterios propuestos en el capítulo anterior para la definición del índice de resiliencia en una excavación para sótanos.

6.2. LOCALIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

La excavación a analizar se ubica en un predio de la ciudad de Bogotá en la localidad de Chapinero, como se evidencia en la Ilustración 18 la mencionada excavación hace parte del proyecto de construcción de la nueva Torre administrativa del SENA de Bogotá D.C.

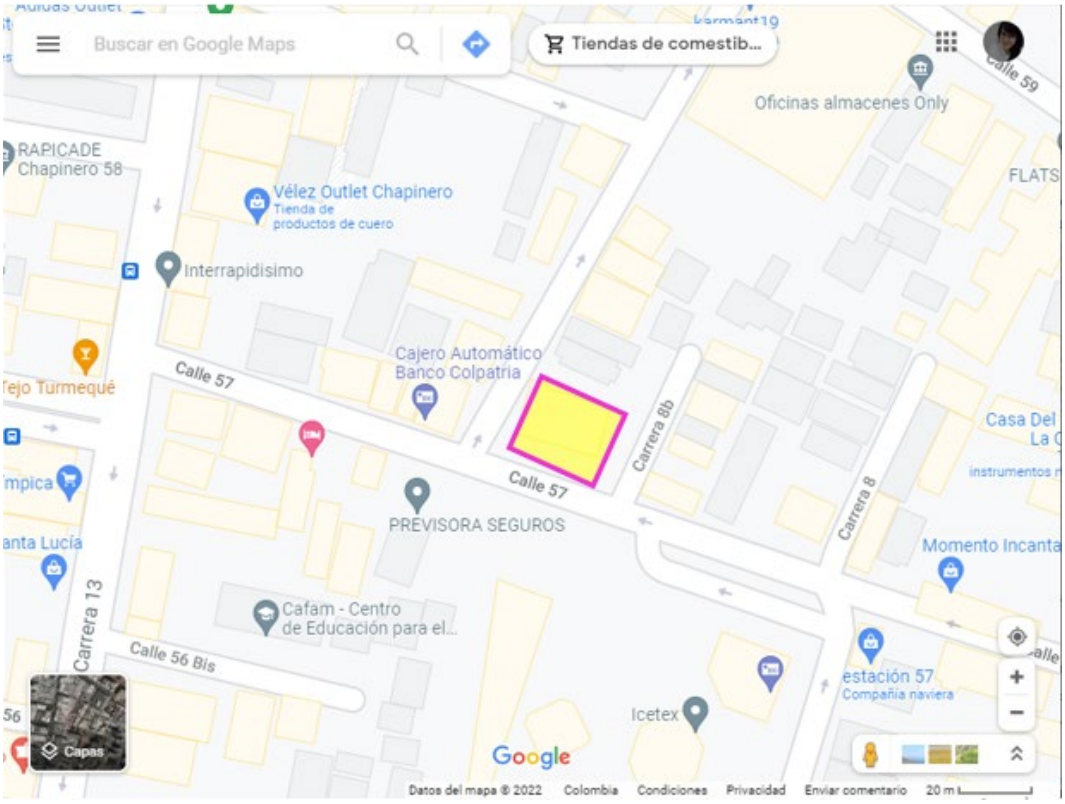


Ilustración 18. Ubicación de la excavación para sótanos objeto de determinar el índice de resiliencia
Fuente: Google Maps

El predio se ubica sobre la calle 57 entre carreras 8B y 9, donde predomina una topografía inclinada. El predio es de 1.310 m2 (mil trescientos diez metros cuadrados) aproximadamente. La sección del lote tiene 30 m de frente aproximadamente por 41 m de fondo. En la actualidad, a pesar de que se proyecta la construcción de una edificación, en el lote solo se encuentra la excavación a analizar. El lote, tiene linderos por el costado oriental con la carrera 8B, por el costado occidental con la carrera 9ª y por el Norte (fondo) con edificaciones de dos pisos y tres pisos y con el sur con la calle 57.

El proyecto a desarrollar en el predio es el de "Construcción Nueva Sede Administrativa Y De Servicios SENA Dirección General, Chapinero, Bogotá D.C., Departamento de Cundinamarca" que corresponde a una estructura tipo pórtico de hormigón armado, conformado por columnas, de luces entre columnas de 7.0m a 11.1m, y vigas resistentes a momentos y cortantes. El proyecto arquitectónico preconcebido es un edificio con tres niveles de sótanos para parqueadero, un primer piso orientado como lobby y auditorio, y un segundo y tercer pido para aulas de clase, cuarto a séptimo piso de oficinas y una cubierta en placa plana transitable, tal y como se observa en la Ilustración 19, la fachada norte del proyecto, evidencia los 7 pisos con los que cuenta, sin incluir los tres niveles de sótano.

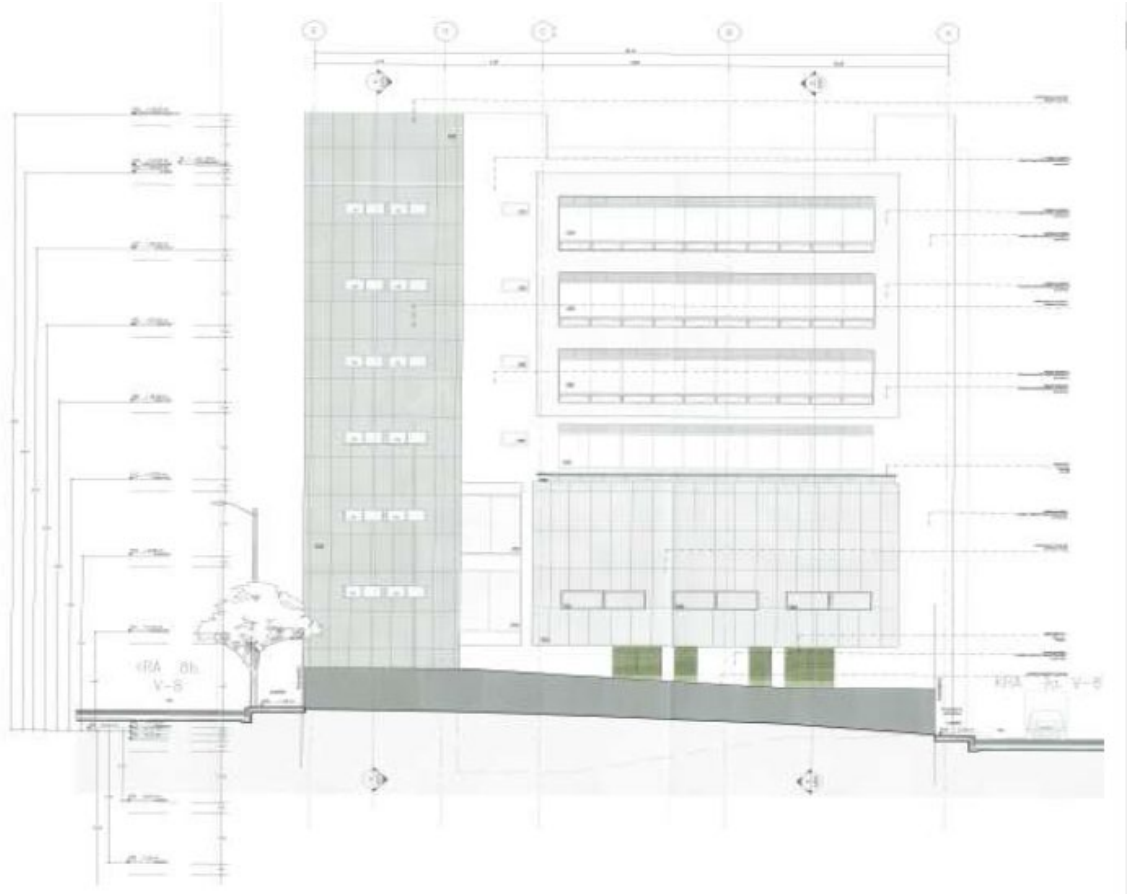


Ilustración 19. Fachada norte del proyecto construcción de la nueva torre administrativa del SENA
Fuente: Análisis Preliminar De La Estabilización De Una Excavación Profunda Mediante La Técnica De Congelamiento De Suelos (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

6.3. GEOLOGÍA Y MORFOLOGÍA

6.3.1. SABANA DE BOGOTÁ

La ciudad de Bogotá se localiza en el extremo suroriental de la región de la Sabana de Bogotá, la cual comprende además de la superficie plana de la sabana y los cerros que la bordean, como se visualiza en la Ilustración 20.

En Estructuración técnica del tramo 1 de la primera línea del metro de Bogotá. Estudio de impacto ambiental y social (EIAS) línea base – medio abiótico (Consorcio Metro Bog Systra - Ingetec, 2018) se presenta una caracterización actual de las condiciones de geología y morfología de la ciudad de Bogotá:

La Sabana de Bogotá con una altitud de unos 2.600 msnm, cuenta con una extensión de al menos 4.500 km2 y se localiza en la parte central de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos

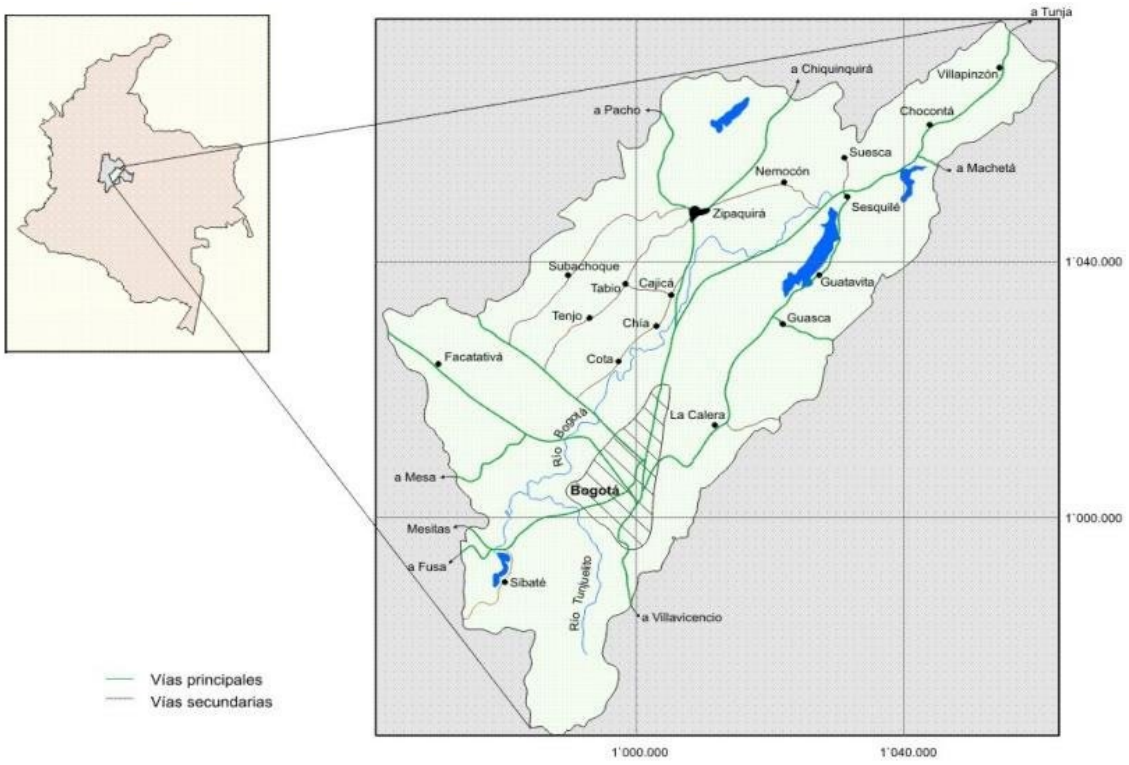


Ilustración 20. Ubicación de la sabana de Bogotá respecto a Colombia
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Localizacion-de-la-Sabana-de-Bogota-1_fig1_321208776

Desde el punto de vista geológico, la Sabana de Bogotá es una extensa cuenca intra montañosa formada de manera contemporánea con el ascenso de la Cordillera Oriental, desde inicios del Mioceno hasta finales del Plioceno.

La cuenca de la Sabana de Bogotá era inicialmente una gran laguna, que inició su colmatación y subsecuente desecación, hace aproximadamente 30.000 años. El proceso de colmatación comenzó con el depósito de secuencias predominantemente aluviales y prosiguió con secuencias lacustres. El depósito fluvio-lacustre cuaternario de la Sabana de Bogotá alcanza en la parte central un máximo del orden de los 400 m, apoyándose discordantemente sobre una secuencia de rocas sedimentarias con edades del Cretácico y el Terciario (Paleógeno y Neógeno). Las rocas del basamento afloran tanto en los cerros que la bordean, como en los que se encuentran a su interior.

La secuencia de rocas sedimentarias del basamento de la cuenca de la Sabana de Bogotá, como consecuencia de la tectónica compresiva que dio origen a la Cordillera Oriental, se encuentran plegadas y falladas. El tren estructural de dirección general NNE-SSW, está conformado predominantemente por anticlinales estrechos y sinclinales amplios, en general limitados por fallas de cabalgamiento definidas por la falta de registro estratigráfico. De igual manera se observan especialmente al sur de la Sabana de Bogotá, fallas transversales de desplazamiento lateral izquierdo, de dirección WNW-ESE, consideradas consecuencia de un estilo estructural heredado.

La intersección de estos dos sistemas de fallas aproximadamente perpendiculares, da lugar a la división del substrato terciario y cretácico en una serie de bloques con movimientos diferenciales entre ellos, originando una serie de “horst y graven” (Fosa tectónica y pilar tectónico), donde la zona de horst se corresponde con la zona de relieves altos y la zona de graven con la llanura de la Sabana de Bogotá.

Las rocas que afloran en la zona montañosa de los sectores de la ciudad ya citados, se encuentran plegadas conformando los anticlinales como los de Bogotá y Suba, al igual que sinclinales como los de Usme-Tunjuelo y Suba, afectadas por las fallas de El Cabo y Bogotá, de dirección NNE-SSW y buzamiento al oriente, al igual que por las fallas Usaquén-Juan Amarillo, San Cristóbal-Facatativá, Santa Bárbara y Mochuelo, de dirección NNE-SSW.

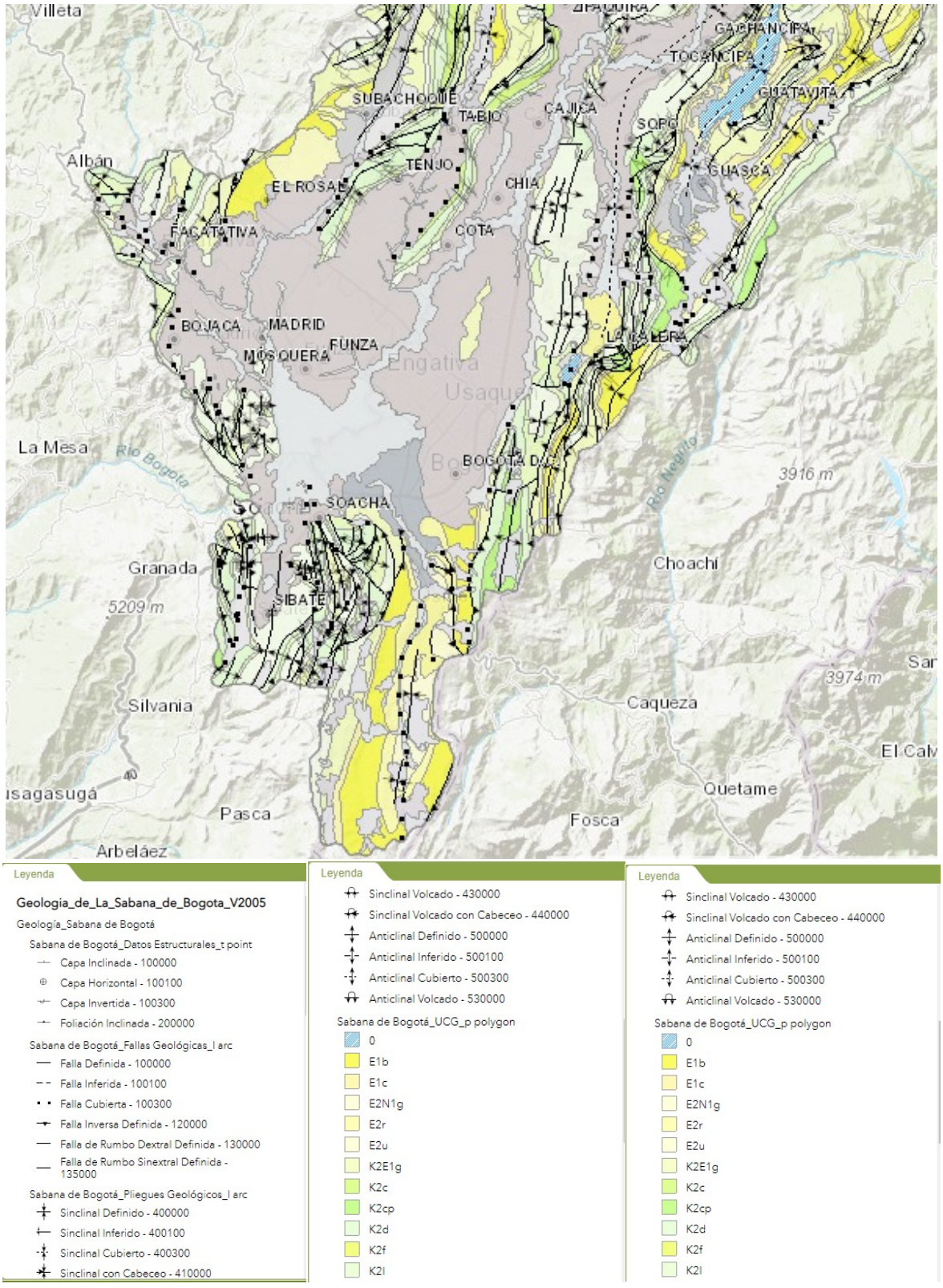


Ilustración 21. Mapa geológico de Bogotá - Servicio Geológico Colombiano
Fuente: http://srvags.sgc.gov.co/Jsviewer/Mapa_Geologico_Sabana_Bogota/

6.3.2. LOCALIDAD DE CHAPINERO

La excavación a analizar se ubica en la localidad de Chapinero de la ciudad de Bogotá, que si se delimita se puede caracterizar de forma más específica. En la Ilustración 22 se observa la ubicación de la localidad y la importante zona montañosa que comprende.

En “Panorama de riesgo ambiental para la gestión del funcionamiento en estaciones de servicio automotriz en las localidades de Chapinero y Usaquén. periodo 2010 -2014” (Gaitan Rey y Nieto Diaz, 2016) se presenta un análisis geomorfológico de la localidad de Chapinero, como se presenta en los siguientes numerales:

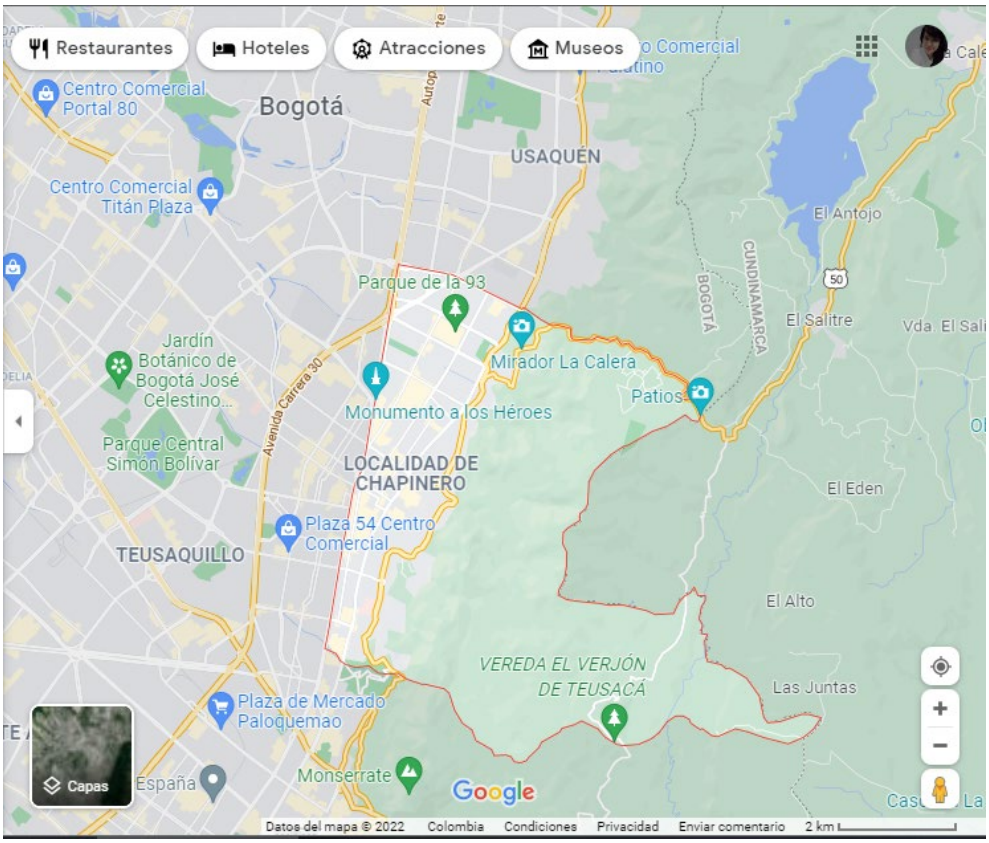


Ilustración 22. Ubicación de la localidad de Chapinero respecto a la ciudad de Bogotá
Fuente: Google Maps

En el área se presentan 4 unidades Litológicas representadas en 9 formación geológicas, a continuación, se presenta la distribución del área de cada formación geológica y una síntesis de su caracterización:

- Unidades del Terciario

Tib – Formación Bogotá. Cuenta con una extensión de 91 Ha, se localiza en la zona sur de la UPZ 90 Pardo Rubio de la localidad de Chapinero, limitando al occidente con la formación

Cacho. Se caracteriza por presentar un predominio de arcillolitas abigarradas, predominantemente rojas, con intercalaciones de areniscas verdosas friables de grano fino que gradan a limolitas y arcillolitas limosas, El espesor de la unidad es 1095 m.

Tic –Formación Cacho. Cuenta con una extensión de 21.71 Ha, se localiza en la zona sur de la UPZ 90 Pardo Rubio de la localidad de Chapinero, limitando al oriente con la formación Bogotá. La formación está compuesta de areniscas de variedad de tamaños de granos, con textura ripiosa. Se presenta estratificación cruzada con intercalaciones con capas de arcillas abigarradas.

Tkgs –Formación Guaduas Superior. Con un área de 33.44 Ha, su ubicación comprende la franja sur occidental de la UPZ 90, limitando al oriente con la formación Cacho. Consta de limolitas y arcillolitas en capas de espesor grueso y de colores rojizos, verdosos y azulosos; se intercala con areniscas de grano medio organizadas en capas medias cuneiformes.

- Unidades del Cretácico

Ksglt –Formación Arenisca de labor tierna. Están se localizan a lo largo de la Localidad de Usaqué, y al sur de la Localidad de Chapinero, posee una extensión de 300,06 Ha. Está conformada por secuencias en capas muy gruesas de areniscas cuarzosas y feldespáticas blancas a grises claras de grano fino a grueso y en ocasiones conglomeráticas, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras, se identifican estructuras sedimentarias internas como estratificación cruzada.

Ksgp –Formación Plaeners. Esta formación se presenta hacia el sur del área de estudio, generalmente en el franco oriental de la formación arenisca dura, al norte se presenta conjunto a la formación arenisca de labor tierna. Posee un área de 21,52 Ha. En general se encuentra conformada por secuencias monótonas de arcillolitas, limolitas silíceas, chert fosfático con intercalaciones de capas delgadas de areniscas de grano muy fino, areniscas fosfáticas y fosforitas con abundantes foraminíferos bentónicos, es típica la partición ortogonal prismática a manera de panelitas y el fracturamiento concoideo de las limolitas silíceas.

- Sedimentos relacionados con los ambientes de cuenca

Qrtsa –Formación Río Tunjuelo. Se presentan dos unidades de esta formación, la primera en el límite sur y la segunda y la segunda justo en el centro de la Localidad de Chapinero. Dichas unidades conformación la formación rio Tunjuelo con un área total de 148.2 Ha y 3.15%. Estos depósitos son de origen fluvial, forman abanicos aluviales explayados y aterrazados con suaves pendientes.

Qsa2 –Formación Sabana. Configurándose como la formación con mayor área 3531,03Ha; su ubicación va a lo largo de la franja de los cerros orientales en sentido sur – norte, una buena parte del área urbana de las localidades se yace sobre esta formación. Este depósito es

el resultado de la acumulación de sedimentos finos en un antiguo lago, con fluctuaciones en el nivel de agua: principalmente arcillas lacustres (Qsa1), y hacia los bordes de esta cuenca sedimentaria arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas (Qsa2). Este lago dejó planicies y deltas lacustres, los cuales son extensos, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada suavemente inclinada ny limitada hacia los cauces por los escarpes.

Ksgd –Formación arenisca dura. Conjunto a las formaciones Ksgp y Ksglt, se encuentra en la zona sur del área de estudio, creando un corredor paralelo a la dirección de los cerros orientales. La formación arenisca dura posee 28,84 Ha. En general, se encuentra conformada por areniscas cuarzosas, blancas a amarillentas por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro, al occidente de la Sabana las areniscas son más lodosas y se reporta un espesor de 320 m, mientras que al oriente tiene un espesor de 407 m.

- Otras Unidades

Qdp –Depósitos de Pendiente. Representado en el área de estudio con un área total de 543,53 Ha. Se caracteriza por presentar depósitos acumulados durante el Cuaternario reciente, de diferente granulometría que van de limosos a arenosos con bloques, depósitos de abanicos aluviales y sedimentos lacustrinos, todos de origen local.

Tabla 6
GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Unidad	Nombre	Nomenclatura	Área Ha	% Área
Terciario	Formación Bogotá	Tib	91,00	1,93
	Formación Cacho	Tic	21,71	0,46
	Formación Guaduas Superior	Tkgs	33,44	0,71
Cretácico	Formación arenisca de labor tierna	Ksglt	300,06	6,37
	Formación Plaeners	Ksgp	21,52	0,46
Sedimentos relacionados con los ambientes de cuenca	Formación rio Tunjuelo	Qrtsa	148,20	3,15
	Formación Sabana	Qsa2	3531,03	74,96
	Formación arenisca dura	Ksgd	28,84	0,61
Otras Unidades	Depósitos de Pendiente	Qdp	534,53	11,35
Sin Información		NA	0,06	0,00
Total			4710,39	100,00

Ilustración 23. Geología de la localidad de Chapinero
Fuente: (Gaitan Rey & Nieto Diaz, 2016)

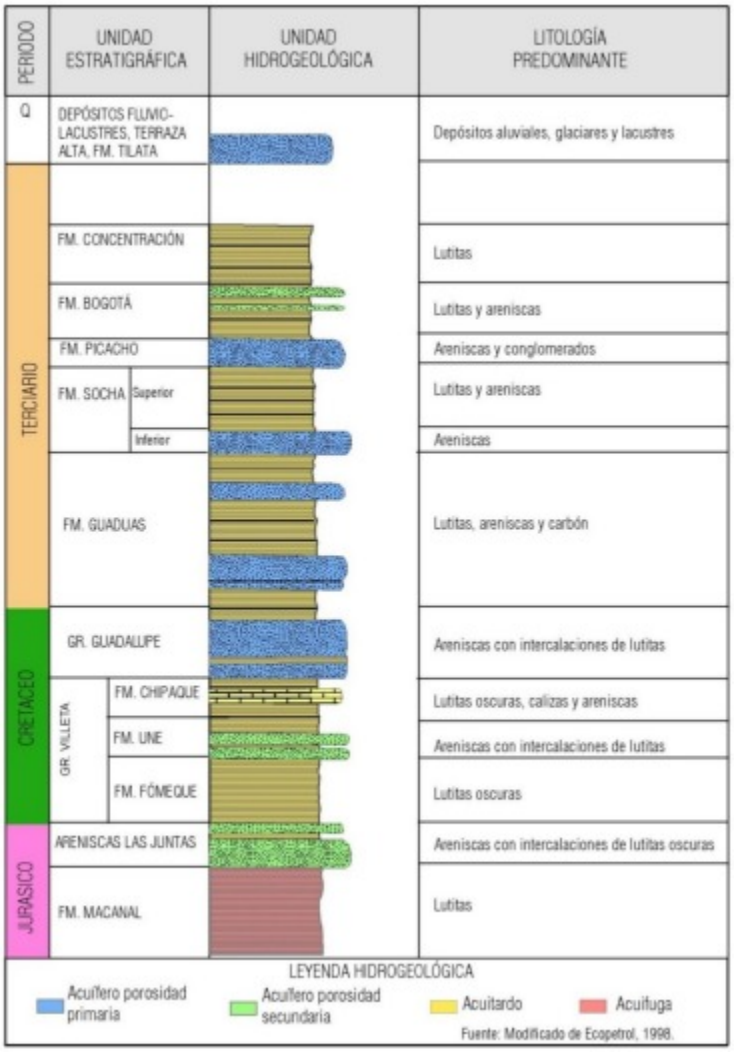


Ilustración 24. Columna estratigráfica generalizada de la provincia Cordillera Oriental
Fuente: https://bogota.gov.co/especiales-alcaldia-bogota/van-der-hammen/estudios/Anexos%20Capitulo%203.pdf

6.4. HIDROGEOLOGÍA DE LA LOCALIDAD DE CHAPINERO

Tabla 7
UNIDADES HIDROLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Acuífero	Área Total	% Área
Cuaternario Formación Sabana	3999,96	84,92
Cuaternario Formación Chía - Rio Tunjuelo	534,53	11,35
Cretácico	51,47	1,09
Terciario	124,44	2,64
Total	4710,39	100,00

Ilustración 25. Unidades hidrológicas de la localidad de Chapinero
Fuente: (Gaitan Rey & Nieto Diaz, 2016)

Siguiendo la caracterización de la ambiental de "Panorama de riesgo ambiental para la gestión del funcionamiento en estaciones de servicio automotriz en las localidades de Chapinero y Usaquén. periodo 2010 -2014" (Gaitan Rey y Nieto Diaz, 2016) se tiene que:

Se presentan 3 unidades hidrológicas, el acuífero Cuaternario que se divide en Formación sabana y Formación Chía – Rio Tunjuelo con 400 Ha y 534 Ha respectivamente, el acuífero cretácico con 51.47 Ha y por último el acuífero terciario con 124 Ha.

Tabla 8
ACUÍFEROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Acuífero	Nivel estático NE (m)	Nivel Dinámico ND (m)	Abatimiento S (m)	Transitividad T (m^2/día)	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Capacidad especifica Ce (l/seg/m)	Coeficiente de Almacenamiento S
Cuaternario Formación Sabana	2.61 - 94.93	9.8- 106.54	0.44 – 59.98	137- 373	0.54 – 9.11	0.005 – 4.54	1.1 x 10^{-4} – 8x10_{-5}
Cuaternario Formación Chía - Rio Tunjuelo	13.88- 29.26	16.23 – 32.57	2.35 – 3.59	315 – 1432	17.5 – 8.06	2.35 – 8.06	2.62x10^{-3}
Cretácico	0.25.14	2.79 - 48.42	1.79 – 33.83	5.4 - 1064	0.7 – 59.21	0.021 – 4.13	-

Ilustración 26. Caracterización de los acuíferos en la localidad de Chapinero
Fuente: (Gaitan Rey & Nieto Diaz, 2016)

6.4.1. POZOS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Según "Panorama de riesgo ambiental para la gestión del funcionamiento en estaciones de servicio automotriz en las localidades de Chapinero y Usaquén. periodo 2010 -2014" (Gaitan Rey y Nieto Diaz, 2016) en el área de estudio se encuentran 10 Pozos de agua Subterránea que se encuentran bajo la jurisdicción de la secretaria ambiental y objeto de estudio como insumo para construir el modelo hidrogeológico de distrito capital.

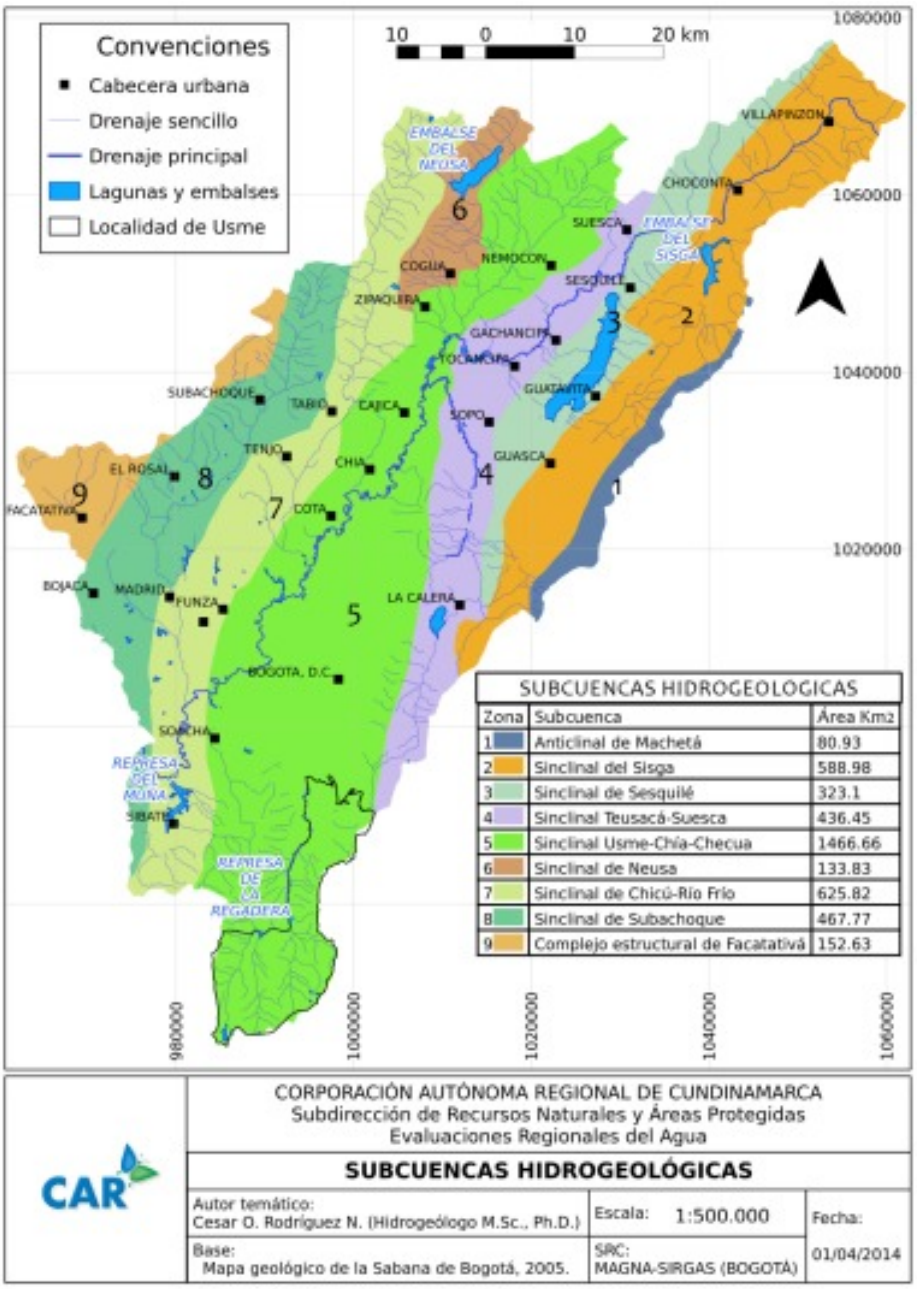


Ilustración 27. Mapa de subcuencas hidrogeológicas
Fuente: https://bogota.gov.co/especiales-alcaldia-bogota/van-der-hammen/estudios/Anexos%20Capitulo%203.pdf

6.5. SISMOLOGÍA

Según el IDIGER la ciudad de Bogotá está expuesta a la actividad sísmica generada por los diversos sistemas de fallas geológicas activas existentes en el país, en mayor o menor grado en función de la distancia de la capital a estos sistemas. El movimiento que se puede llegar a sentir en diferentes puntos de la ciudad también está influenciado por el tipo de suelo en cada uno de ellos debido a los efectos locales.

La ciudad de Bogotá cuenta con estudios detallados de respuesta dinámica de los suelos por la actividad sísmica regional, conocidos como microzonificación sísmica. En el Decreto Distrital 523 de 2010 por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C., se han definido parámetros de sismo resistencia para el diseño y análisis de edificaciones. Como se proyecta en la Ilustración 28

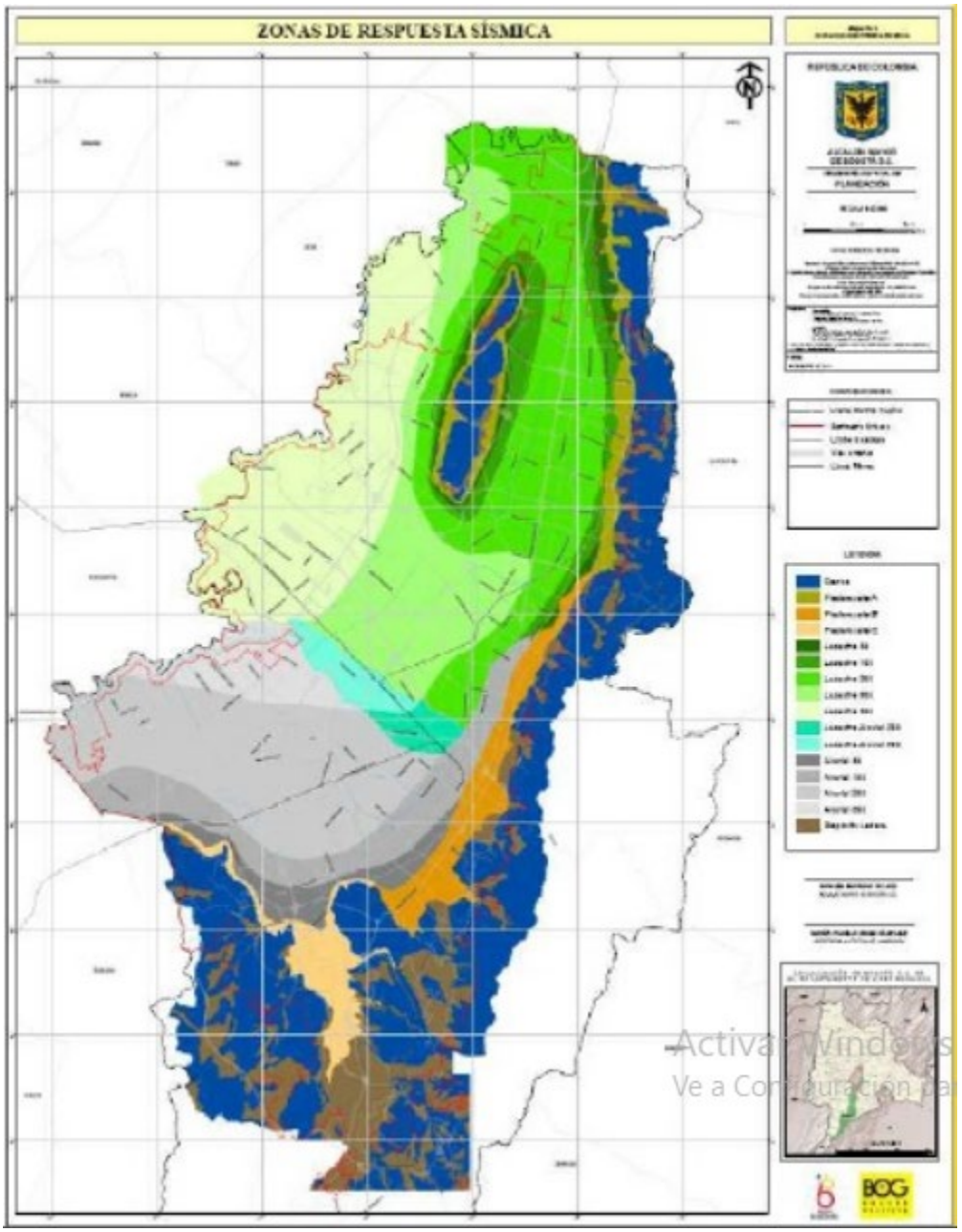


Ilustración 28. Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá
Fuente: Decreto 523 de 2010 (Alcaldía de Bogotá)

6.6. PROCESO CONSTRUCTIVO CONSIDERADO EN EL DISEÑO DEL PROYECTO

Como datos preliminares a las actividades de excavación se estableció que: el material se cargará a las volquetas saliendo por la calle 57 actual acceso a la obra y que el material se irá acopiando en proximidad de la máquina de cargue, la ubicación de la maquinaria se retrata en Ilustración 29.

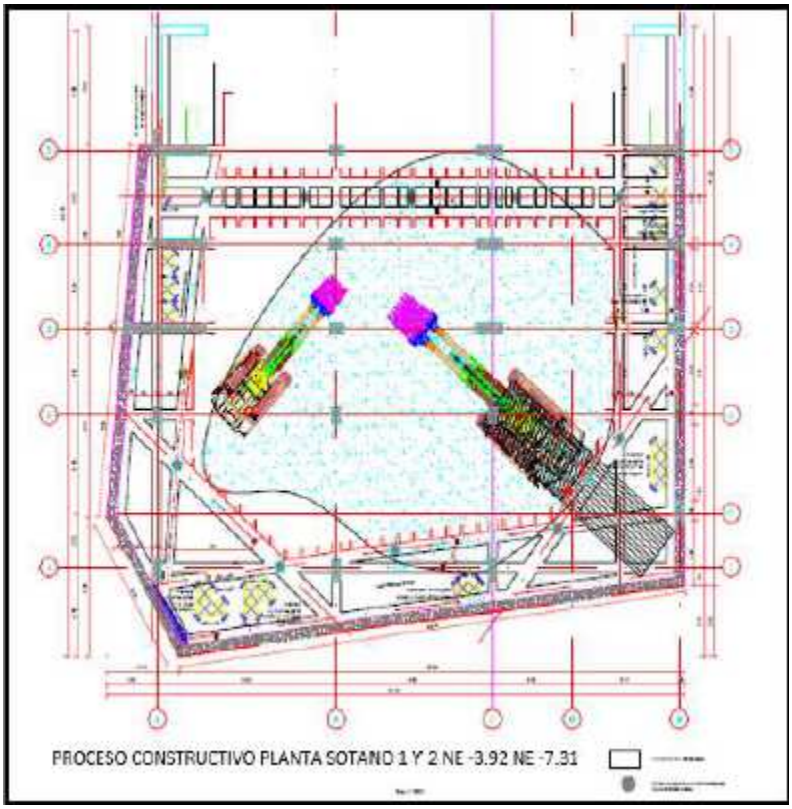


Ilustración 29. Ubicación maquinaria para el proceso de excavación del proyecto analizado
Fuente: (Pino Arias & Riveros Antolinez, 2021)

A continuación, se presentan la secuencia del proceso para la excavación para sótanos del proyecto analizado:

ZONA 1: Definida como el área contenida desde 3 metros al oriente del eje B hasta el eje D, y entre los ejes los ejes 6 y 7. Se fundirán las vigas VA-2 Y VA3, y los dados D2 Y D9.

ZONA 2: Definida como el área contenida desde 3 metros al oriente del eje B hasta el eje D, desde 2 metros al sur del eje 3 y 2 metros al norte del eje 4. Se fundirán las vigas VA-13, y VA- 14, las vigas VA-6 y VA-7 y los dados D1, D8, D1 eje 3 con eje B, y dado D5.

ZONA 3: Definida como el área contenida desde 3 metros al oriente del eje B hasta el eje D, desde el eje 6 y 2 metros al norte del eje 5. Se fundirá la viga VA-13, VA-14, VA-15, VA-4 Y VA-5 y los dados de cimentación contenida en esta área.

ZONA 4: Definida como el área contenida desde 3 metros al oriente del eje B hasta el eje D, desde 2 metros al sur del eje 2 y 4.6 metros al norte del eje 2. Se fundirá la viga VA-08, VA 094, VA-13, VA-14.

Una vez se terminen las excavaciones de las zonas mencionadas anteriormente (consideradas cruciales para el proceso de excavación) se iniciará el proceso de excavaciones por franjas requeridas. El orden de intervención está definido acorde con la Ilustración 30.

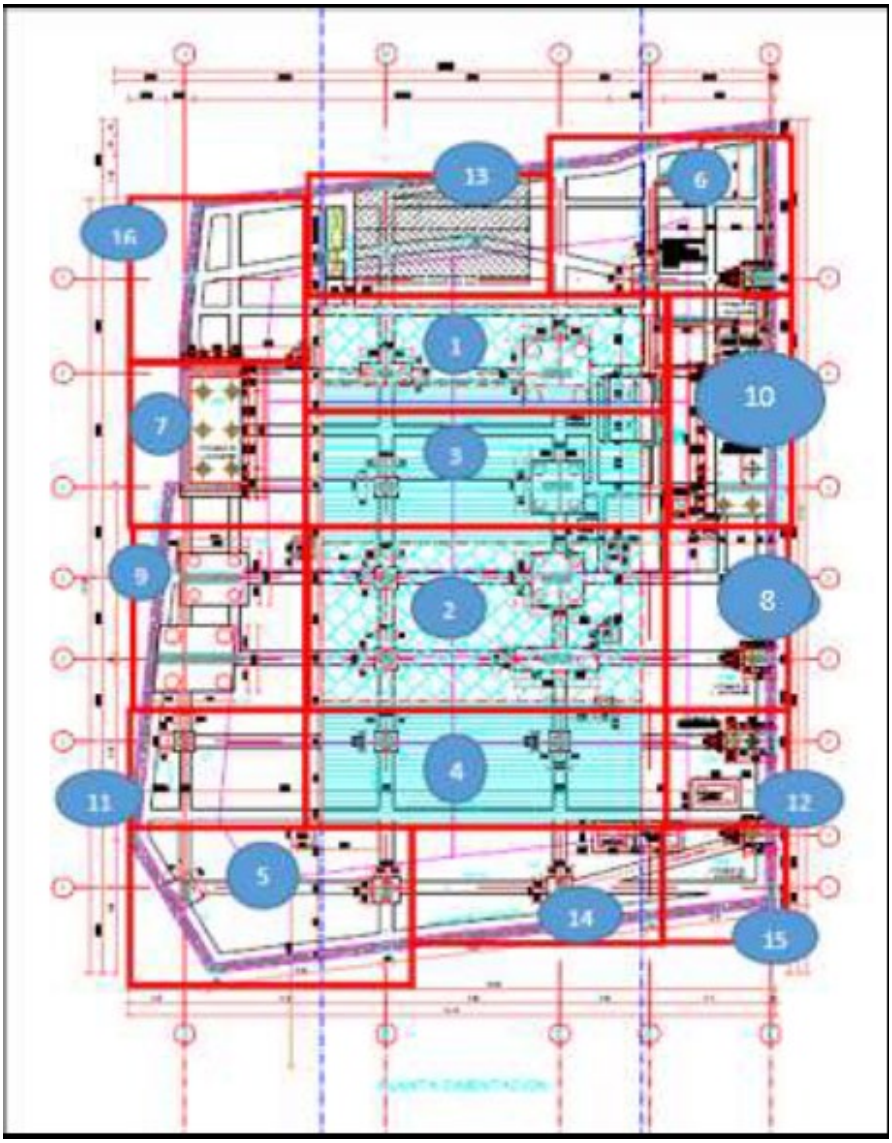


Ilustración 30. Proceso de excavación propuesto para el diseño por el especialista del proyecto
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

Para el proceso de excavación se hizo necesario de carácter obligatorio fundir las vigas VC-5, VS-9, VC-6, VD-3, VC-3, VS-8 Y VD4 elementos que formaron un anillo que dio rigidez

formando un anillo manteniendo en equilibrio las fuerzas provenientes de los empujes activos. Hasta tanto no se culminó este anillo no se continuo con la excavación en sótano.

6.7. PROCESO CONSTRUCTIVO CONSIDERADO POR EL CONTRATISTA DEL PROYECTO

El contratista del proyecto, por diferentes motivos implementó un proceso de excavación diferente al propuesto por el especialista en los diseños del proyecto, en la Ilustración 31, se muestra el proceso realizado por el contratista para la secuencia de la excavación del proyecto analizado:

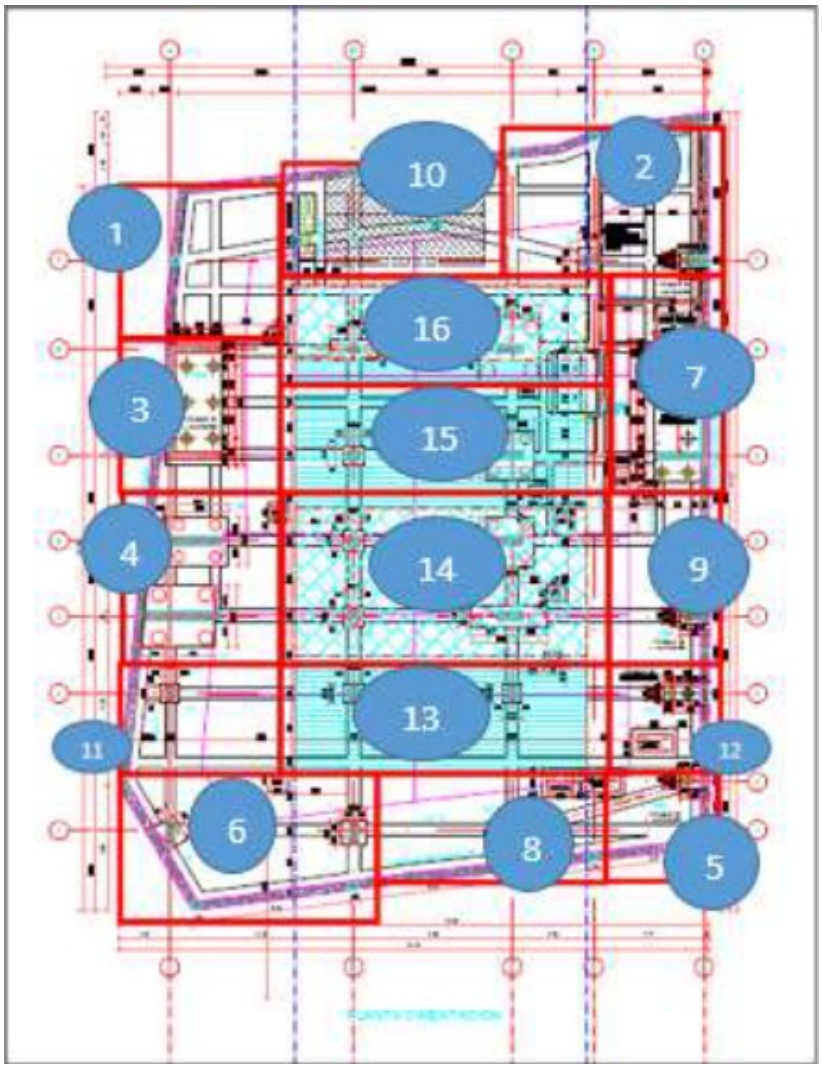


Ilustración 31. Proceso de excavación realizado por el contratista del proyecto
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

6.7.1. CRONOLOGÍA CONSTRUCTIVA DE LA EXCAVACIÓN ANALIZADA

A. Excavación de los pilotes en el corte A-A del diseño y excavación almeja para muro pantalla de espesor 0.5 metros. Tal y como se muestra en la Ilustración 32.

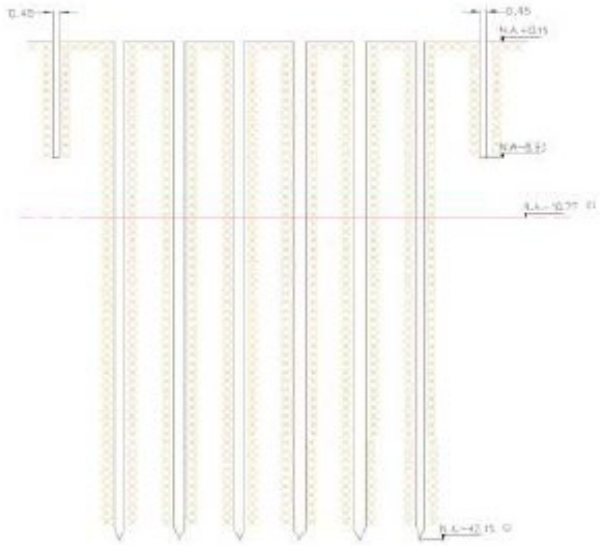


Ilustración 32. Excavación pilotes y muro pantalla de borde en la excavación analizada
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

B. Excavación mecánica tipo anillo para viga cinturón alrededor del perímetro del proyecto se realiza en la primera etapa con excavaciones seccionadas en áreas por 10 zonas debidamente localizadas en el plano de planta, según lo proyectado en la Ilustración 33.

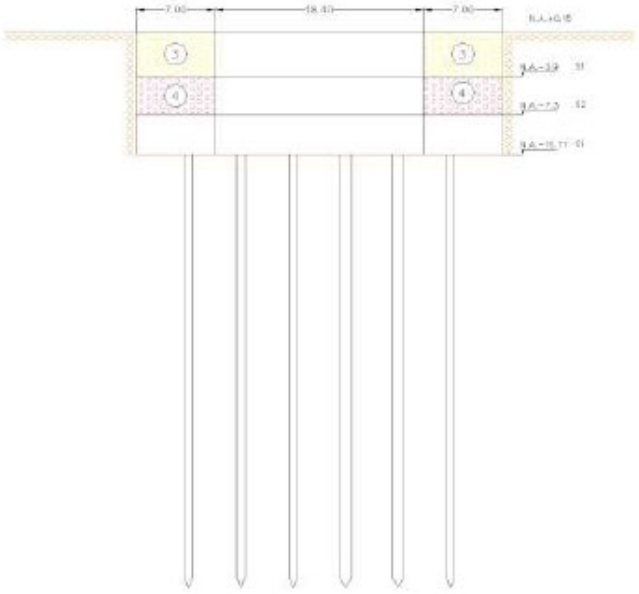


Ilustración 33. Excavación viga cinturón para sótano 1
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

C. Excavación hasta nivel -7.3 metros. En el proceso de excavación se estableció un talud 1 a 1 como se puede ver en la Ilustración 34, (en diseños la relación es de 2 a 1) teniendo en cuenta la carga de las máquinas que operan sobre el talud.



Ilustración 34. Talud 1 a 1 para excavación sótano 1
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

D. Fundición viga cinturón y viga puntal ubicadas en el nivel -7.3 metros.

E. Excavación central del núcleo de la excavación hasta -7.3 metros. Conforme a la Ilustración 35.



Ilustración 35. Excavación zona central hasta nivel -7.3 metros para fundida de viga puntal
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

F. Excavación parte central del núcleo del proyecto desde nivel -7.3 metros, correspondiente al sótano 2 de la estructura, hasta el nivel -10.77 en donde se cimenta la estructura. Lo cual se proyectó desde la etapa de diseños, conforme a la Ilustración 36.

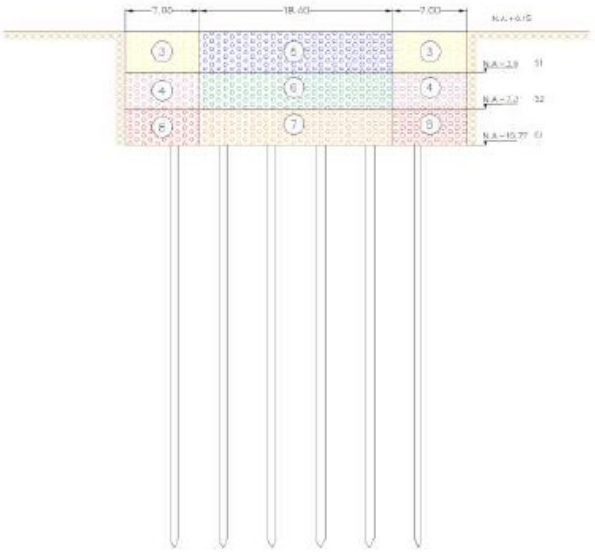


Ilustración 36. Excavación hasta nivel de cimentación
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

G. Excavación manual para armado de dados y vigas de cimentación.

6.7.2. IMPREVISTOS PRESENTADOS EN LA ETAPA CONSTRUCTIVA

Una vez se culminaron las actividades de excavación de la viga cinturón y la viga puntual en el nivel -7.3 según planos de diseño, el contratista da inicio a las actividades de excavación del núcleo de la zona sur ejes 1'-4. De esta manera, el contratista desacata las recomendaciones dadas por la interventoría y se desvía de las etapas planteadas por el especialista en geotecnia en los diseños.



Ilustración 37. Invasión de la excavación por aguas del nivel freático
Fuente: (Pino Arias & Riveros Antolinez, 2021)

Al terminar la construcción de la viga puntual del sótano 2, sin ningún inconveniente a pesar de variar el proceso constructivo respecto al recomendado en los diseños del proyecto, se inició excavación a nivel -10.33. Se produjo el aumento del nivel freático, el cual se evidencia en la Ilustración 37, el cual se ocasionó debido a las presiones generadas por las excavaciones por causa del proceso de excavación sin ningún tipo de investigación.

En el proceso de la excavación de la viga cinturón del nivel -10.33, se visualiza en las juntas de las pantallas una separación de alrededor de 30 cm, generando por las juntas de las pantallas un gran flujo de finos en los niveles de sótano 2 y cimentación, lo que ocasiono socavación entre las pantallas, lo cual se evidencia en la Ilustración 38, a consecuencia de esta emergencia se optó inyectar concreto del sótano dos para mitigar la emergencia.



Ilustración 38. Separación de juntas en las pantallas de la excavación
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

Debido a los flujos plásticos, generados en suelos cohesivos, en la etapa de cimentación se generaron asentamientos que afectaron algunas edificaciones aledañas.

La excavación actualmente se encuentra en estado abierto, lo que la deja vulnerable a diferentes factores desfavorables que pueden acarrear separación en las pantallas de excavación, desplazamientos de fondo, desplazamientos verticales y pérdida de verticalidad en las columnas de la futura estructura, afectaciones considerables a las edificaciones aledañas (Ver Ilustración 39), pérdida de material circundante a la excavación.

Cada fallo en la estructura puede acarrear grandes costos, por lo que es recomendable continuar con el proyecto según las recomendaciones de los especialistas.



Ilustración 39. Muestra de las patologías desfavorables en las construcciones aledañas a la excavación

Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

7. ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES DE RESILIENCIA EN EL CASO DE ESTUDIO ANALIZADO

7.1. GENERALIDADES

En este capítulo se determinarán los valores asociados a los criterios de resiliencia de una excavación para sótanos los cuales son robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación.

Para la definición de esos cuatro criterios se evaluaron las condiciones en sitio mediante inspecciones visuales, se realizó una recopilación bibliográfica y se interpretaron las simulaciones del proyecto estudio de caso.

A partir de esas actividades se logró definir los factores que componen cada uno de los criterios de resiliencia y otorgarles un valor, lo que permite inferir si la estructura cuenta con ellos o no.

7.2. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE ROBUSTEZ

La robustez es uno de los criterios que tiene más peso en el análisis de la resiliencia, y esto se debe a que sus parámetros de evaluación definen condiciones de tipo estructural, es decir, condiciones que determinan la funcionalidad y vida útil de la estructura.

Para la evaluación de algunos criterios relacionados en el presente trabajo se tomó información de la monografía denominada “Análisis preliminar de la estabilización de una excavación profunda mediante la técnica de congelamiento de suelos” (Riveros y Pino. 2021), en la cual se trabajó sobre el mismo estudio de caso.

Se evaluaron un total de 7 parámetros con el objeto de definir si el sistema presenta condiciones de robustez.

7.2.1. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE FONDO EN EL TERRENO EXCAVADO

Las sobrepresiones del terreno debido al desconfinamiento de los suelos, cambios volumétricos y escape de humedades, generan esfuerzos que deben ser soportados por la estructura contenedora. Es así que, para los esfuerzos generados a causa de las presiones laterales, existe una compensación generada por medio de muros pantalla, y aquellas que pueden generarse en los vértices ubicados entre el fondo y los costados laterales pueden llevar a la sub-presión de la placa, por medio de la denominada falla de fondo.

Esta falla, se refiere a la respuesta ante las sobrepresiones de carga y apuntalamientos. De acuerdo con el artículo denominado “Análisis simplificado de la ocurrencia de falla de fondo en la ejecución de excavaciones para sótanos en los suelos blandos de Bogotá D.C” (Pineda

Jaimes J. , 2003) la altura crítica de la excavación puede variar y tiene relación directa con el cumplimiento del proceso constructivo que ya se evaluó en el ítem 6.2.6., las propiedades geomecánicas y los factores de seguridad que también fueron evaluados dentro del presente trabajo en el apartado 6.3.1.

Teniendo en cuenta que los factores anteriormente relacionados ya fueron evaluados, se parte de (Rodriguez Castilla, 2017), para la evaluación cuantitativa de condiciones que permitan inferir la posibilidad de una falla de fondo en la edificación.

La existencia de estas condiciones, se verifica en el trabajo investigativo de (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021), donde se puede constatar por medio de registro fotográfico el mal manejo del nivel freático de la excavación y la presencia de asentamientos en el sitio.

Por lo anterior, analizando las condiciones de la excavación caso, a este criterio, desplazamientos verticales de fondo en el terreno excavado, se asigna una ponderación de cero.

7.2.2. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS VERTICALES DE LA SUPERFICIE

Para la estimación de los desplazamientos se utilizó el Método de Elementos Finitos, lo cual es un método numérico general para determinar soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales complejas.

Para este fin se empleó un Software que realiza el análisis elementos finitos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones alrededor de las excavaciones y mediante el cual se pudieron obtener datos de desplazamientos verticales en superficie aproximada.

En el análisis se tomaron dos condiciones: para la primera condición una excavación a 3.10 m a nivel de sótano 1, a 7.3 m a nivel sótano 2, a 10.77 m a nivel de sótano 3 para un ancho de excavación de 32.4 m en un corte A-A transversal, para un ancho corte B-B longitudinal de 42.43 m con sus respectivas profundidades anteriormente mencionadas en la primera condición, con el fin de evaluar el comportamiento de cada etapa tanto en la condición inicial como en la final.

Finalmente se procede a realizar la interpretación de los dos análisis, obteniendo la predicción de desplazamientos verticales y la posible afectación de la infraestructura vial con la ayuda del software elementos finitos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones alrededor de la excavación como se muestra en las Figuras 3 y 4 (Riveros & Pino, 2018).

Etapa	B (m)	H (m)	q(KN/m2)	ASENTAMIENTO (m)
Etapa 1	PILOTES		200	0,03
Etapa 2	PANTALLAS		200	0,03
Etapa 3	7	0,53	200	0,04
Etapa 4	7	0,53	200	0,045
	7	0,53		
Etapa 5	7	0,53	200	0,045
	7	3,9		
Etapa 6	7	3,9	200	0,045
	7	3,9		
Etapa 7	7	3,9	200	0,045
	7	3,9		
	18,4	0,53		
Etapa 8	7	7,3	200	0,06
	7	3,9		
	18,4	0,53		
Etapa 9	18,4	0,53	200	0,06
	7	3,9		
	7	3,9		
Etapa 10	18,4	3,9	200	0,06
	7	7,3		
	7	7,3		
Etapa 11	32,4	7,3	200	0,08
Etapa 12	18,4	10,77	200	0,08
	7	7,3		
	7	7,3		
Etapa 13	32,4	10,77	200	0,09

Figura 2. Desplazamientos verticales software del corte A-A
Fuente: (Pino Arias & Riveros Antolinez, 2021)

Etapa	B (m)	H (m)	q(KN/m2)	ASENTAMIENTO (m)
Etapa 1	PILOTES		200	0,008
Etapa 2	PANTALLAS		200	0,008
Etapa 3	7	0,53	200	0,048
Etapa 4	7	0,53	200	0,048
	7	0,53		
Etapa 5	7	3,9	200	0,057
Etapa 6	7	3,9	200	0,06
	7	3,9		
Etapa 7	7	3,9	200	0,06
	7	3,9		
	13,22	0,53		
Etapa 8	7	3,9	200	0,06
	7	3,9		
	26,44	0,53		
Etapa 9	20,22	3,9	200	0,075
	7	3,9		
Etapa 10	40,43	3,9	200	0,075
Etapa 11	33,43	3,9	200	0,075
	7	7,3		
Etapa 12	7	7,3	200	0,075
	7	7,3		
	26,43	3,9		
Etapa 13	20,22	7,3	200	0,075
	13,21	3,9		
	7	7,3		
Etapa 14	40,43	7,3	200	0,08
Etapa 15	20,21	7,3	200	0,08
	13,22	10,7		
Etapa 16	33,43	10,77	200	0,08
	7	7,3		
Etapa 18	40,43	10,77	200	0,091

Figura 3. Desplazamientos verticales software del corte B-B
Fuente: (Pino Arias & Riveros Antolinez, 2021)

Teniendo en cuenta los resultados presentados anteriormente, obtenidos mediante las modelaciones se puede observar que las condiciones más críticas se podrían llegar a presentar desplazamientos verticales en superficie de hasta 91 mm razón por la cual se cataloga con una severidad alta.

Ahora, en contraste de los asentamientos medidos con las deformaciones y umbrales de tolerancia definidos la Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2016) y tomando como umbral tolerable de deformación 15 mm se tiene que:

RELACIÓN DEFORMACIÓN / UMBRAL TOLERABLE
91 mm/ 20 mm = 4,55

De acuerdo a la adaptación Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC) se tiene un valor superior a 1,2 correspondiendo un índice de 0.00.

7.2.3. ANÁLISIS DE LOS DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES DE LAS PANTALLAS

La evaluación en el tiempo 1 de los desplazamientos horizontales, se supedita a las modelaciones realizadas y evaluadas en la etapa de diseños, en los cuales se evidencia una adecuada planeación y la incorporación de un factor de seguridad acorde, dando por entendido que no se presentarán desplazamientos horizontales de las pantallas en el desarrollo de la actividad. Por tanto, la evaluación de este parámetro en la etapa inicial es de 1.00.

Para el tiempo 2, es decir, una vez ocurrido el evento disruptivo, se evalúan las condiciones en sitio de las pantallas horizontales, donde se evidencia que si se presentó un desplazamiento horizontal de las pantallas, el cual se generó como consecuencia de una mala ejecución del proceso constructivo. Adicional a lo anterior, se evidencia la afectación a edificaciones aledañas.

Estas pantallas, aunque inicialmente cumplieron el papel de muro de contención para soportar la excavación, tenían como objeto definir los límites de los sótanos. La incorrecta definición de los esfuerzos producto de los suelos contenidos y en consecuencia un mal diseño de los muros, generó el desplazamiento horizontal, tal y como se evidencia en el registro fotográfico tomado de (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021), que corresponde a la Ilustración 40.

Registro fotográfico mayo del 2019	
	
Georreferenciación	Descripción
Separación de pantallas sótano 3 nivel -10.33.	Medición de separación de pantalla sótano 3.

Ilustración 40. Separación de muros pantalla
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

En ese orden de ideas, a pesar de que en la etapa preliminar y en los diseños se tomaron las medidas pertinentes acorde a la Norma (NSR-10), estos lineamientos no se siguieron en la etapa de construcción y el resultado confirma que hubo una separación de la pantalla del sótano 3, es decir, el nivel más profundo del sistema.

Por tanto, la valoración de este parámetro corresponde a cero, debido a que si existen desplazamientos horizontales de las pantallas.

7.2.4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ENTORNO (EDIFICACIONES Y VÍAS)

Este parámetro se basa en las actas de vecindad que debieron ser levantadas previo al desarrollo de la obra. Sin embargo, al no contar con ellas se realiza una inspección visual que permitirá evidenciar impactos importantes en las edificaciones cercanas,

De este análisis se obtiene que no existen afectaciones significativas como consecuencia de los impactos que pudo generar la construcción de la Torre Administrativa del SENA.

Por otro lado, la afectación a las vías como se mencionó en el desarrollo metodológico de este parámetro se evalúa por de los asentamientos superficiales. De allí se define que de acuerdo a las modelaciones realizadas se podrían llegar a presentar deformaciones verticales en superficie de hasta 91mm.

Razón por la cual, para el desarrollo de dicho proyecto se propuso una metodología de congelamiento del suelo que permitirá mitigar el flujo de agua durante la etapa de excavación y de esta manera controlar los asentamientos esperados.

En ese sentido, se determinó que previo inicio de las actividades de excavación no había presencia de afectaciones importantes del entorno. Por lo tanto, se considera una valoración de 1.00.

Una vez se ejecutan las actividades de excavación se evidencian problemas y la evaluación visual que se da al entorno permite identificar que, pese a ellos, no se presentan afectaciones. Es decir, que el estado del entorno mantiene sus condiciones a pesar de la excavación.

7.2.5. ANÁLISIS DEL ESTADO DE LAS OBRAS DE CONTENCIÓN PARA PROTECCIÓN DE COLINDANCIAS

La excavación y futura construcción de la Torre Administrativa del SENA, limita hacia la calle 58 bis, es decir, por el norte con edificaciones de dos pisos y tres pisos.

No obstante, por la carrera 9na, la carrera 8B y la calle 57 no presenta colindancias, como puede observarse en la Ilustración 41 e Ilustración 42. Por esta razón debe evaluarse principalmente la protección que existe de la excavación hacia la calle 58 bis, la cual se muestra por medio de la Ilustración 43.



Ilustración 41. Calle 57 con Carrera 9, se evidencia que no existen colindantes
Fuente: Google Maps



Ilustración 42. Calle 57 con Carrera 8B, se evidencia que no existen colindantes
Fuente: Google Maps



Ilustración 43. Calle 58 bis con Carrera 9, se evidencia colindantes zona norte
Fuente: Google Maps

La excavación hacia el fondo, es decir, la protección de las viviendas por la calle 58 bis se realizó empleando como método de contención las pantallas de concreto reforzado, las cuales a su vez se encuentran soportadas por columnas que se encuentran cimentadas en pilotes con diámetros entre 0.8 m y 1 m.

Por esta razón, se considera que existe una protección adecuada debido a que las condiciones de las obras de contención para la protección de colindantes se han concebido de acuerdo a los diseños y programación constructiva del proyecto. Además, se encuentran en óptimas condiciones.

La valoración de este parámetro es 1.00 debido a que si se cumplen las condiciones previo inicio de la excavación. Conforme se da avance a las etapas de la misma se evidencian problemas relacionados a la ocurrencia de imprevistos generados como consecuencia del no seguimiento de la programación. No obstante, no se evidenciaron grietas que afectaran los terrenos colindantes, por tanto, se mantiene la ponderación.

7.2.6. ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO AL PROCESO CONSTRUCTIVO PROGRAMADO

Como actividad preliminar se debe diseñar un cronograma que permita predecir el tiempo que tardará la ejecución de la obra. Este documento es realizado por un profesional, que contempla todas las actividades relevantes por lo cual, salvo imprevistos, debe ser muy cercano a la realidad.

El cumplimiento de esta programación, que define además la secuencia de las actividades, es de vital importancia para poder contar con una obra realizada correctamente. En ese sentido, el cambio durante la ejecución de las etapas de alguna de las actividades es grave, pues desestabiliza las demás, repercutiendo en reprocesos, reprogramaciones y actividades mal ejecutadas.

De acuerdo con lo evidenciado por (Riveros y Pino, 2021), se definieron cuatro zonas de intervención consideradas en los diseños. Sin embargo, en el proceso constructivo implementado no hubo una correcta definición de taludes, no se siguieron las recomendaciones de la interventoría y no hubo control de las presiones de suelo. Por lo que se determina que no hubo un seguimiento adecuado al proceso de excavación definido. En la Ilustración 44, se muestra el manejo de la actividad de excavación.

Registro fotográfico enero del 2018	
	
Georreferenciación	Descripción
Excavación costado occidental carrera 9 (N -7.3)	Excavación del núcleo de la zona sur entre ejes (1'- 4)

Ilustración 44. Excavación costado occidental de la excavación analizada
Fuente: (Pino Arias & Riveros Antolinez, 2021)

En ese sentido se otorga una valoración de cero para este parámetro, concluyendo que durante las etapas de construcción hubo variaciones indiscriminadas de las etapas constructivas propuestas por el personal experto, sin realizar los estudios y socializaciones correspondientes con los profesionales competentes del proyecto.

7.2.7. ANÁLISIS DEL CONTROL DE NIVEL FREÁTICO EN LA EXCAVACIÓN

El análisis de este parámetro contempla las condiciones presentadas en relación con el manejo de aguas durante el avance de las etapas de excavación.

Se definen las distintas ponderaciones a partir de la presencia de aguas subterráneas en la excavación de forma masiva, estas condiciones de irrupción de aguas subterráneas en la excavación si se presentaron, conforme a lo evidenciado en la Ilustración 45, ocasionando retrocesos y asentamientos diferenciales.

De acuerdo a lo anterior, la valoración otorgada a este parámetro corresponde a cero. El control de nivel freático no solo no aporta a la robustez de la estructura, sino que además ha generado inconvenientes en el desarrollo de las distintas etapas de excavación.

Registro fotográfico septiembre del 2018	
	
Georreferenciación	Descripción
Excavación del núcleo de la zona norte entre ejes (5-7) nivel -10.33 sótano 3.	Aumento del nivel freático ocasionando retrocesos y asentamientos diferenciales.

Ilustración 45. Excavación del núcleo de la zona norte, se evidencia el aumento en el nivel freático de la excavación analizada
Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

Estas condiciones deben anticiparse, con el objeto de tener una rápida reacción e impedir que se entorpezcan las labores constructivas que se estén llevando a cabo. La falta de previsión en este aspecto repercute directamente en la estabilidad de la excavación y por tanto se otorga una valoración de cero.

7.2.8. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA ROBUSTEZ

De acuerdo con lo definido previamente y las ponderaciones obtenidas de cada uno de los parámetros se realiza el análisis de la ecuación de robustez.

Los parámetros relacionados con desplazamientos presentan bajas valoraciones lo que evidencia que hubo una falla en la excavación producto de múltiples factores entre ellos, el desconfinamiento de los suelos, la descompensación de la humedad y el no seguimiento de los parámetros geotécnicos en obra. No obstante, debe tenerse en cuenta la complejidad de la estructura a causa de la profundidad.

Con lo anterior se solucionan las ecuaciones de la robustez para la excavación analizada:

$$Rob\ (t_1) = 0.175(0) + 0.175(0) + 0.175(0) + 0.10(1.00) + 0.10(1.00) + 0.10(0) + 0.175(0)$$
$$Rob(t_1) = 0.20$$

Ecuación 13. Solución de la ecuación de la Robustez en el instante 1

$$Rob\ (t_2) = 0.10(0) + 0.10(0) + 0.10(0) + 0.20(1.00) + 0.20(1.00) + 0.20(0.0) + 0.1(0)$$
$$Rob(t_2) = 0.40$$

Ecuación 14. Solución de la ecuación de la Robustez en el instante 2

De acuerdo al análisis numérico del criterio de robustez realizado para los dos instantes propuestos, se identifica que este parámetro presenta la mayor afectación en el instante uno. El inadecuado manejo del nivel freático y la presencia de desplazamientos de todo tipo, evidencian que la excavación de la Torre Administrativa del SENA no presenta características de robustez adecuadas.

En ambos instantes se evidencian valores de robustez bajos, lo que permite inferir que desde la ejecución de las primeras etapas no se siguieron los diseños y el proceso constructivo propuesto.

7.3. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE REDUNDANCIA

De acuerdo a la metodología del presente trabajo, se define que la redundancia depende de los parámetros factor de seguridad de la excavación, probabilidad de falla de fondo en la excavación, análisis de vías alternas y redes de servicios pertenecientes a la zona de influencia de la excavación.

Por lo que se deben analizar las diferentes ponderaciones de cada parámetro de acuerdo al caso particular tratado en el presente trabajo.

7.3.1. ANÁLISIS FACTOR DE SEGURIDAD DE LA EXCAVACIÓN

Para el análisis del parámetro de factor de seguridad se tendrá en cuenta el trabajo “Análisis Preliminar De La Estabilización De Una Excavación Profunda Mediante La Técnica De Congelamiento De Suelos” (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021) en donde se realizaron simulaciones para evaluar el factor de seguridad y probabilidad de ocurrencia de falla de fondo en la excavación analizada en el presente trabajo (Nueva Torre Administrativa SENA).

(Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021) realizaron modelaciones estáticas considerando cargas de 200 KN/m2 por cada etapa constructiva en la excavación, el principio que se utilizó en el análisis fue con el cálculo de momentos o fuerzas actuantes y momentos o fuerzas resistentes, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 5 y 6.

Etapa	B (m)	H (m)	q(KN/m2)	Bishop Simplificado		Janbu Simplificado		Spencer		Morgenstern-Price	
				FS	PF%	FS	PF%	FS	PF%	FS	PF%
Etapa 1	PILOTES		200	2.647	18%	2.566	17%	2.654	18%	2.653	18%
Etapa 2	PANTALLAS		200	13.744	26%	9.35	25%	13.687	26%	13.616	26%
Etapa 3	7	0.53	200	12.7	26%	8.446	25%	12.574	26%	12.568	26%
Etapa 4	7	0.53	200	12.87	26%	8.56	25%	12.727	26%	12.725	26%
	7	0.53									
Etapa 5	7	3.9	200	7.23	25%	5.452	23%	7.117	24%	7.138	24%
Etapa 6	7	3.9	200	1.526	10%	2.128	15%	7.236	25%	7.251	25%
	7	3.9									
Etapa 7	7	3.9	200	1.951	14%	2.874	19%	7.236	25%	7.258	25%
	7	3.9									
	13.22	0.53									
Etapa 8	7	3.9	200	2.751	18%	3.674	21%	6.536	24%	3.858	21%
	7	3.9									
	26.44	0.53									
Etapa 9	20.22	3.9	200	1.966	14%	3.092	19%	7.051	24%	7.069	24%
	7	3.9									
Etapa 10	40.43	3.9	200	7.33	25%	5.52	23%	7.2	24%	7.22	25%
Etapa 11	33.43	3.9	200	4.51	22%	3.844	21%	4.372	22%	4.468	22%
	7	7.3									
Etapa 12	7	7.3	200	4.54	22%	3.715	21%	4.422	22%	4.483	22%
	7	7.3									
	26.43	3.9									
Etapa 13	20.22	7.3	200	1.206	5%	1.476	9%	4.377	22%	1.71	12%
	13.21	3.9									
	7	7.3									
Etapa 14	40.43	7.3	200	4.496	22%	3.89	21%	4.352	22%	4.454	22%
Etapa 15	20.21	7.3	200	4.48	22%	3.71	21%	4.36	22%	4.45	22%
	13.22	10.7									
Etapa 16	33.43	10.77	200	3.213	20%	2.733	18%	3.021	19%	3.17	19%
	7	7.3									
Etapa 18	40.43	10.77	200	3.44	20%	2.97	19%	3.28	20%	3.41	20%

Figura 4. Resultados para el factor de seguridad y probabilidad de falla de la excavación analizada, para corte B-B' en obra

Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

Etapa	B (m)	H (m)	q(KN/m2)	Bishop Simplificado		Janbu Simplificado		Spencer		Morgenstern-Price	
				FS	PF%	FS	PF%	FS	PF%	FS	PF%
Etapa 1	PILOTES		200	8.33	6%	6.42	6%	8.27	6%	8.26	6%
Etapa 2	PANTALLAS		200	55.25	7%	53.95	7%	55.18	7%	55.16	7%
Etapa 3	7	0.53	200	12.77	7%	9.26	6%	12.7	7%	12.67	7%
Etapa 4	7	0.53	200	12.03	7%	8.81	6%	11.96	7%	11.94	7%
	7	0.53									
Etapa 5	7	0.53	200	1.27	2%	1.62	3%	2.81	5%	2.64	4%
	7	3.9									
Etapa 6	7	3.9	200	1.27	2%	1.75	3%	2.69	4%	1.97	4%
	7	3.9									
Etapa 7	7	3.9	200	2.63	4%	3.23	5%	3.1	5%	2.97	5%
	7	3.9									
	18.4	0.53									
Etapa 8	7	7.3	200	0.73	-3%	0.86	-1%	0.92	-1%	1.03	0%
	7	3.9									
	18.4	0.53									
Etapa 9	18.4	0.53	200	0.73	-3%	0.86	-1%	0.94	0%	0.95	0%
	7	3.9									
	7	3.9									
Etapa 10	18.4	3.9	200	1.19	1%	1.52	2%	2.05	4%	2	4%
	7	7.3									
	7	7.3									
Etapa 11	32.4	7.3	200	4.45	6%	3.42	5%	4.32	5%	4.42	6%
Etapa 12	18.4	10.77	200	2.53	4%	2.71	5%	2.73	5%	2.73	5%
	7	7.3									
	7	7.3									
Etapa 13	32.4	10.77	200	3.38	5%	2.98	5%	3.25	5%	3.36	5%

Figura 5. Resultados para el factor de seguridad y probabilidad de falla de la excavación analizada, para corte A-A' en obra

Fuente: (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021)

Una vez se analizan los resultados obtenidos, para el factor de seguridad, se puede identificar un valor crítico de 0.73 para el corte B-B' en la etapa 8 y 9 del proceso constructivo de la excavación analizada. Un valor menor a 1 en factor de seguridad indica una falla en la estructura, por lo que se debe realizar una revisión detallada del caso y los factores que inciden en los resultados modelados, sin embargo, eso se sale del campo de acción del presente trabajo.

Si se toma en cuenta el valor crítico de factor de seguridad en la excavación analizada y se realiza la valoración de dicho parámetro, según la definición realizada anteriormente en la Tabla 12. Valoración de factor de seguridad en la excavación (parámetro de redundancia) se obtiene una valoración de 0.00 para el parámetro de factor de seguridad.

Si se trabaja con el promedio del factor de seguridad (Método Bishop Simplificado) se obtiene un valor de 6.57 para el factor de seguridad de la excavación analizada. Tomando el valor promedio de factor de seguridad para la ponderación del parámetro de factor de seguridad de la redundancia se obtiene n valor de 1.00.

7.3.2. ANÁLISIS DE PROBABILIDAD DE FALLA DE FONDO

Para el análisis de la probabilidad de falla de la excavación analizada se tomaron en cuenta, nuevamente, los resultados obtenidos del trabajo realizado por (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021) en donde después de las modelaciones de las etapas constructivas de la excavación analizada, mediante el análisis de momentos o fuerzas actuantes y momentos o fuerzas resistentes, se establecieron unos valores de factor de seguridad y probabilidad de falla (mostrados anteriormente en la Figura 4 y la Figura 5.

Siguiendo los resultados de (Pino Arias y Riveros Antolinez, 2021), tomando el valor máximo de probabilidad de falla de 26%, correspondiente al corte B-B' etapa 1 y etapa 2, y asignando una valoración según la definición de la probabilidad de falla de fondo en la redundancia de la excavación (Tabla 13), se obtiene una ponderación de 0.70 para dicho parámetro.

Si se utiliza el valor promedio de probabilidad de falla (13% a través del método de Bishop simplificado) para la determinación de la ponderación del parámetro de redundancia de probabilidad de falla de fondo se obtiene un valor de 0.70.

7.3.3. ANÁLISIS DE VÍAS ALTERNAS

Para el análisis de vías alternas se revisó la ubicación y flujo vial de las vías circundantes a la excavación analizada a través de la herramienta informática Google Maps.

En cuanto a las vías circundantes a la excavación analizada, se identificaron: la calle 57 al sur de la excavación, la carrera 8b al oriente de la excavación y la carrera 9 al oeste de la excavación analizada, al norte no hay una colindancia con una vía de la ciudad sino con otras edificaciones.

En general ninguna de las vías limitantes a la excavación analizada es una troncal importante para el tránsito de la ciudad de Bogotá, como se refleja en la Ilustración *46*, por lo que su afectación no implica influencia prioritaria en la movilidad de la ciudad.

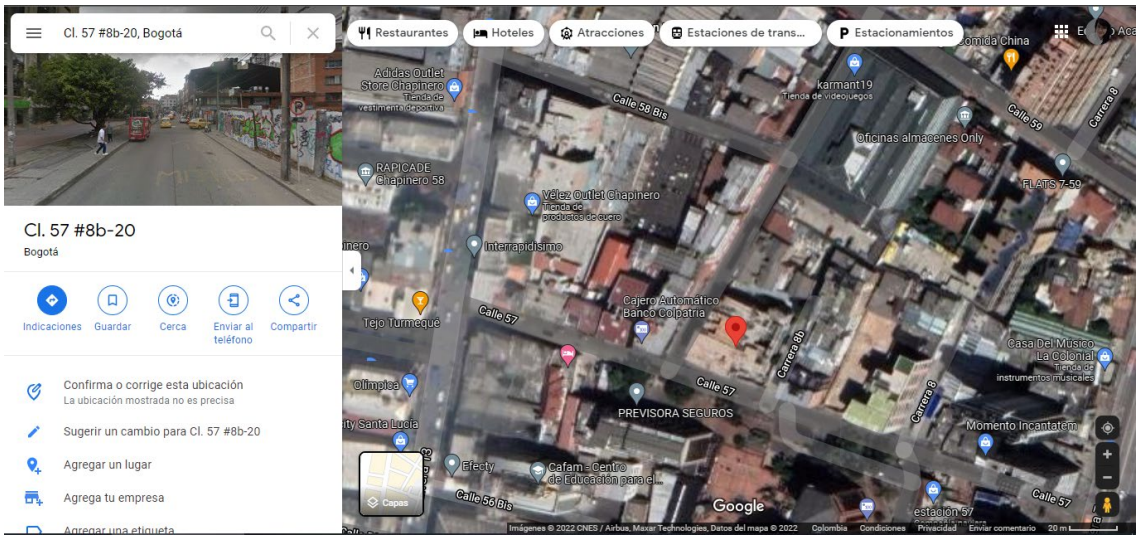


Ilustración 46. Ubicación de la excavación para análisis de flujo de tránsito y vías alternas (parámetro de redundancia)
Fuente: Google Maps

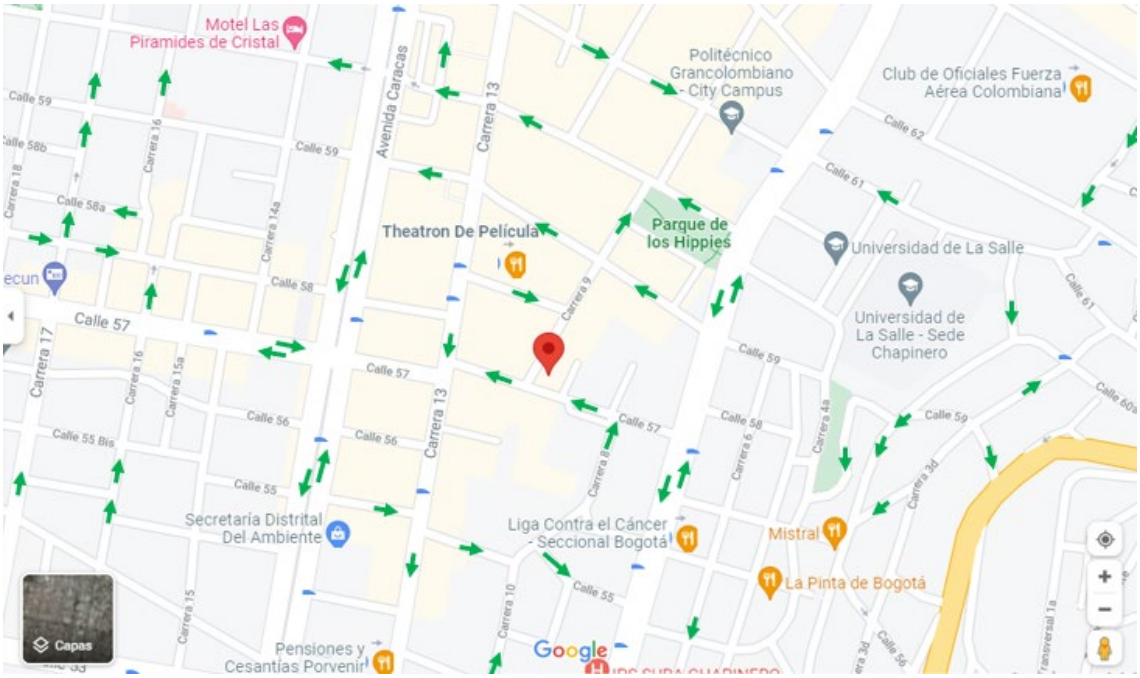


Ilustración 47. Sentido de flujo de tránsito de las vías circundantes a la excavación analizada
Fuente: Adaptado de Google Maps

Para el análisis de vías alternas se revisó el flujo de las vías circundantes a la excavación analizada, tal y como se muestra en la Ilustración 47:

- El flujo de sentido sur a norte de la carrera 9 puede tomarse por la avenida caracas y por la avenida carrera 7 que son troncales para la movilidad de la ciudad. Además, se encuentran a una distancia menor a 500 metros de la vía circundante a la excavación analizada.

- El flujo de la calle 57, de oriente a occidente puede realizar por la calle 60, que se encuentra a una distancia de menos de 300 metros, respecto a la calle 57, además conecta las mismas avenidas (carrera 7 y avenida caracas) que la calle 57.

- La calle 8b es una carretera cerrada, que conecta la calle 57 con las edificaciones residenciales sobre dicha calle, por lo que su flujo de tránsito no podría ser reemplazado por ninguna vía alterna cercana.

Con el anterior análisis se puede afirmar que no todo el flujo vehicular circundante en la zona puede ser redireccionado, además es imposible brindar una opción alterna para el flujo vehicular que tenga como destino alguna edificación cercana a la excavación analizada. De esta manera se le da una evaluación de cobertura de 70% de la demanda de tránsito de las vías circundantes a la excavación analizada, esto corresponde a una valoración de 0.70 en el parámetro de vías alternas, según la Tabla 14.

7.3.4. ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS

La afectación a redes de servicio de una obra civil de tipo excavaciones afecta principalmente las redes subterráneas que puedan pasar por la zona de afectación de la obra, normalmente las redes de servicios que se realizan de forma subterránea son el acueducto, el alcantarillado y el gas natural; es por ello que se revisan las redes de dichos servicios para el análisis del parámetro de redundancia de redes de servicio.

7.3.4.1. Red De Alcantarillado

Según la Ilustración 48. Red de alcantarillado circundante a la excavación analizada, tomada del Geoportal de mapas de alcantarillado (Acueducto De Bogotá, s.f.) la zona de afectación directa, para la excavación analizada, no cuenta con redes de alcantarillado subterráneas. En la zona circundante a la excavación se encuentra una red local de alcantarillado, con un sumidero a un costado de la zona de excavación, este sumidero puede ser reemplazado por los otros sumideros ubicados en la misma vía (carrera 9) en caso de que sea afectado por la excavación.

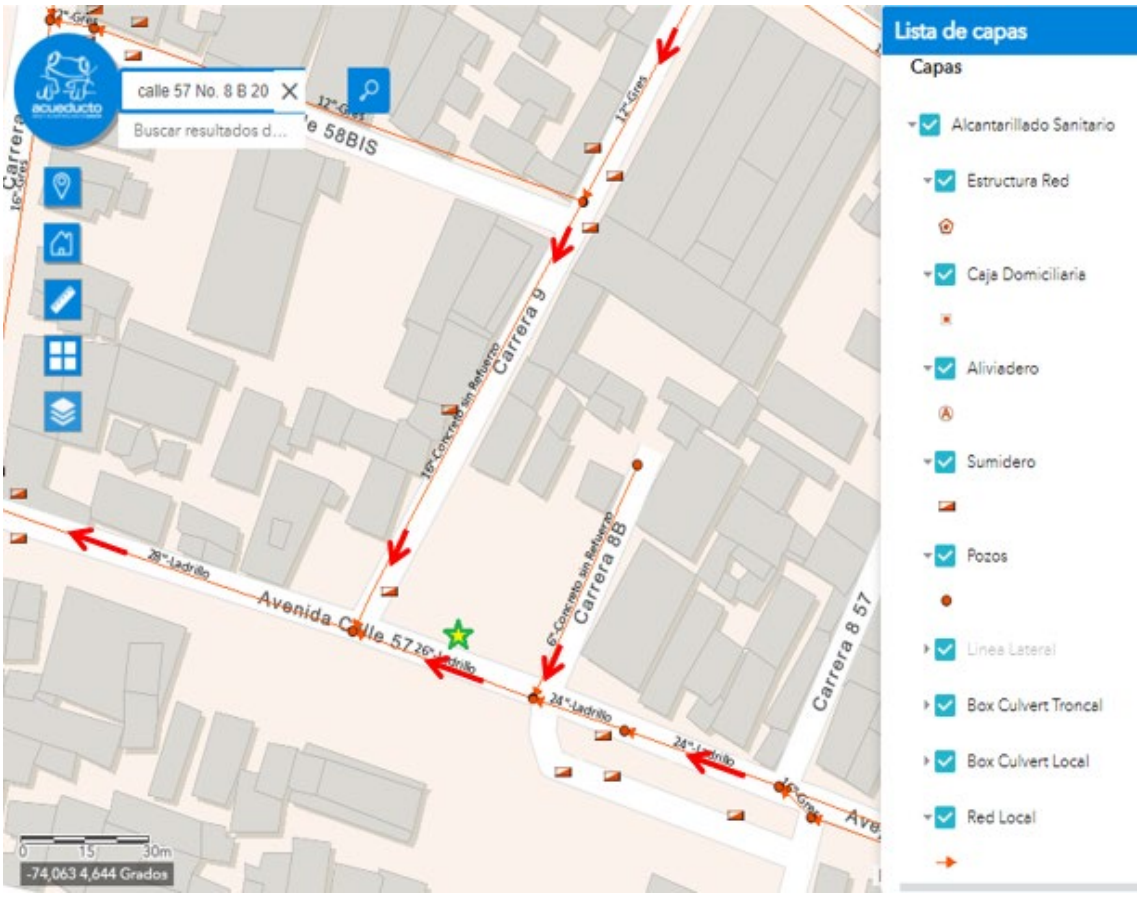


Ilustración 48. Red de alcantarillado circundante a la excavación analizada
Fuente: Adaptado de Geoportal Acueducto y Alcantarillado

7.3.4.2. Red De Acueducto

Según la Ilustración 49. Red de acueducto circundante a la excavación analizada, tomada del Geoportal de mapas de acueducto (Acueducto De Bogotá, s.f.) la zona de afectación directa, para la excavación analizada, no cuenta con redes de acueducto subterráneas. En la zona circundante a la excavación se encuentra una red menor de acueducto con sus respectivas válvulas de control en las intersecciones de los tramos.

Con lo anterior se puede evidenciar que la excavación no afecta directamente la red de servicio de agua potable de la zona circundante a la misma, y si llegará a haber una afectación de la zona aledaña a la excavación, el impacto en el servicio de agua sería para la población vecina a la excavación, sin embargo, la restitución del servicio se podría realizar mediante reconexiones a la red menor cercana.

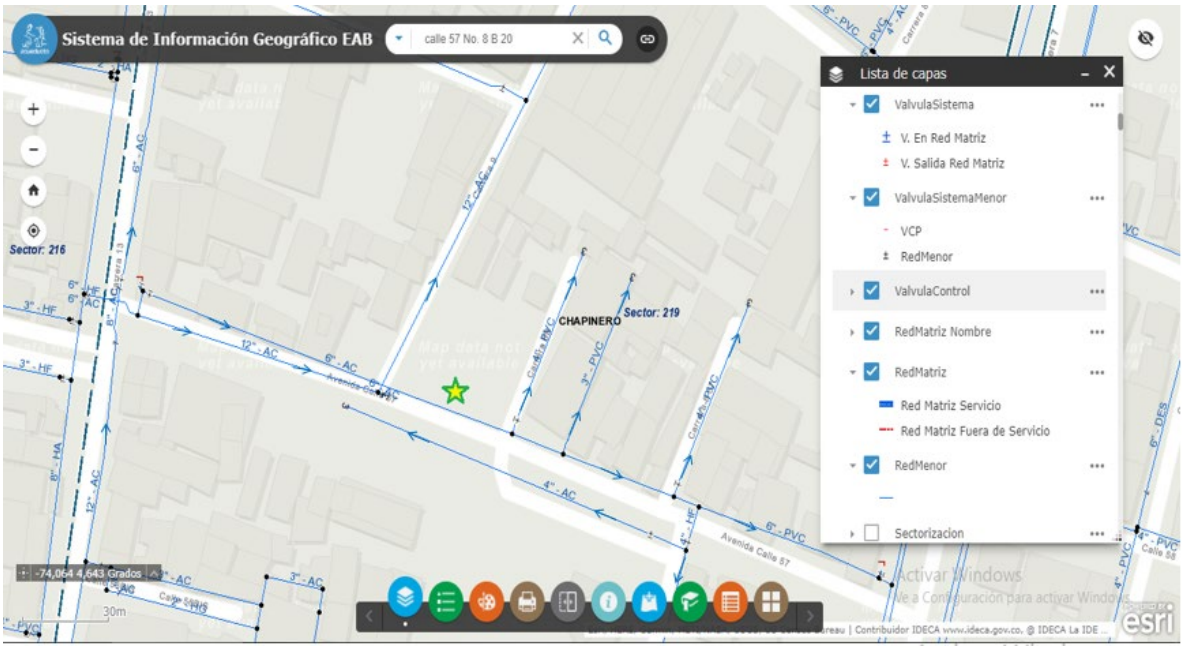


Ilustración 49. Red de acueducto circundante a la excavación analizada
Fuente: Adaptado de Geoportal Acueducto y Alcantarillado

De esta manera, se determinó que por la zona afectada directamente por la excavación no hay presencia de redes de servicio público de ningún tipo, a pesar de que en las vías circundantes si se encuentre redes secundarias o menores de los servicios analizados. Por lo anterior y según la Tabla 15. Valoración de redes de servicio en la excavación (parámetro de redundancia) la ponderación del parámetro de redundancia de redes de servicio es de 1.00.

7.3.5. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REDUNDANCIA

Una vez analizados cada uno de los parámetros de la redundancia en excavaciones, se puede solucionar la ecuación de la redundancia de acuerdo a la Ecuación 7 y la Ecuación 8 definidas anteriormente.

En la Tabla 24 se resumen las valoraciones de los parámetros de redundancia para cada instante analizado y las ponderaciones de cada parámetro según el análisis de dichos parámetros para la excavación caso del presente trabajo, se observa que para los parámetros de factor de seguridad y redes de servicios se tiene una ponderación máxima, y para los parámetros de probabilidad de falla de fondo y vías alternas se tiene una ponderación de 0.70.

Tabla 24. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de redundancia

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN		PONDERACIÓN
	Inicial	Final	
Factor de seguridad de la excavación	0.30	0.30	1.00
Probabilidad de falla de fondo en la excavación	0.30	0.20	0.70
Análisis de vías alternas	0.20	0.30	0.70
Redes de servicios	0.20	0.20	1.00

Con lo anterior se solucionan las ecuaciones de la redundancia para la excavación analizada:

$$\text{Red}\ (t_1) = 0.30(1.00) + 0.30(0.70) + 0.20(0.70) + 0.20(1.00)$$
$$\text{Red}\ (t_1) = 0.85$$

Ecuación 15. Solución de la ecuación de la redundancia en el instante 1

$$\text{Red}\ (t_2) = 0.30(1.00) + 0.20(0.70) + 0.30(0.70) + 0.20(1.00)$$
$$\text{Red}\ (t_2) = 0.85$$

Ecuación 16. Solución de la ecuación de la redundancia en el instante 2

De acuerdo al análisis numérico de la redundancia en los dos instantes propuestos, el valor de la redundancia no cambia, esto supone que la estructura tiene la misma capacidad de continuar trabajando en ambos instantes analizados.

En cuanto al valor de la redundancia, correspondiente a un 85% demuestra que la estructura tiene alta capacidad de evitar el fallo del sistema, y que se vale de elementos alternos para la sustitución de elementos con fallos producidos por algún evento disruptivo.

7.4. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE CAPACIDAD DE GESTIÓN

De acuerdo con la metodología propuesta para determinar la capacidad de gestión de la estructura evaluada, se procede a realizar el análisis de cada uno de los parámetros contemplados.

Para esta tarea se debe realizar un análisis detallado de las entidades cercanas a la zona de afectación y de las políticas existentes en la localidad. Se evidencia una sectorización, tendiente a un riesgo mayor en las periferias de la localidad como consecuencia de terrenos montañosos aledaños y de acuerdo con el análisis estadístico realizado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas se determinó que es la quinta localidad con mayor número de accidentes.

Cuenta con una ubicación central, donde se encuentran muchas entidades de carácter público, presencia de empresas privadas, centros de comercio, zonas bancarias, así como avenidas principales tales como la Avenida Caracas y la Carrera 13. Por lo anterior, la mayor parte de la población de la localidad no reside en ella, sino que transita por motivos laborales, estudiantiles o personales.

7.4.1. ANÁLISIS EXISTENCIA DE POLÍTICAS DE RIESGO EN LA ZONA CIRCUNDANTE DE LA EDIFICACIÓN

De acuerdo con la metodología propuesta para definir si existen políticas de gestión del riesgo en la zona, se realizó la consulta en el IDIGER, en el DPAE y con la Alcaldía Local, confirmando que para la localidad de Chapinero si existe un Plan Local de Gestión del Riesgo que involucra el manejo de desastres y la preparación de la localidad para la respuesta a emergencias.

Este plan define la caracterización de escenarios de riesgo por incendios forestales, movimientos en masa, accidentes de tránsito y encharcamientos e inundaciones cubriendo de esta manera los potenciales riesgos que se puedan presentar en el proyecto analizado.

Entre los principales fenómenos considerados en el documento realizado por el Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático de 2019, se consideran las amenazas por remoción en masa, pero se enfocan principalmente a construcciones en terrenos de invasión, los cuales están en sectores de amenaza alta. Como puede verse en la Figura 7.

UPZ	Amenaza alta		Amenaza media		Amenaza baja		Total zonas de amenaza	
	Área (m²)	Manzanas	Área (m²)	Manzanas	Área (m²)	Manzanas	Área (m²)	Manzanas
El Refugio	488.527	70	1.696.810	123	1.158.078	102	3.343.415	295
San Isidro Patios	443.646	69	652.042	83	1.752	2	1.097.440	154
Pardo Rubio	542.843	103	2.109.660	248	197.365	18	2.849.868	369
Chicó Lago	-	-	106.783	9	533.887	38	640.670	47
Chapinero	57.982	8	372.061	46	702.001	81	1.132.044	135
Por fuera UPZ	369.202	-	6.796.554	-	1.882.701	-	9.048.457	-
Total	**1.902.200**	**250**	**11.733.910**	**509**	**4.475.784**	**241**	**18.111.894**	**1.000**

Figura 6. Clasificación de riesgo y amenazas en las diferentes UPZ de la localidad de Chapinero
Fuente: Plan Local de Gestión del Riesgo, Localidad de Chapinero (Alcaldía mayor de Bogotá, 2019)

La Alcaldía Distrital declara a la localidad de Chapinero como vulnerable con posibilidad de la ocurrencia de fenómenos como remociones en masa conforme a lo graficado en la Ilustración 50 y por medio del Decreto 146 de 2006 (Alcaldía mayor de Bogotá, Mayo 2006) que textualmente refiere: "*Por el cual se declara la Situación de Emergencia Distrital en algunas localidades del territorio de Bogotá Distrito Capital, y se dictan otras disposiciones*" y como consecuencia se adopta el Plan de contingencia para la localidad. El cual está regido por la La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAE.

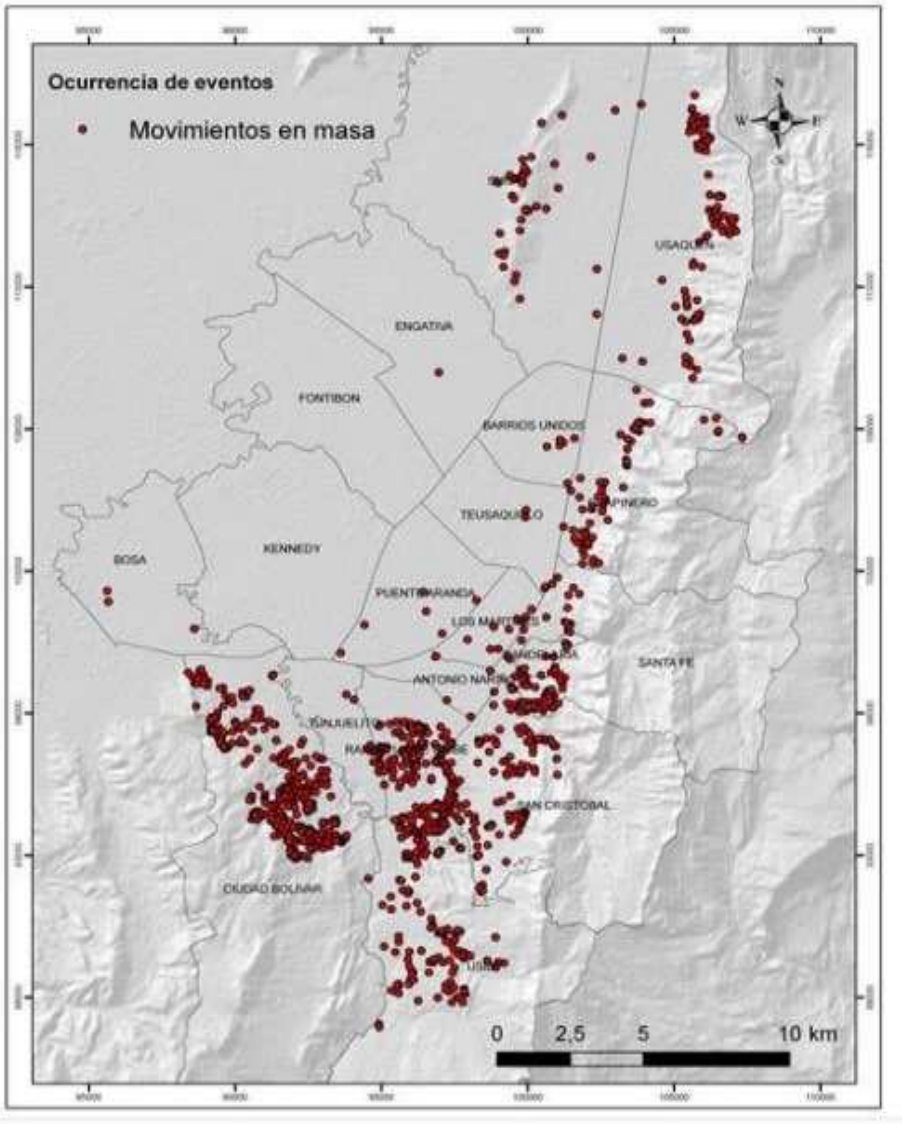


Ilustración 50. Ocurrencia de movimientos en masa en Bogotá D.C por localidades
Fuente: http://www.idiger.gov.co/rmovmasa.

Se definieron proyectos, que están regidos por la Política nacional de gestión del riesgo de desastres, como la Ley 1523 de 2012 y el Decreto Distrital 172 de 2014, cuyo objetivo principal es salvaguardar la vida de las personas que puedan encontrarse en riesgo.

En el 2017 se definió la Estrategia Distrital para la Respuesta a Emergencias, desarrollada por el Idiger en conjunto con la Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. Y dentro de la estrategia se definieron 16 servicios de respuesta básicos (Alcaldía mayor de Bogotá, 2017), en los que se especifica el procedimiento y la estructura organizacional que lo ejecuta, de esos 16 servicios que contempla, los relacionados en la Tabla 25 son de vital importancia de presentarse una eventualidad en el desarrollo de las actividades de excavación:

Tabla 25. Servicios para la atención de emergencias

SERVICIO	DESCRIPCIÓN
Salud	Proveer la atención médica pre-hospitalaria y hospitalaria, traslado médico y remisión, salud mental, apoyo psicosocial, salud pública, vigilancia epidemiológica, administración de los servicios de salud y vigilancia de alimentos y medicamentos; así como el restablecimiento de manera provisional del servicio.
Búsqueda y rescate	Detectar, ubicar y extraer personas atrapadas, extraviadas o en condición de riesgo; ubicándolas en sitios seguros, activando grupos especializados en búsqueda y rescate vertical, vehicular, acuático, en incendios, montaña, estructuras colapsadas, espacios confinados, accidentes aéreos. Incluye el rescate de animales.
Extinción de incendios	Controlar, extinguir y liquidar incendios empleando técnicas especializadas para incendios estructurales, forestales y de cobertura vegetal, en vehículos y aeronaves; así como los derivados del uso de equipos industriales y materiales peligrosos.
Manejo de materiales y/o residuos peligrosos	Detectar, identificar, caracterizar, contener, recolectar, transportar, tratar y hacer disposición final de materiales y residuos explosivos, tóxicos, corrosivos, inflamables y demás sustancias peligrosas para la salud y el ambiente; así como manejar y controlar derrames y fugas
Evacuación asistida	Dar aviso, articular y facilitar de manera asistida el retiro de personas y sus animales de compañía de zonas en riesgo o afectadas por una emergencia; definiendo rutas y métodos de evacuación, sitios de acogida y orientación del retorno cuando éste sea posible
Manejo de escombros y obras de emergencia	Identificar, recolectar, transportar y hacer la disposición final del material movilizado por fenómenos de remoción en masa, sismos, granizadas, sedimentaciones, represamiento de cauces, escombros de edificaciones, residuos vegetales, construcción y demolición. También contempla la realización de todo tipo de obras de contención, estabilización, drenaje, reforzamiento, demolición, movimiento de tierras y adecuaciones hidráulicas, restauraciones ecológicas, así como actividades de poda y tala.

Por esta razón se determina que el indicador relacionado con la existencia de las políticas de gestión del riesgo es 1.00, pues estas políticas existen y se describen los procedimientos de acuerdo al servicio requerido.

7.4.2. ANÁLISIS DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DE CONSTRUCCIÓN

El proyecto se encuentra ubicado en la calle 57 entre carreras 8B y 9A en la localidad de Chapinero, sector que en su mayoría tiene un carácter residencial y comercial, como se evidencia en la Ilustración 51.

Hacia el sur sobre la calle 57 se encuentra ubicada una edificación de 8 niveles, hacia el oriente sobre la carrera 8B se encuentran ubicadas construcciones entre 1 y 6 niveles de altura, hacia el occidente sobre la carrera 9 se encuentran estructuras entre los 2 y 5 niveles y hacia el norte colinda con unidades residenciales de tres niveles.

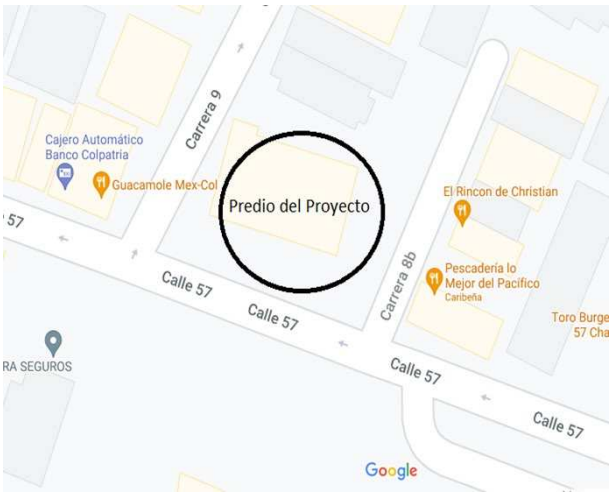


Ilustración 51. Revisión de las unidades de construcción aledañas al proyecto analizado
Fuente: Google Maps

Teniendo en cuenta lo anterior se puede establecer que en promedio las edificaciones aledañas están clasificadas en la categoría media (Entre 4 y 10 niveles) de acuerdo en lo estipulado en la tabla H.3.1-1 de la NSR 10, como se muestra en la Figura 8.

Tabla H.3.1-1
Clasificación de las unidades de construcción por categorías

Categoría de la unidad de construcción	Según los niveles de construcción	Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN)
Baja	Hasta 3 niveles	Menores de 800 kN
Media	Entre 4 y 10 niveles	Entre 801 y 4,000 kN
Alta	Entre 11 y 20 niveles	Entre 4,001 y 8,000 kN
Especial	Mayor de 20 niveles	Mayores de 8,000 kN

Figura 7.Clasificación de las unidades de construcción según la NSR-10
Fuente: Norma sismo resistente del 2010

Una vez definida la categoría de la clasificación de las unidades de construcción se establece que la valoración correspondiente asignada es de 0.30, teniendo en cuenta que únicamente se consideraron las edificaciones aledañas.

7.4.3. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE RESPUESTA DE ENTIDADES COMPETENTES

La velocidad de respuesta está definida en función de la cercanía entre las entidades competentes para prestar auxilio. La Figura 9, muestra la relación entre los servicios de respuesta y las entidades competentes para prestarlo.

Entidades Distritales Ejecutoras de la Respuesta a Emergencias	Servicios de Respuesta															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Accesibilidad y transporte	Salud	Búsqueda y rescate	Extinción de incendios	Manejo de materiales y/o residuos peligrosos	Evacuación asistida	Ayuda humanitaria	Alojamientos temporales	Agua potable	Energía y gas	Telecomunicaciones para la comunidad	Restablecimiento de contactos familiares	Saneamiento básico	Manejo de escombros y obras de emergencia	Manejo de cadáveres	Seguridad y convivencia
Secretaría Distrital de Ambiente				R	R				R				R	R		
Secretaría Distrital de Gobierno																R
Secretaría Distrital de Hábitat									R	R	R		R			
Secretaría Distrital de Integración Social							R	RP				R				
Secretaría Distrital de Movilidad	RP															
Secretaría Distrital de Salud		RP			R			R	R				R			
Secretaría Distrital de Seguridad, Convivencia y Justicia																RP
Instituto de Desarrollo Urbano	R													R		
Instituto Distrital de Protección y Bienestar Animal	R	R				R		R								
Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático			R	R		RP	RP	R		R	R	RP	R	R		R
Instituto Distrital para la Protección de la Niñez y la Juventud								R								
Instituto Distrital de Recreación y Deporte	R							R								
Jardín Botánico "José Celestino Mutis"														R		
Policía Nacional – MEBOG	R		R	R	R	R						R			R	R
Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos			RP	RP	RP	R							R	R		
Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	R		R											RP		
Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos					R			R		R			RP	R	RP	
Empresa de Acueducto de Bogotá – ESP				R				R	RP				R	R		
Grupo Energía de Bogotá										R						
Transmilenio S.A	R															
Terminal de Transporte S.A.	R															
Alcaldías locales	R				R	R		R						R		R
Alta Consejería para los Derechos de las Víctimas							R	R								
Instituciones prestadoras de salud públicas y privadas		R						R					R			

Figura 8. Participación de los ejecutores en los servicios de respuesta
Fuente: (Alcaldía mayor de Bogotá, 2017)

Como posibles servicios a requerir en caso de un eventual desastre del sistema analizado, se contemplan la preservación de la salud, búsqueda y rescate, extinción de incendios, manejo de materiales y/o residuos peligrosos, evacuación asistida y manejo de escombros y obras de emergencia. De esta manera, se tiene que el Cuerpo Oficial de Bomberos, la Policía Nacional (MEBOG), el Ejército Nacional, la Defensa Civil y la Cruz Roja Colombiana son los principales responsables de la ejecución y coordinación de los servicios anteriormente relacionados.

Con lo anterior, se observa que la responsabilidad de atender estas emergencias no recae sobre una única entidad, razón por la cual la probabilidad de una pronta atención ante emergencias aumenta.

De acuerdo a las entidades relacionadas anteriormente y su capacidad de prestar los servicios que pueden ser requeridos, se ha evaluado la cercanía con respecto al área de excavación a intervenir.

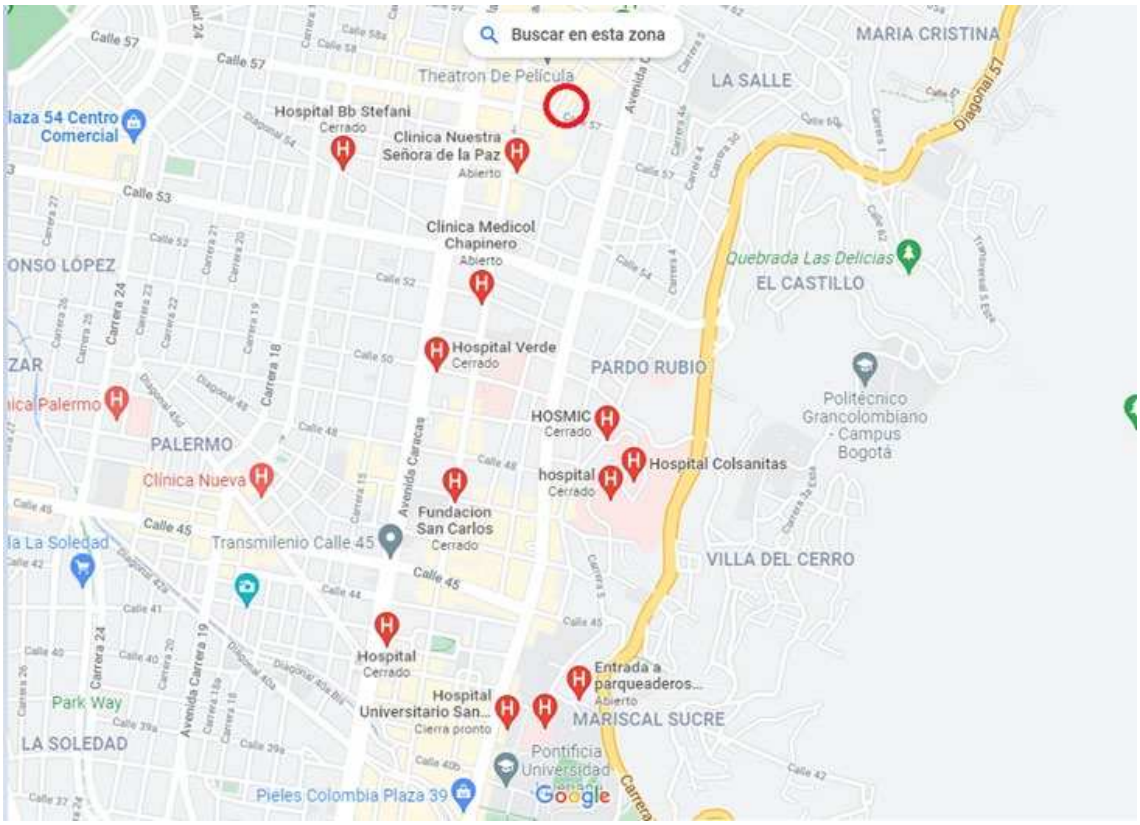


Ilustración 52. Ubicación hospitales en el área de influencia de la excavación analizada
Fuente: Google Maps

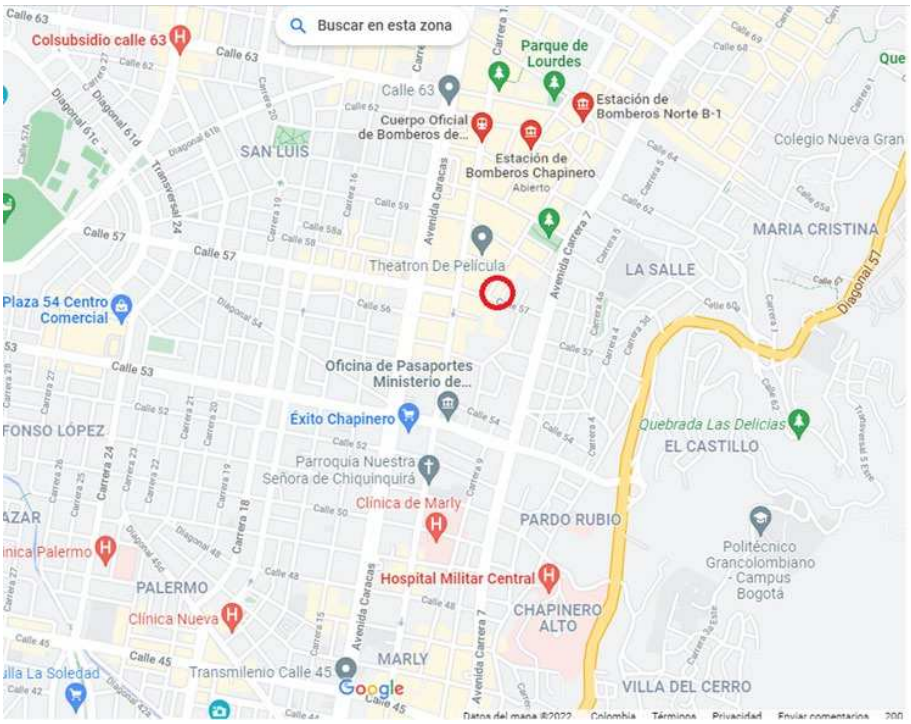


Ilustración 53. Ubicación bomberos en el área de influencia de la excavación analizada
Fuente: Google Maps

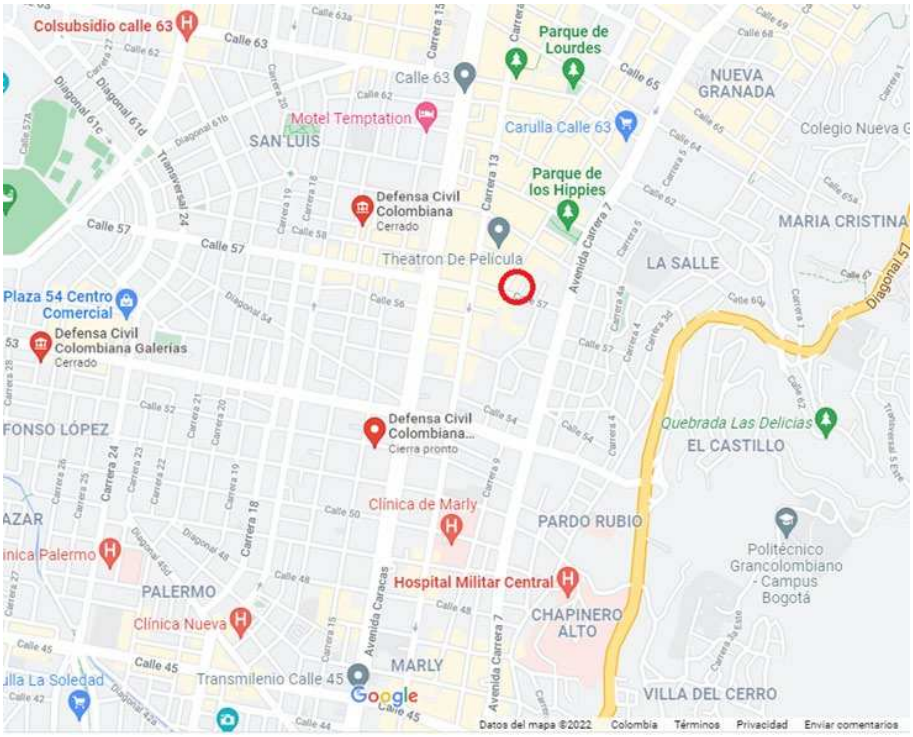


Ilustración 54. Ubicación Defensa Civil en el área de influencia de la excavación analizada
Fuente: Google Maps



Ilustración 55. Ubicación Policía Nacional en el área de influencia de la excavación analizada
Fuente: Google Maps

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta que Chapinero es una localidad central, que alberga muchas de estas entidades y que en consecuencia no se encuentran a grandes distancias se otorga una ponderación de 1.00 para este parámetro.

7.4.4. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE GESTIÓN

Para cada parámetro se realizó una evaluación específica para el caso estudiado, determinando si se cumplen con los requerimientos que definen este criterio.

En primera medida se analizaron la existencia de políticas de riesgo, donde se evidenció que existen para la localidad y que fueron decretadas en su momento por la Alcaldía Mayor de Bogotá.

También se realizó la clasificación de las edificaciones aledañas al área de excavación, y se determinó que pertenecen a una categoría de construcción media por lo que se asignó una ponderación de 3.00.

Por último, para definir la velocidad de respuesta de las entidades competentes ante una emergencia, se consultó el Marco de Actuación para la Respuesta a Emergencias de Bogotá D.C. que define las entidades a cargo de cada necesidad que pueda existir en una catástrofe,

y a partir de ello se evaluó la cercanía con respecto al área de excavación para estimar un tiempo de atención. Este parámetro cuenta con una ponderación de 1.0

En la Tabla 26, se resumen las valoraciones de los parámetros de capacidad de gestión según el análisis previamente detallado.

Tabla 26. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de la capacidad de gestión

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN		PONDERACIÓN
	Inicial	Final	
Políticas de riesgo en la zona circundante de la edificación	0.50	0.50	1.0
Clasificación de las unidades de construcción	0.20	0.10	0.3
Velocidad de respuesta de entidades competentes	0.30	0.40	1.0

Con lo anterior se solucionan las ecuaciones de la redundancia para la excavación analizada:

$$CGes\ (t_1) = 0.50(R_1) + 0.20(R_2) + 0.30(R_3)$$
$$Red\ (t_1) = 0.86$$

Ecuación 17. Solución de la ecuación de capacidad de gestión para el instante 1

$$CGes\ (t_1) = 0.50(R_1) + 0.10(R_2) + 0.40(R_3)$$
$$Red\ (t_1) = 0.93$$

Ecuación 18. Solución de la ecuación de capacidad de gestión para el instante 2

Por lo anterior, se establece que, si existe una capacidad de gestión importante en el sector, y que en caso de un evento inesperado se podrá atender eficiente y rápidamente cubriendo las necesidades de la excavación.

La cercanía de las entidades encargadas de atender las emergencias, sumado a la juiciosa planeación por parte de la Alcaldía Local son determinantes en la evaluación de este parámetro.

7.5. DETERMINACIÓN DEL CRITERIO DE RECUPERACIÓN

Siguiendo la metodología propuesta para la determinación del parámetro de recuperación en excavaciones se realiza el análisis de los factores que afectan dicho parámetro para el estudio de caso del presente trabajo (excavación para la construcción de la torre administrativa de SENA ubicado en la calle 57 No. 8 B 20 de la ciudad de Bogotá D.C.).

7.5.1. ANÁLISIS DE LAS ACTIVIDADES ECONÓMICAS EN LA ZONA DE INFLUENCIA DE LA EXCAVACIÓN

El análisis de las actividades económicas del área de influencia de la excavación analizada se realizó a través de las bases de datos de las entidades gubernamentales que analizan el aspecto socio-económico en la ciudad y a través de una revisión visual del sector a través de herramientas informáticas como Google Maps y Google Earth.

Según el perfil económico y empresarial de la localidad de Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006), donde se ubica la excavación analizada, como se muestra en la Ilustración 56, la mayoría de empresas de la localidad de Chapinero pertenecen a los siguientes sectores económicos: servicios inmobiliarios (30,2%), comercio (22,8%), finanzas (8,4%) y hoteles y restaurantes (7%).

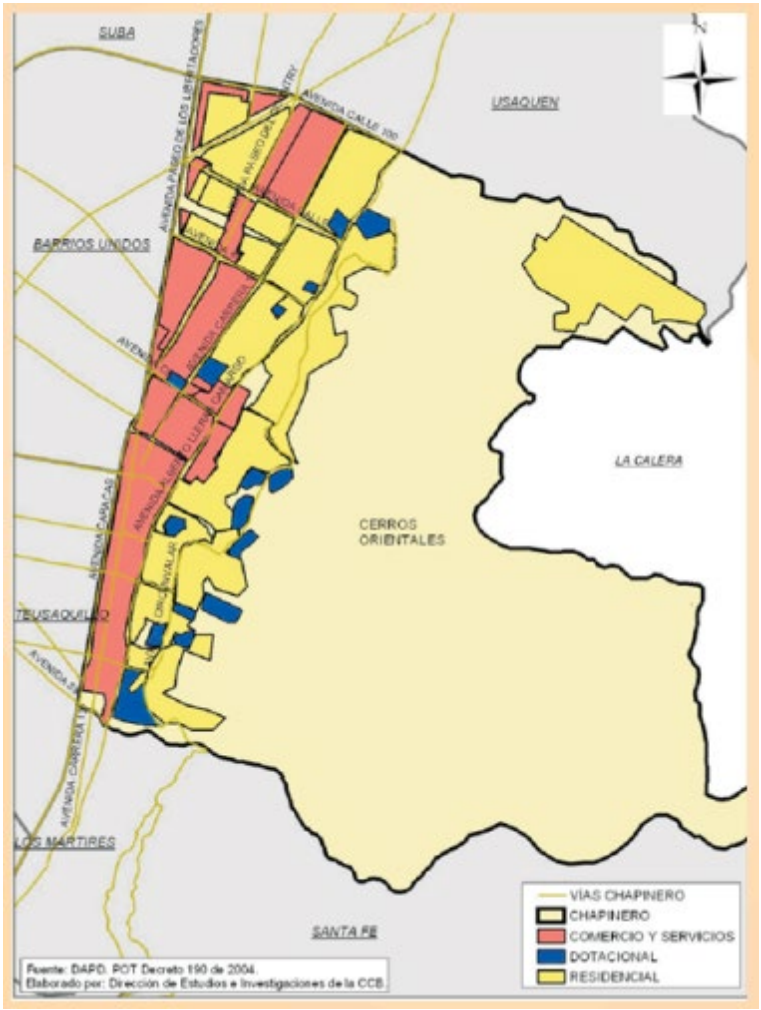


Ilustración 56. Uso de suelo de la localidad de Chapinero
Fuente: Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006)

A pesar de que no predominan actividades relacionadas con la Ingeniería Civil, existen dos zonas geográficas donde se concentra la cadena de construcción e Ingeniería Civil, de acuerdo con la Ilustración *57*: la primera zona se limita entre las calles 92 y 100, en los barrios: Chicó, Chicó Norte, Chicó Norte II y III; y la segunda zona se encuentra entre las calles 78 y 88, en los barrios: Lago Gaitán y Antiguo Country (Cámara Comercio Bogotá, 2006).

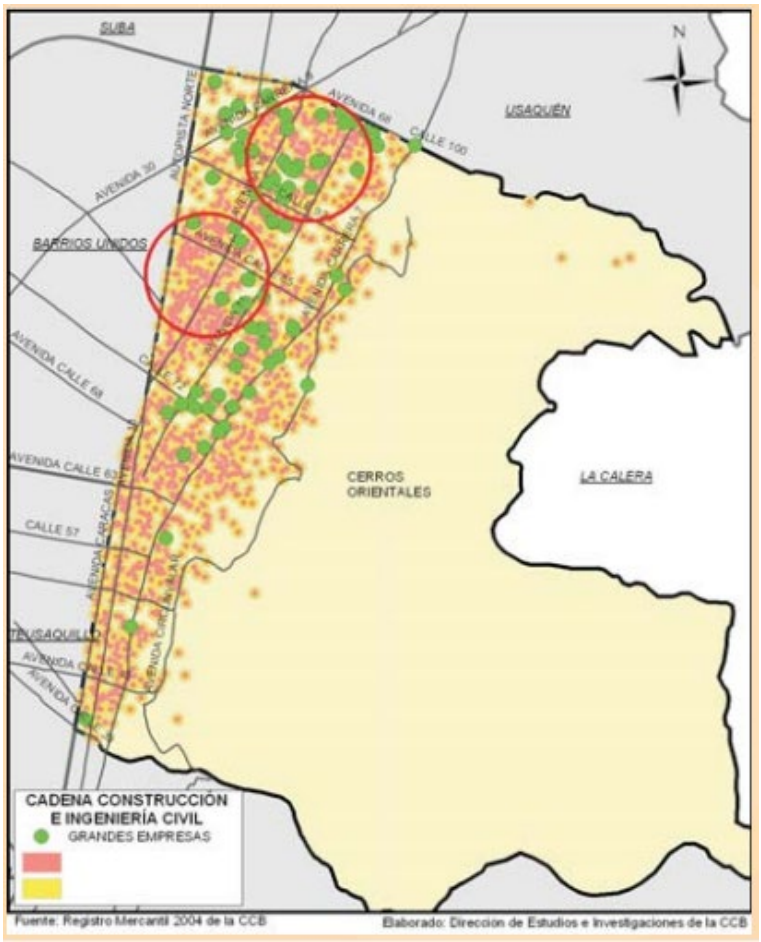


Ilustración 57. Ubicación de las empresas de la cadena de construcción e Ingeniería Civil en la localidad de Chapinero
Fuente: Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006)

Los anteriores datos se pueden verificar visualmente en herramientas informáticas como Google Maps, donde no se evidencia la presencia de empresas o establecimientos relacionados con la Ingeniería Civil dentro del área de influencia de la excavación, como puede verse en la Ilustración *58*.

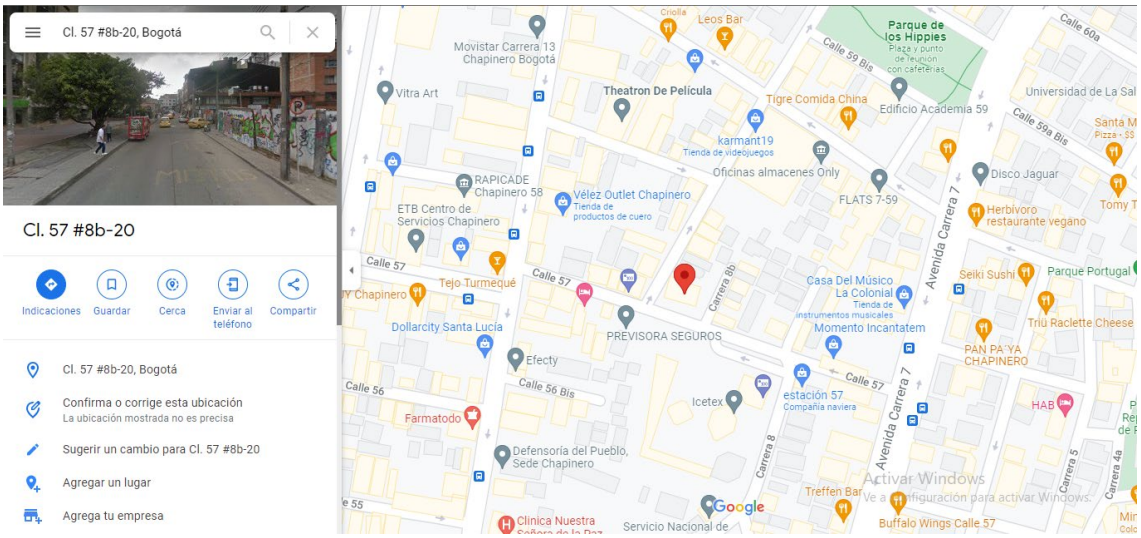


Ilustración 58. Establecimientos económicos en el área de influencia de la excavación analizada
Fuente: Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006)

De esta manera se observa que en la localidad se encuentran empresas donde se puede proveer de insumos que puedan utilizarse para la recuperación de la excavación en caso de un evento disruptivo, sin embargo, a pesar de que se encuentran en la localidad no se encuentran en la zona de influencia de la excavación, por ello, para la ponderación de las actividades económicas en la zona de influencia de la excavación es de 0.50.

7.5.2. ANÁLISIS DEL IMPACTO SOCIAL

El impacto social de la excavación analizada, de acuerdo a la metodología propuesta para el análisis de impacto social se puede realizar de forma similar a las actividades económicas de la zona de influencia de la excavación.

Dentro de la zona e influencia se observó la presencia de los siguientes sectores económicos, de acuerdo con el perfil económico y empresarial de la localidad de Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006):

- La zona comprendida entre las calles 57 y 68, en los barrios Chapinero Central y Chapinero Norte, se encuentra vinculada a la cadena de productos alimenticios, donde hay presencia de empresas como: Industria Agraria la Palma S A, Cultivos y Servicios Ltda y Cía. SCA, Nestlé de Colombia S A, Cicolac Ltda, Arroz Diana, Frito Lay Colombia Ltda, Cuama S A, Agroindustriales del Tolima S A, entre otros, las cuales se dedican principalmente a la fabricación y comercialización de productos alimenticios, como puede verse en la Ilustración 59.

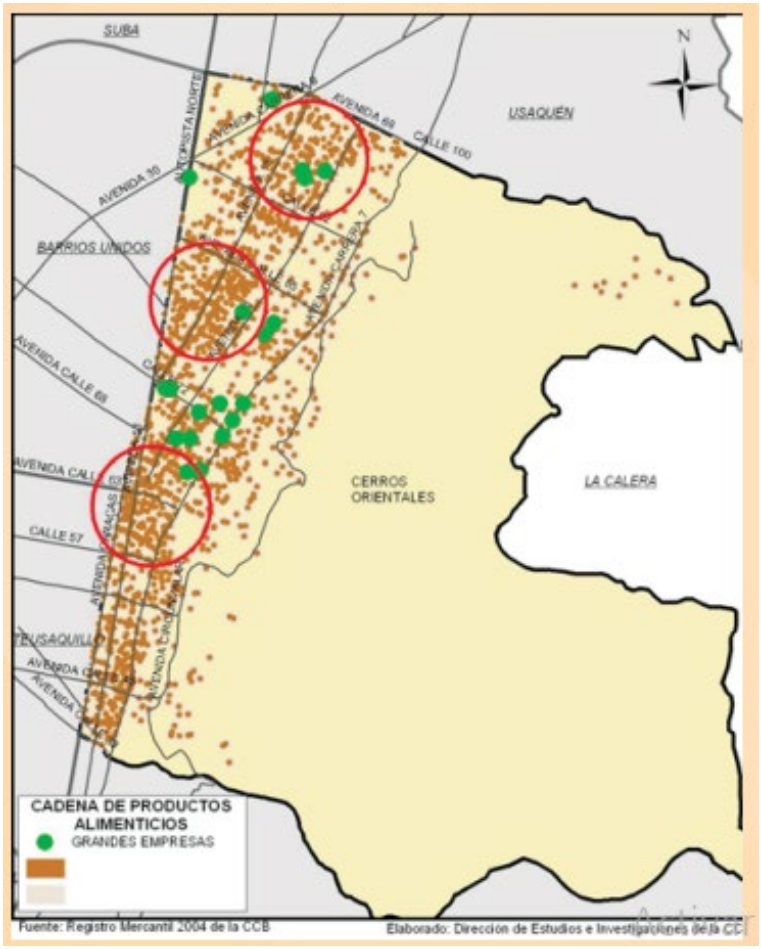


Ilustración 59. Ubicación de las empresas de la cadena de productos alimenticios en la localidad de Chapinero

Fuente: Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006)

- Entre las calles 53 y 65, en los barrios Chapinero Central y Chapinero Norte, se encuentra concentrada la zona más grande de empresas vinculadas a la cadena textil, de acuerdo con lo proyectado en la Ilustración *60*, donde se encuentran empresas como Paños Atlas S A, Saraluz Ltda, Jean Pascal Ltda, Word Fashion S A, Athletic Sport Inc Ltda, Executive S.A.

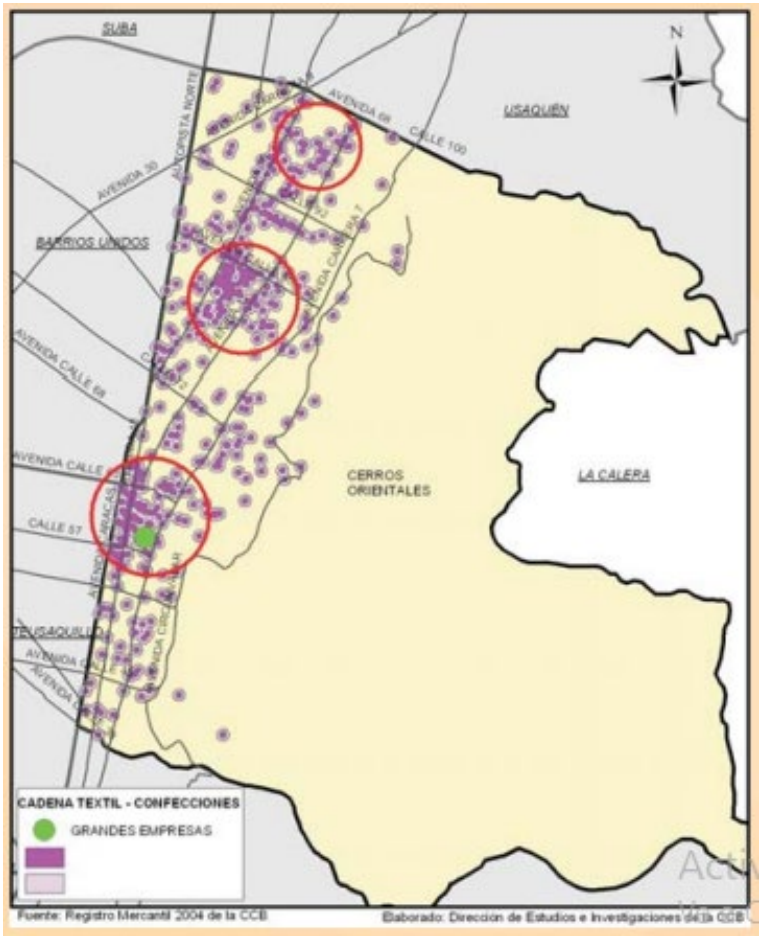


Ilustración 60. Ubicación de las empresas de la cadena textil en la localidad de Chapinero
Fuente: Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero (Cámara Comercio Bogotá, 2006)

De esta manera se observa que dentro del área de influencia se desarrollan actividades económicas importantes para la localidad, con variedad de empresas reconocidas en sus respectivos sectores económicos. Así, se le da una valoración de 1.00 en el parámetro de impacto social para la recuperación de la excavación analizada.

7.5.3. ANÁLISIS DE LA ECUACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN

De acuerdo a la revisión de caso de cada uno de los parámetros propuestos para el criterio de recuperación de la excavación analizada, se pueden solucionar las ecuaciones propuestas para dicho criterio.

En la Tabla 27 se resumen las valoraciones de los parámetros de recuperación para cada instante analizado y las ponderaciones de cada parámetro según el análisis de dichos parámetros para la excavación caso del presente trabajo.

Tabla 27. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros para el análisis de recuperación del sistema de excavación

DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN		PONDERACIÓN
	Inicial	Final	
Actividades económicas en la zona de influencia de la excavación	0.30	0.50	0.50
Impacto social	0.70	0.50	1.00

Con lo anterior se solucionan las ecuaciones de la recuperación para la excavación analizada:

$$\text{Rec}\ (t_1) = 0.30(0.50) + 0.70(1.00)$$
$$\text{Red}\ (t_1) =$$

Ecuación 19. Solución de la ecuación de la recuperación en el instante 1

$$\text{Rec}\ (t_2) = 0.50(R_1) + 0.50(R_2)$$
$$\text{Red}\ (t_2) = 0.75$$

Ecuación 20. Solución de la ecuación de la recuperación en el instante 2

En general, un valor de capacidad de recuperación de más de 70% demuestra que existen factores que permiten la rápida reconstrucción de la excavación analizada, debido a que se encuentran insumos cercanos al área de influencia y el impacto socio-económico es importante y requiere que su posible afectación (debido a un evento disruptivo en la obra analizada) se corregida en el menor tiempo posible.

8. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA PARA EL CASO DE ESTUDIO

8.1. GENERALIDADES

Por medio del índice de resiliencia se puede identificar si un sistema es capaz de recuperarse después de que ha sufrido un evento disruptivo. Para ello se determinan dos tiempos de análisis los cuales están separados por la ocurrencia del evento; es decir, que se evalúa la estructura antes y después de dicho evento.

El índice será entonces el cociente entre la resiliencia evaluada posterior a que el suceso ha ocurrido y la resiliencia en el momento previo. El valor obtenido de esta relación se ubicará entre 0 y 1 donde cero indica que el sistema no es resiliente y valores mayores a este indicarán que presenta un grado de resiliencia proporcional al valor, siendo 1 el valor máximo de resiliencia establecido.

A su vez, la resiliencia se determina a partir de la evaluación de cuatro criterios (robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación) que aportan en diferentes proporciones a la evaluación de resiliencia de un sistema y que deben ser evaluados detalladamente.

La definición de los criterios de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación se obtienen por medio de diferentes metodologías como inspecciones realizadas en sitio de la estructura, revisión bibliográfica e interpretación de las distintas modelaciones a partir de las cuales es posible estimar de manera acertada valores que reflejan el grado de resiliencia de la excavación objeto de estudio.

8.2. ESTIMACIÓN ÍNDICE DE RESILIENCIA

Con el fin de definir el grado de resiliencia en un sistema se evalúan dos periodos de tiempo, para los cuales los criterios de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación tienen valoraciones distintas de acuerdo al periodo de tiempo evaluado, toda vez que antes del evento disruptivo los parámetros de robustez y redundancia cobran mayor relevancia al momento de evaluar la resiliencia, teniendo en cuenta que estos dos parámetros serán los encargados de asumir y contrarrestar los efectos negativos que el evento disruptivo pueda generar en el sistema; mientras que en el tiempo posterior al evento disruptivo son los parámetros de capacidad de gestión y recuperación los encargados de atender las afectaciones de manera pronta y eficiente, siendo de esta manera los parámetros protagonistas posteriores al evento disruptivo.

Una vez se han definido los parámetros de resiliencia, se puede realizar el reemplazo en las ecuaciones establecidas. A continuación, se relacionan las ecuaciones de resiliencia para los dos periodos de tiempo:

$$Res\ (t_1) = 0.35(Rob) + 0.35(Red) + 0.20(CGes) + 0.10(Rec)$$

Ecuación 21. Ecuación de resiliencia en el instante 1 (Previo al evento disruptivo)

$$Res\ (t_2) = 0.15(Rob) + 0.20(Red) + 0.30(CGes) + 0.35(Rec)$$

Ecuación 22. Ecuación de resiliencia en el instante 2 (Posterior al evento disruptivo)

La Tabla 28 relaciona las ponderaciones obtenidas para el parámetro permitiendo un análisis completo del estudio de caso y una fácil visualización de las fallas que se generaron:

Tabla 28. Resumen de valoración y ponderaciones de los parámetros de resiliencia

DESCRIPCIÓN	INICIAL		FINAL	
	Valoración	Ponderación	Valoración	Ponderación
Robustez	0.35	0.20	0.15	0.40
Redundancia	0.35	0.85	0.20	0.85
Capacidad de Gestión	0.20	0.86	0.30	0.93
Recuperación	0.10	0.65	0.35	0.85

Mediante el siguiente gráfico es posible evidenciar la valoración de los criterios de resiliencia en los dos tiempos analizados, los cuales están supeditados a la ponderación asignada.

Se observa que los criterios de capacidad de gestión y recuperación, a pesar de tener valoraciones similares en ambos tiempos, presentan un mayor aporte en la estimación de la resiliencia en el tiempo 2, debido a que una vez se presenta el evento disruptivo cobran más importancia.

De igual forma, la robustez y la redundancia tienen una ponderación mayor en el tiempo 1 teniendo en cuenta que se estimó un mayor factor en este tiempo inicial, toda vez que son los parámetros que por sus características intrínsecas generan un mayor aporte en la estimación de la resiliencia. Sin embargo, en ambos tiempos la robustez no presenta un aporte significativo teniendo en cuenta que la excavación se vio afectada por las características hidráulicas adversas que perjudicaron la estabilidad de la misma.

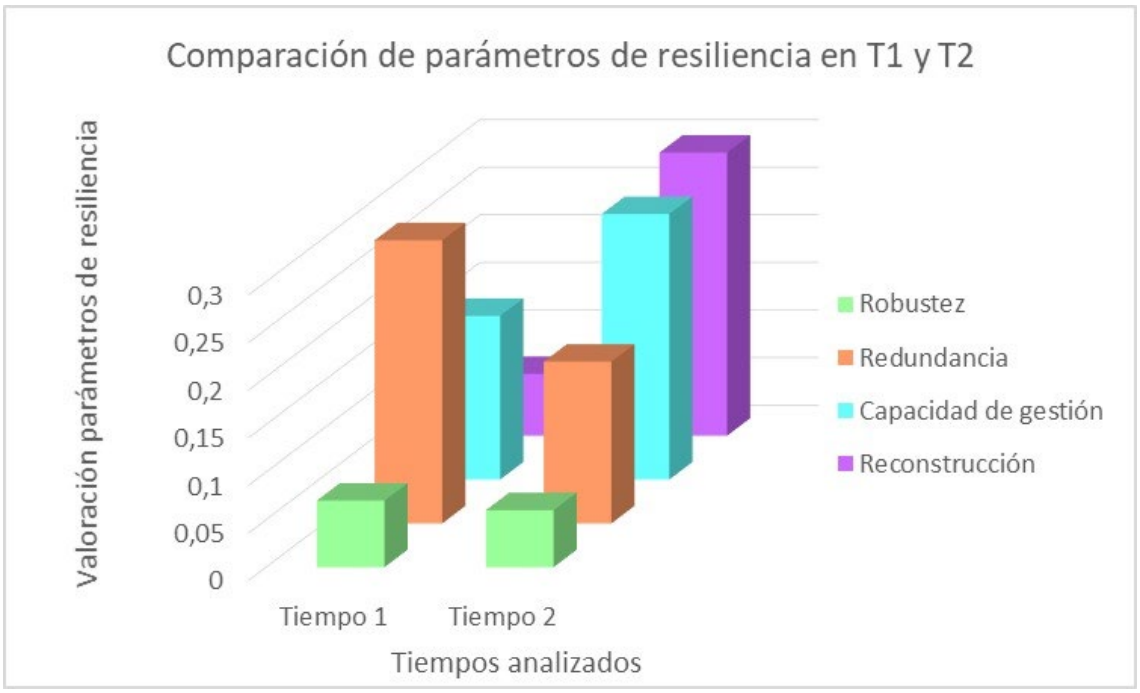


Ilustración 61. Comparación de los parámetros de resiliencia para el caso analizado en cada tiempo referenciado
Fuente: Propia

Una vez definidos los valores y ponderaciones para cada uno de los parámetros que afectan la resiliencia del sistema, como se evidencia en la Ilustración *61*, se procede entonces a realizar la evaluación de la resiliencia en cada tiempo referenciado (tiempo inicial antes del evento y tiempo final luego del evento), de acuerdo a las ecuaciones Ecuación 21 y la Ecuación 22 establecidas para este fin, de la siguiente manera:

$$Res\ (t_1) = 0.35(0.2) + 0.35(0.85) + 0.20(0.86) + 0.10(0.65)$$
$$Res\ (t_1) = 0.6$$

Ecuación 23. Solución de la ecuación de resiliencia en el instante 1

$$Res\ (t_2) = 0.15(0.4) + 0.20(0.85) + 0.30(0.93) + 0.35(0.85)$$
$$Res\ (t_2) = 0.8$$

Ecuación 24. Solución de la ecuación de resiliencia en el instante 2

Establecidos los valores de resiliencia $Res\ (t_1)$ y $Res\ (t_2)$ y reemplazando en la ecuación 2, se obtiene el índice de resiliencia del sistema.

Reemplazando los valores obtenidos en el instante de tiempo 1 (Previo al evento) y en el instante de tiempo 2 (Posterior al evento) se tiene:

$$IR = \frac{0.6}{0.8} = 0.75$$

Ecuación 25. Solución de la ecuación del índice de resiliencia

8.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.3.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETRO DE ROBUSTEZ

De acuerdo a los resultados para el parámetro de robustez en el tiempo 1, se presenta un bajo aporte para la resiliencia del caso analizado, esto puede estar relacionado a las contradicciones presentadas entre los diseños y recomendaciones del especialista con las actuaciones del contratista durante la cronología de obra del proyecto analizado.

En las condiciones iniciales del sistema de excavación analizado se evidenció penetración del nivel freático de la obra, separación de los muros pantalla entre otras condiciones inseguras que afectan la presencia del parámetro de robustez. Igualmente, los desplazamientos verticales y horizontales representan un riesgo debido a que la estructura no garantiza estabilidad después de ocurrido un evento disruptivo.

Estos resultados evidencian que la estructura actual requiere de mejoras para que aumente la robustez y en consecuencia la robustez de la misma.

8.3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETRO DE REDUNDANCIA

En general, a pesar de la poca robustez el caso analizado cuenta con un alto nivel de redundancia, lo que permite un mejor comportamiento ante un evento disruptivo, ya que hay variedad de elementos que pueden resistir las afectaciones y evitar la pérdida de funcionalidad del sistema.

En algunos escenarios propuestos para el análisis para criterios de redundancia como el factor de seguridad por falla de fondo de la excavación, se observan condiciones críticas en las cuales no se asegura la estabilidad o funcionalidad del sistema, esto esta relacionado con la baja robustez del caso analizado debido a las deficiencias constructivas en el proyecto.

La zona en la que se encuentra la estructura analizada presenta vías alternas, que evitan el colapso de las actividades normales de la zona donde se ubica el sistema de excavación.

8.3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETRO DE CAPACIDAD DE GESTIÓN

La ubicación del caso analizado es favorable para este parámetro, ya que en la ciudad de Bogotá los planes de gestión de riesgo son más estudiados y son priorizados para evitar la presencia de siniestros ante un evento disruptivo.

Además, es de gran importancia la zona en la ciudad porque allí se encuentran en funcionamiento zonas industriales, de construcción y en general, es un punto de aporte socio-económico a la ciudad. También se encontró que hay facilidad en la implementación de los

planes de gestión del riesgo porque las entidades de atención a desastres están cercanas a la zona y son de rápida acción para la ejecución de sus labores.

Este parámetro es el que más aporta al índice de resiliencia en los dos instantes de tiempo analizados, 0.86 y 0.93 para el tiempo inicial y final, respectivamente.

8.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARÁMETRO DE RECUPERACIÓN

Similar al parámetro de Capacidad de Gestión, la ubicación y caracterización de la zona en que se ubica el caso analizado son de gran aporte para garantizar la recuperación del sistema de excavación.

Relacionando las condiciones de redundancia analizadas (relacionadas a las vías alternas y al comercio de la zona) con la recuperación del sistema se identifica que hay existencia de comercio relacionado con la construcción que pueda contribuir con la recuperación del sistema en caso de que lo requiera.

8.3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ÍNDICE DE RESILIENCIA

En términos generales se puede establecer que el sistema presenta buenas características de resiliencia en ambos tiempos analizados, sobre todo en el tiempo 2, tras un evento disruptivo, de acuerdo a los resultados de ponderaciones y valoraciones, ya que el valor de 0.8 es un indicador claro y satisfactorio de cumplimiento de las condiciones evaluadas.

Tras la evaluación de los parámetros de resiliencia en los tiempos t1 y t2 y obteniéndose un índice de resiliencia de 0.75, se evidencia que el sistema presenta buenas características generales ante la amenaza de un evento disruptivo, debido a las condiciones favorables evaluadas en cada uno de los parámetros implícitos en la determinación de esta.

A pesar de las bajas aportaciones de la robustez del sistema analizado los otros tres factores (redundancia, capacidad de gestión y recuperación) permiten compensar la valoración del índice de resiliencia, ya que estos tres últimos tienen aportaciones mayores al 80% en los dos instantes de tiempo analizados. Sin embargo, teniendo un enfoque de estabilidad y funcionalidad del sistema si se evidencia que hay deficiencias en la estructura y que deben ser corregidas, sobre todo si se espera realizar una construcción sobre la excavación.

Este valor de índice de resiliencia calculado, brinda un indicador satisfactorio y sobresaliente en este tipo de sistemas teniendo en cuenta que en el rango de evaluación entre 0 y 1 se encuentra sobre la media. Sin embargo, se pueden generar mejoras que puedan aportar a las valoraciones de algunos parámetros y con ello brindar una mayor seguridad y resiliencia a la excavación analizada.

Siguiendo la cronología del sistema analizado, se evidencia que hubo imperfectos durante la ejecución del proyecto, con respecto a los diseños realizados por el especialista, esto debió incidir en las características de robustez del sistema, ya que en ambos instantes analizados se encontraron deficiencias en la integridad de la excavación, que afectaron las valoraciones de dicho parámetro.

A pesar de que el caso analizado se encuentra en una zona central de la ciudad, el impacto de la excavación no genera retrasos en la comunidad, se tiene alta capacidad de redundancia y es relativamente fácil mantener el funcionamiento de la zona a pesar de un evento disruptivo.

La importancia de la zona donde se encuentra la excavación permite ser el centro de atención de estudios, planes y gestiones administrativas con el fin de mantener funcional la comunidad que habita allí, esto permite tener facilidades en la recuperación del sistema, que se evidencia en las valoraciones de los parámetros de capacidad de gestión y recuperación en el tiempo dos.

Relacionando los resultados del presente trabajo con algunos similares, enfocados al análisis del índice de resiliencia en estructuras específicas, tenemos que:

Por un lado, se evaluó la resiliencia para excavaciones sin zanja, más conocidas como excavaciones Trenchless (Gómez y Benítez, 2021), en donde se encontró que este tipo de estructuras presenta una alta capacidad resiliente, obteniendo de allí un índice de resiliencia de 96%. En esa investigación se evidenció una recuperación casi total al estado inicial en el cual se encontraba el sistema a pesar de no ser una recuperación rápida. Comparando (Gómez y Benítez, 2021) con el presente trabajo se observa que la robustez es baja en ambos casos, así como la capacidad de gestión y recuperación es alta en ambos casos. Sin embargo, la relación entre los dos trabajos no se puede hacer directamente porque se analizan diferentes parámetros para sistemas diferentes.

Por otro lado, (Rincón y Bonilla, 2021), definieron la resiliencia para tres estructuras de contención, que compartían el sector de desarrollo y se ubicaban en la vía Sibaté – Fusagasugá. A partir de esta investigación, se dedujo la importancia de la zona de desarrollo, pues los muros de contención que presentaban más cercanía entre sí, obtuvieron índices de resiliencia similares. Estos factores son analizados por medio de los parámetros de capacidad de gestión y recuperación, que evalúan la cercanía de las entidades de socorro respecto al sistema y las condiciones socio-económicas que repercuten en la rapidez con que el sistema logra reestablecerse. En (Rincón y Bonilla, 2021) se obtuvieron resultados de 0.766, 0.742 y 0.823 que son similares al obtenido en el presente trabajo, aunque vale la pena mencionar que los parámetros analizados son diferentes a los tratados para una excavación.

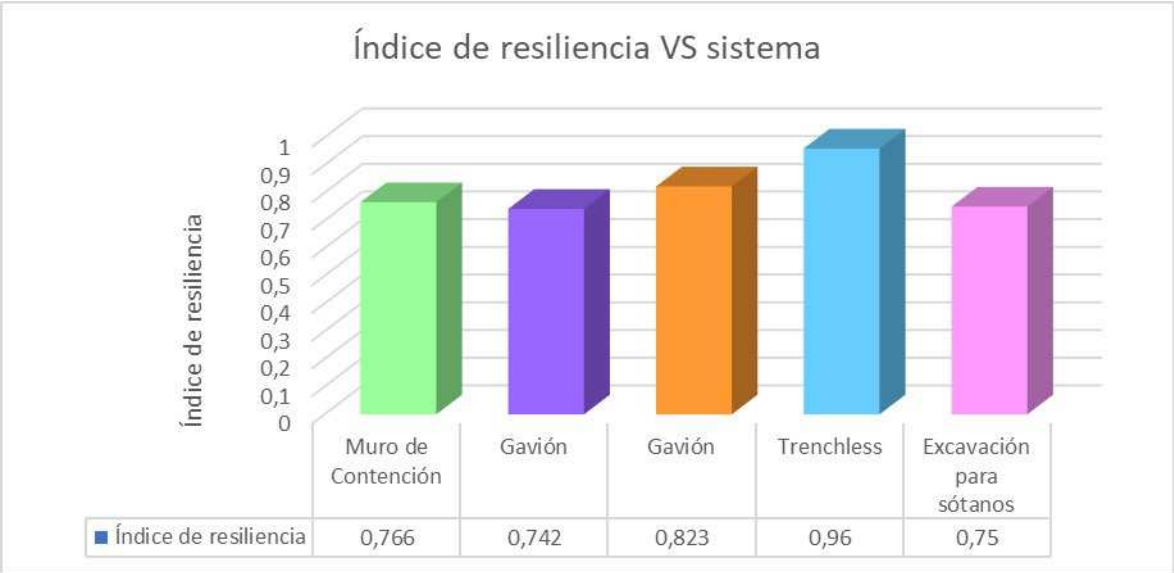


Ilustración 62. Comparación del índice de resiliencia entre diferentes tipos de sistemas
Fuente: Propia

En la Ilustración 62, se muestran los resultados de índice de resiliencia para diferentes sistemas (excavaciones, muros de contención, entorno urbano) a pesar de que la comparación de estos resultados sea dificultosa debido a los diferentes criterios evaluados para identificar este índice en cada caso de estudio.

Por lo anterior, se evidencia que el análisis de resiliencia de un tipo de sistema (estructuras de contención, sistemas de excavaciones, entorno urbano, etc.) es único, y que no es fácil generar una comparación con un tipo de sistema diferente.

Si bien, la metodología de análisis para determinar el índice de resiliencia en la Ingeniería Civil para cualquier sistema es la misma, revisión de parámetros de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación, sin embargo, los criterios que hacen parte de cada parámetro son diferentes para cada tipo de sistema.

A pesar de ello, la base metodológica realizada para un tipo de sistema puede ser utilizada para diferentes casos que sean similares.

9. CONCLUSIONES

Se evidenció que es posible establecer el grado de resiliencia que presenta un sistema empleando una metodología de estimación cualitativa y cuantitativa de cada uno de los parámetros intervinientes. Al realizar una evaluación integral de los parámetros de robustez, redundancia, capacidad de gestión y recuperación; así mismo estableciendo una relación entre estos por medio de valoraciones y ponderaciones, es posible obtener datos e indicadores que reflejan la realidad del sistema en un grado aceptable y ajustado a las condiciones del proyecto y su entorno.

La determinación de la resiliencia de un sistema, evaluando detalladamente cada una de las etapas llevadas a cabo para su concepción, juega un papel fundamental en el planteamiento de cualquier tipo de proyecto, teniendo en cuenta que una vez definido este es posible determinar metodologías en términos de seguridad y generación de planes de trabajo eficientes.

La ejecución de un proyecto no se debe restringir a la evaluación de características contempladas dentro del límite físico de intervención, sino que se deben identificar y evaluar las condiciones técnicas, sociales, económicas, culturales y físicas del entorno que pueda llegar a verse afectado o influenciado por la ejecución de la actividad constructiva, garantizando de esta manera el desarrollo integral de todos y cada uno de los actores activos y pasivos intervinientes durante la etapa de ejecución del proyecto e inclusive posterior a la finalización de esta.

El índice de resiliencia representa la capacidad de un sistema de recuperarse, un resultado igual 1 indica que el entorno se recupera totalmente alcanzando el estado inicial antes del evento disruptivo. Para el índice calculado se obtuvo un valor de 0.75, lo que indica una capacidad de resiliencia moderada, indicando que el sistema tiene falencias en algunos aspectos y puede que su recuperación no sea rápida en el tiempo.

Se observa que todos los parámetros de resiliencia son importantes en el análisis de índice de resiliencia, en este caso se obtuvo altas valoraciones en la redundancia, capacidad de gestión y recuperación del sistema, sin embargo, la robustez era un parámetro con una deficiencia clarificada (ponderación menor al 50% en ambos instantes) lo que bajaba en gran medida la resiliencia en cada instante y con ello el índice de resiliencia final de la estructura.

Las falencias importantes identificadas, en el presente estudio de caso, son consecuencia de las variaciones al proceso constructivo del sistema de excavación, que según la investigación realizada no cumplió con las recomendaciones de los diseñadores especialistas. El proceso constructivo de una excavación es de vital importancia en un sistema de excavación ya que asegura mantener la estabilidad del suelo afectado.

El área de influencia del sistema de excavación tiene una gran participación dentro del análisis de resiliencia para excavaciones, ya que aportan en gran medida en parámetros de redundancia con la existencia de vías alternas, la capacidad de gestión con la organización de planes y políticas de gestión de riesgo y en la recuperación en el impacto socio-económico de la zona.

Las ecuaciones propuestas para la evaluación de los componentes de la resiliencia en los instantes de tiempo, así como las ecuaciones particulares para cada uno de estos componentes (incluyendo su valoración y ponderación) se encuentran basados en la revisión bibliográfica realizada por los autores, identificando características importantes en los sistemas de excavación para sótanos.

10. RECOMENDACIONES

Para la evaluación general del índice de resiliencia en estructuras específicas es importante tener una investigación minuciosa de la misma, ya que cualquier elemento que la componga puede generar aportes en las valoraciones de los parámetros que afectan la resiliencia.

El tener claro una cronología de construcción, para el caso de una estructura ya existente, es muy importante ya que se pueden distinguir acciones y situaciones, que, a pesar de ser corregidas en su momento, puedan incidir en la robustez o redundancia de un sistema. Para lo anterior es preferible contar con la concepción completa y detallada del proyecto, desde los diseños detallados del mismo hasta los eventos presentados día a día en la zona de construcción (en caso de que el proyecto ya esté en marcha), tener amplia visión de las etapas de proyecto permite considerar cualquier aspecto que afecte los parámetros de resiliencia en excavaciones.

Es aconsejable analizar la metodología propuesta en el presente trabajo en varias estructuras, con el fin de tener posibilidad de comparar resultados y de esta manera poder clarificar que condiciones del sistema puedan ser más significativas en el análisis de la resiliencia y de esta manera identificar qué aspectos son los que se deben priorizar en un sistema de excavaciones.

En general la revisión bibliográfica aporta en la construcción de un caso con certeza, se recomienda no solamente centrarse en el aspecto ingenieril, ya que los aspectos sociales, económicos y gubernamentales aportan a la determinación del índice de resiliencia y los parámetros que la componen.

En futuras aplicaciones se puede hacer una investigación más detallada, con las entidades pertinentes, acerca de la investigación de los planes de gestión de riesgos, con el fin de verificar la efectividad de los mismo y con ello mejorar los análisis del parámetro de capacidad de gestión. Se pueden analizar además los protocolos y procesos de gestión de riesgo aplicables al evento disruptivo analizado.

La determinación del índice de resiliencia puede ser complementado con propuestas a planes de mejoramiento de las estructuras analizadas, revisando las evaluaciones en cada aspecto y proponiendo mejoras en las condiciones de una estructura.

Los parámetros de redundancia pueden ser complementados analizando de manera más detallada las condiciones, materiales y características de las vías alternas y de las redes de servicio de la zona de influencia de la excavación.

Para los parámetros de redundancia y robustez, en próximos trabajos, se pueden analizar más tipos de fallas comunes en excavaciones para sótanos con el fin de abordar más escenarios de riesgos respecto al sistema de excavación.

REFERENCIAS

Acueducto De Bogotá. (s.f.). *Mapas Acueducto Y Alcantarillado*. Obtenido de Geoportal Acueducto Bogotá. https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la%20infraestructura%20de%20alcantarillado/mapasAlcantarillado/!ut/p/z0/fYyxCsIwFEV_pUvnl4oGHYtgQbDSrc1SHmksqTFpkxfRvzfqKDjecw4XBLQgLN71iKSdRZN2J3jPmz0rtmxVV4fTjjW8bM6bdV0xXsARxP

Alcaldía de Bogotá. (s.f.). *Decreto 523 de 2010. Por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C.* https://www.scg.org.co/wp-content/uploads/DECRETO-523-DE-2010-MICROZONIFICACION-BOGOTA.pdf

Alcaldía mayor de Bogotá. (2017). *Estrategia distrital para la respuesta de emergencias.* Bogotá: Sistema Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático.

Alcaldía mayor de Bogotá. (2019). *Plan local de gestión de riesgo, Localidad de Chapinero.* Bogotá: Consejo Local de Gestión del Riesgo y Cambio Climático.

Alcaldía mayor de Bogotá. (Mayo 2006). *Decreto 146.* Bogotá: Registro Distrital Alcaldía Mayor.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (s.f.). *Terremotos.* Bogotá D.C.: Dirección de prevención y atención de emergencias.

Arias Londoño, L. V. (2017). *Cimentaciones Especiales Para Construcción De Un Sótano En Edificio Histórico. Estudio de caso: Antiguo Colegio de La Sagrada Familia en Cali (Colombia).* Universidad del Valle.

Basu, D., & Lee, M. (2017). *An Integrated Approach for Resilience and Sustainability in Geotechnical Engineering.* Indian Geotech J. https://doi.org/10.1007/s40098-018-0297-3

Cámara Comercio Bogotá. (2006). *Perfil Económico Y Empresarial De La Localidad De Chapinero.* Bogotá.

Carpenter, S. W. (2001). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? *Ecosystems*, 765-781. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9

Consorcio Metro Bog Systra - Ingetec. (2018). *Estructuración técnica del tramo 1 de la primera línea del metro de Bogotá. Estudio de impacto ambiental y social (EIAS) línea base – medio abiótico.* Alcaldía de Bogotá.

Dominguez, N., & Ibrahimbegovic, A. (2013). Propuesta de un programa de mejoramiento de resiliencia para una ciudad tipo en la Península de Yucatán. *Revista Ingeniería, 17 (3)*, 223-232.

Gaitan Rey, J. S., & Nieto Diaz, Y. E. (2016). *Panrama de riesgo ambiental para la gestión del funcionamiento en estaciones de servicio automotriz en las localidades de Chapinero y Usaquén (Periodo 2010 - 2014).* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

García Carrera, D. (2015). *La excavación urbana y los edificios vecinos.* Universidad Politécnica de Catalunya.

Gómez Martín, J. (2020). *Estimación de desplazamientos en excavaciones profundas empleadas en infraestructura vial urbana en Bogotá D.C. y su relación con los*

métodos constructivos. Universidad Santo Tomás de Aquino. https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/28009/2020jennifergomez.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Gómez Rozo, M. A., & Benitez Pineda, C. A. (2021). *Estimación Del Índice de Resiliencia Para Un Grupo De Estructuras Del Entorno Urbano Que Pueden Verse Afectadas Por El Uso De Tecnología Trenchless En Un Sector De La Primera Línea Del Metro De Bogotá D.C.* Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

Guitierrez Tovar, A. C. (2016). *Control de los factores de seguridad y desplzamiento de las estructuras de contención de los taludes de excavación mediante el método de elementos finitos y teoría del equilibrio límite.* Universidad Industrial de Santander. https://www.ingeotecnia.com.co/cied/Control-de-los-factores-de-seguridad-y-desplazamientos-Anyi-Gutierrez.pdf

Instituto de Estudios Ambientales (IDEA). (2016). *Seminario Interdisciplinar: Ingeniería, Riesgo y Cultura.* Universidad Nacional De Colombia.

Iñiguez Siguenza, L. M. (2017). *Análisis de la resiliencia ante la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en la ciudad de Machala.* Universidad técnica de Machala.

Ministerio del Trabajo. (2014). *Guía trabajo seguro en excavaciones.* Comisión Nacional de Salud Ocupacional del Sector de la Construcción.

Moscozo Barrios, L. R. (2011). *Metodología para la ejecución y control de excavaciones en sótanos para edificios.* Universidad de San Carlos de Guatemala. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3277_C.pdf

National Institute of Building Sciences. (2018). *Building Resilience. Retrieved from Whole Building Design Guide.*

Norma Sismorresistente 2010. (s.f.).

Núñez, J., Ruiz, M. d., Benavides, J., & Martínez, N. (2019). *Proyectos de infraestructura resiliente al cambio climático (Resumen Ejecutivo).* Fondo de Adaptación. Bancos de Desarrollo de América Latina.

Peña Florez, M., Rubiano Buitrago, A. C., & Yate Bastidas, D. E. (s.f.). *El rol de la ingeniería geotécnica en sociedades sostenibles y resilientes*. https://coggle.it/diagram/YDmYpeANbQYMPyED/t/el-rol-de-la-ingenier%C3%ADa-ciudades-sostenibles-y-resilientes

Peralta Buriticá, H. A., Velasquez Peñalosa, A., & Enciso Herrera, F. (2010). *Guía para el conocimiento y la reducción del riesgo de desastres en los municipios colombianos: Territorios resilientes.* Federación colombiana de municipios. Publicación elaborada en el marco de la Campaña Mundial: Desarrollando Ciudades Resilientes: ¡Mi Ciudad se está preparando! de UNISDR, 2010 - 2015.

Pineda Jaimes, J. (2003). *Análisis simplificado de la ocurrencia de falla de fondo en la ejecución de excavaciones para sótanos en los suelos blandos de Bogotá D.C.* Bogotá.

Pineda Jaimes, J. A., García Ubaque, C. A., & Esquivel Ramirez, R. E. (2020). Aproximación a la estimación de la amenaza geotécnica originada por excavaciones profundas en arcillas de Bogotá: Una contribución a la sustentabilidad en entornos urbanos. *Revista*

Facultad de Ingeniería, 29 (54). https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.11373

Pino Arias, A., & Riveros Antolinez, W. J. (2021). *Análisis Preliminar De La Estabilización De Una Excavación Profunda Mediante La Técnica De Congelamiento De Suelos.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Research & Development Programme of National Build. (2015). *Hazard Resilient Housing Construction Manual.* Colombo 05, Hazard Resilient Construction Series No. 1.

Rincón Aguirre, A. J., & Bonilla Parra, M. A. (2021). *Estimación del índice de resiliencia en tres estructuras de contención en la vía Sibaté - Fusagasugá.* Universidad Distrital FRancisco José de Caldas.

Rodriguez Castilla, A. N. (2017). *Metodología para la evaluación y mitigación del riesgo en excavaciones profundas en suelos arenosos de la ciudad de Bogotá D.C.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6078/RodriguezCastillaAndreaNatalia2017.pdf?sequence=4&isAllowed=y

Rubio Romero, J. C., & Bestratén Bellovi, M. (2018). *Ingeniería de la resiliencia: conceptos básicos del nuevo paradigma en seguridad.* Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST).

Salem, S., Siam, A., El.Dakhakhni, W., & Tait, M. (2020). Probabilistic Resilience-Guided Infrastructure. *ASCE. J. Manage*. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000818

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.*

Sosa García, R. (2017). Resiliente. *Boletín científico, 4*(8).

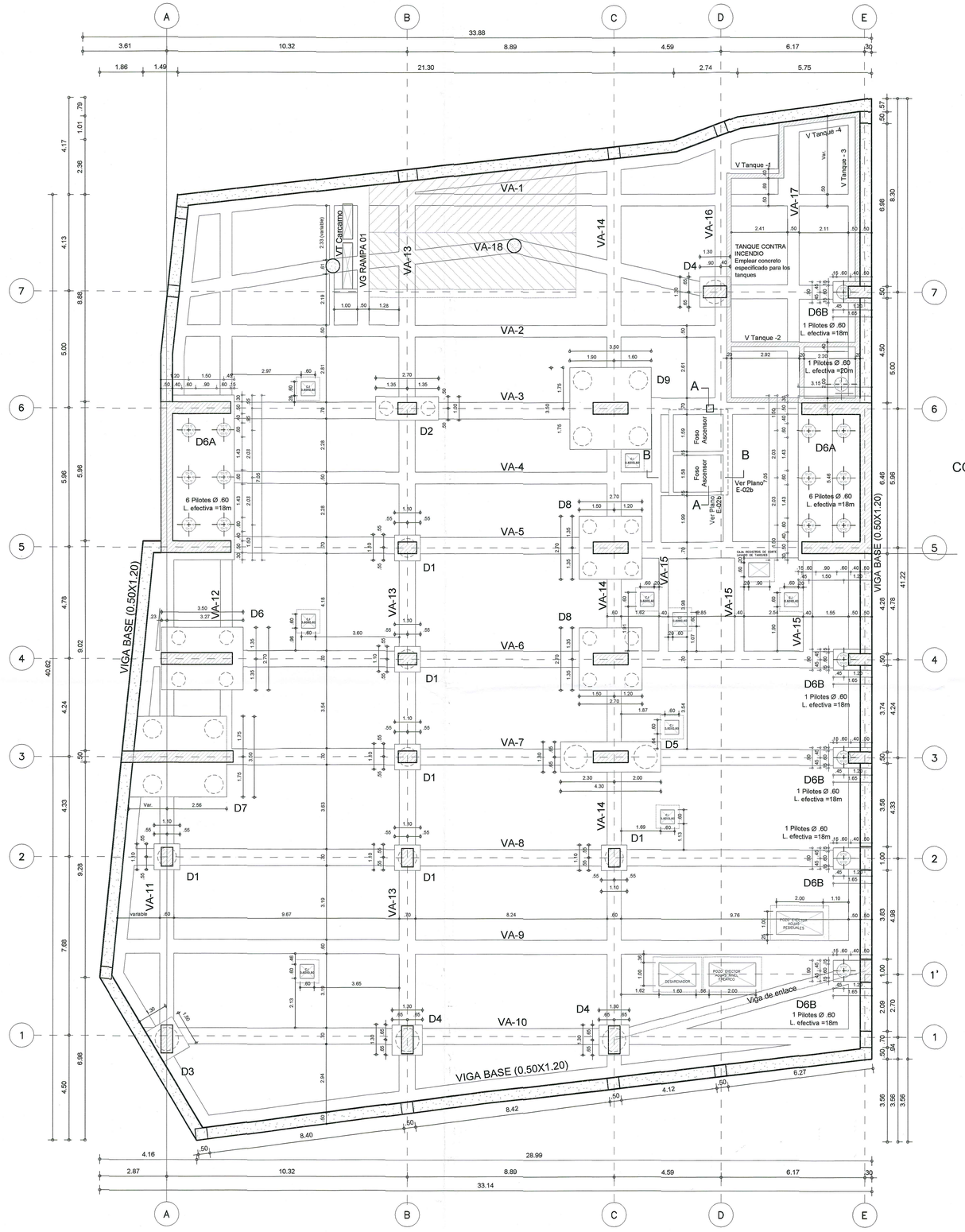
Vesga Rojas, H. F. (2017). Nuevas formas para optimizar la gestión del riesgo desde la perspectiva de territorios resilientes en Colombia. *Espacios, 2018 (8)*.

Yánez Contreras, M., Martelo Amaya, J., & Rodriguez Páez, H. (2020). Cálculo y análisis de la resiliencia de los departamentos de Colombia. *Sociedad y Economía, 2020 (41)*. https://doi.org/10.25100/sye.v0i41.8670

Yepes Piqueras, V. (2020). *Clasificación de las técnicas de control del agua en excavaciones*. Universitat Politécnica De Valencia. https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/02/28/clasificacion-de-las-tecnicas-de-control-del-nivel-freatico-en-excavaciones/

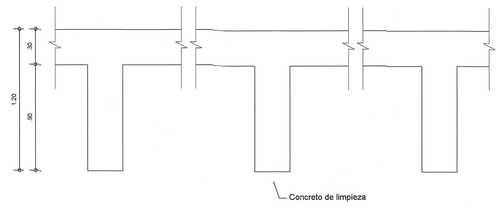
ANEXOS

Se anexan los planos estructurales del diseño de los sótanos de la excavación caso del presente trabajo.



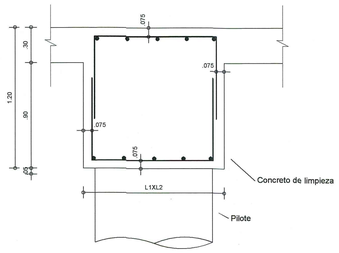
PLANTA CIMENTACION

Esc 1:100



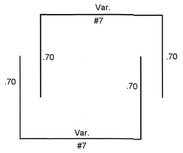
CORTE TÍPICO LOSA DE CIMENTACIÓN

Escala 1:25

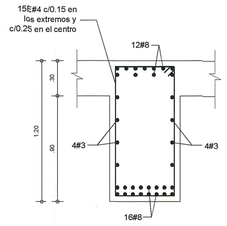


CORTE TíPICO DADO EXCEPTO PARA D2 y D5

Escala 1:25



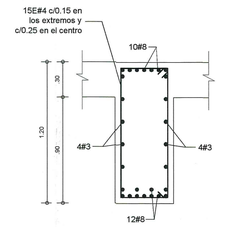
Nota: para refuerzo ver cuadro



CORTE REFUERZO VIGA DE CIMENTACIÓN

0.60x1.20 ó 0.70x1.20

Escala 1:25



CORTE REFUERZO VIGA DE CIMENTACIÓN

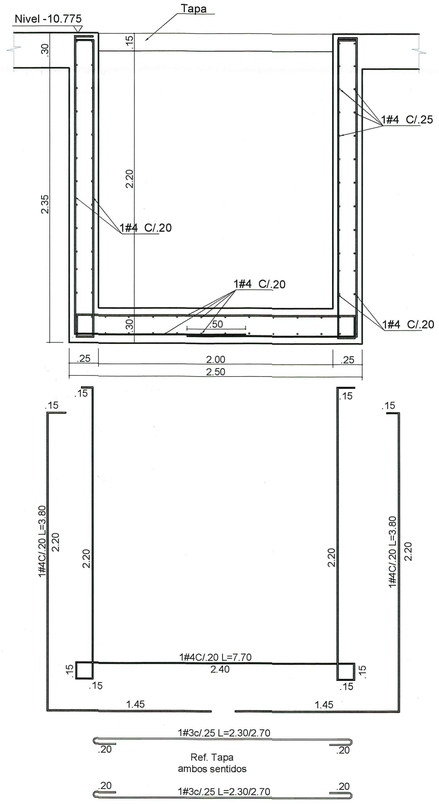
0.50x1.20

Escala 1:25

DETALLE AGUAS RESIDUALES

(2.00x1.00)

ESCALA: 1:25



DADO D5	7#7 55.5
1.30X1.20	22 c/0.20
44E#4 39	
0.75x1.05x0.15	7#7 55.5
Es: 1	

DADO D2	6#7 32.5
1.00X1.20	14 c/0.20
28E#4 35	
0.55x1.05x0.15	6#7 32.5
Es: 1	

ESPECIFICACIONES:

CONCRETO:

VIGAS Y PLACAS:	35-MPa.
COLUMNAS Y MUROS:	35-MPa.
DADOS :	28-MPa.
PILOTES:	28-MPa.

ACERO DE REFUERZO:

LONGITUDINAL:: Fy = 420 MPa.

FLEJES:

REVISIÓN: | PLANO Nº: E-05 | PLANCHA: 05 | DE: 52

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE

PROYECTO:
SEDE DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS DE FORMACIÓN PARA EL TRABAJO

SENA:

ARQ. ALBA MERCEDES SAENZ
SUPERVISOR DE DISEÑO

OBSERVACIONES:

#		FECHA

LOCALIZACIÓN:



UBICACIÓN PROYECTO:
CALLE 57 No. 8b-20 BARRIO CHAPINERO

CONTRATISTA:
CONSORCIO ALFA 2015

CONTRATISTA:
ING. RAFAEL HUMBERTO ALVAREZ BUSTILLO
MAT. 25202-10797 CND
Director de obra CONSORCIO ALFA 2015

CONTRATISTA:
ING. BERNARDO ARTURO SOCHA
Mat. 25202-093188-CND
Modificaciones estructurales CONSORCIO ALFA 2015

INTERVENTORÍA:
ING. RICARDO PABÓN
Director de Interventoria
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO J. DE CALDAS

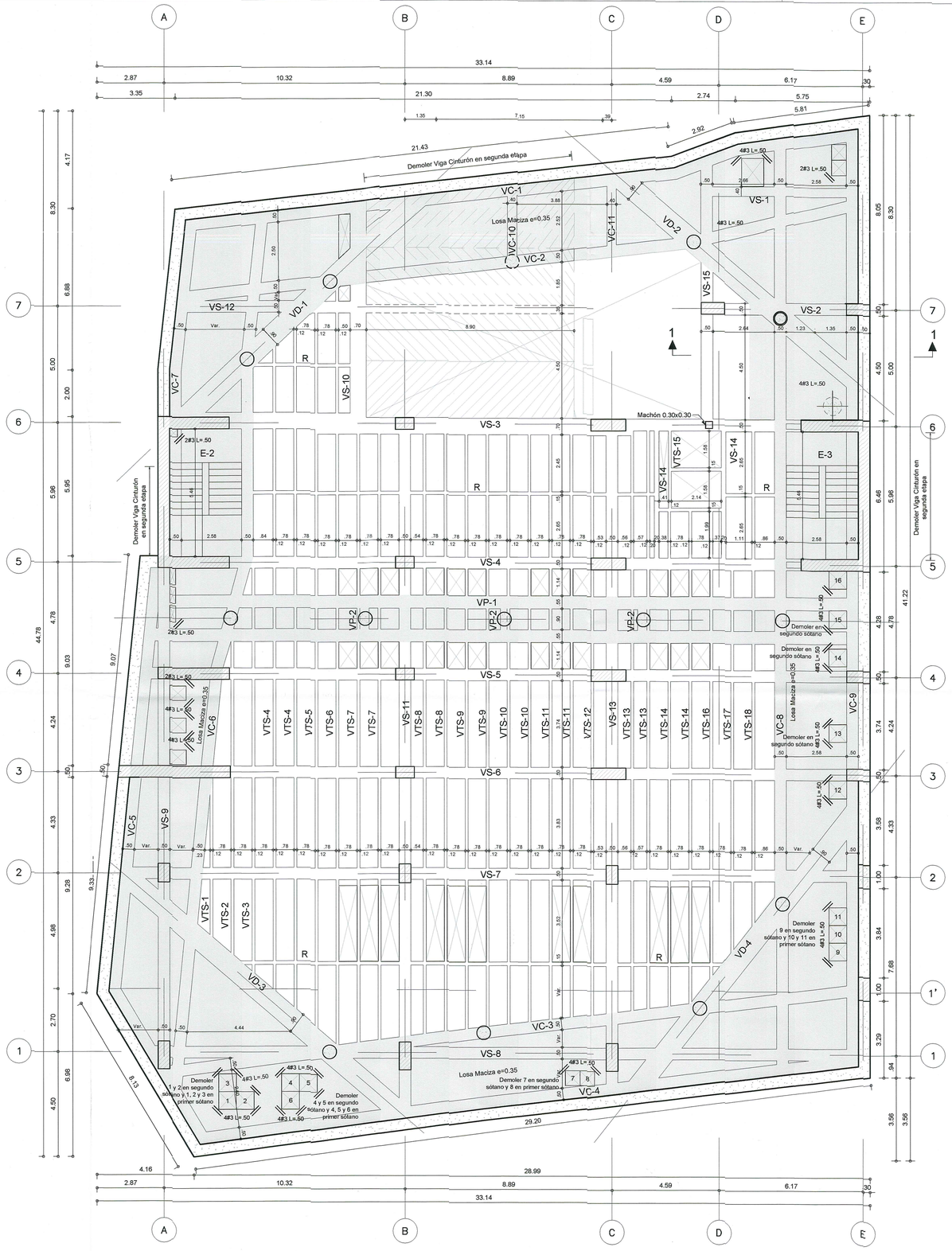
INTERVENTORÍA:
ING. RODOLFO FELIZZOLA CONTRERAS
MAT 25202-32573
Interventor modificaciones estructurales
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO J. DE CALDAS

CONTIENE: PLANTA CIMENTACIÓN, CORTES Y DETALLES CIMENTACIÓN
MODIFICACIÓN AL PLANO Nº E-02 QUE FORMA PARTE DE LA LICENCIA Nº LC 151-0298

ESCALA:	FECHA:	VERSIÓN:
INDICADA	DICIEMBRE 2016	

ARCHIVO DIGITAL:

REVISIÓN:	PLANO Nº:	PLANCHA:	DE:
	E-05	05	52



PLANTA SÓTANOS 1 y 2 NE– 3.915 Y NE– 7.30

Esc 1:100

Construir en primera etapa

Pilote constructivo a demoler después de construida la losa

REVISIÓN: | PLANO N°: E-10 | PLANCHA: 10 | DE: 52

SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE

PROYECTO:
SEDE DE SERVICIOS COMPLEMENTARIOS DE FORMACIÓN PARA EL TRABAJO

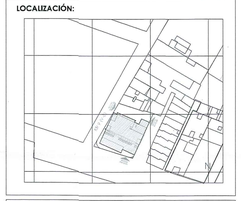
SENA:

ARQ. ALBA MERCEDES SAENZ
SUPERVISOR DE DISEÑO

OBSERVACIONES:

#		FECHA

LOCALIZACIÓN:



UBICACIÓN PROYECTO:
CALLE 57 No. 8b-20 BARRIO CHAPINERO

CONTRATISTA:
CONSORCIO ALFA 2015

CONTRATISTA:
ING. RAFAEL HUMBERTO ALVAREZ BUSTILLO
Mat. 25202-10797 CND
Director de obra CONSORCIO ALFA 2015

CONTRATISTA:
ING. BERNARDO ARTURO SOCHA
Mat. 25202-093188-CND
Modificaciones estructurales CONSORCIO ALFA 2015

INTERVENTORÍA:
ING. RICARDO PABÓN
Director de interventoria
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO J. DE CALDAS

INTERVENTORÍA:
ING. RODOLFO FELIZZOLA CONTRERAS
MAT 25202-32573
Interventor modificaciones estructurales
UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO J. DE CALDAS

CONTIENE: PLANTA SÓTANOS 1 Y 2 Y DETALLES
MODIFICACIÓN AL PLANO Nº E-04 QUE FORMA PARTE DE LA LICENCIA Nº LC 151-0298

ESCALA:	FECHA:	VERSIÓN:
1:100	DICIEMBRE 2016	

ARCHIVO DIGITAL:

REVISIÓN:	PLANO N°:	PLANCHA:
	E-10	10
		DE: 52