



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA ESTABILIDAD
DEL DEPÓSITO DEL GALPÓN DEL PROYECTO VIAL
ABURRA-RIO CAUCA**

Autora:

Katherine Sierra Garcia

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL DEPÓSITO DEL
GALPÓN DEL PROYECTO VIAL ABURRA-RIO CAUCA**

Katherine Sierra Garcia

**Trabajo de Grado
Como requisito para optar al título de:
Ingeniera Civil**

Asesores:

**Ing. Civil Derly Estefanny Gómez Garcia
Ing. Civil Gloria Amparo Álzate Agudelo**

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniera, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia
2021**

Contenido

1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo General	5
3.2. Objetivos Específicos	5
4. Zona de Estudio.....	6
Ubicación	6
4.1. Aspectos Geológicos.....	12
4.2. Geología Local.....	15
4.3. Aspectos Geomorfológicos	18
5. Marco Teórico.....	21
6. Metodología	24
7. Resultados y Análisis	27
8. Conclusiones y Recomendaciones.....	38
9. Referencias Bibliográficas	39
10. Anexos.....	41

Índice de Figuras

Figura 1: Localización general de la zona de estudio (Imagen tomada de Google Earth. Sin Escala)	6
Figura 2: Localización de la exploración ejecutada depósito El Galpón	8
Figura 3: Dirección del movimiento obtenido a partir de las lecturas de los inclinómetros..	9
Figura 4: Perfil de Velocidad Vp.....	11
Figura 5: Plancha geológica recortada de la zona de estudio.	13
Figura 6: Afloramiento de esquistos y dique intrusivo en la vía industrial	16
Figura 7: Talud del Depósito el Galpón con gran variación de tamaño de los fragmentos	17
Figura 8: Mapa de Formaciones superficiales del Depósito el Galpón	18
Figura 9: Plancha geomorfológica recortada de la zona de estudio.	19
Figura 10: Morfología en la vertiente.....	20
Figura 11: Cuneta afectada por los procesos morfodinámicos	21
Figura 12: secciones de corte del talud a modelar	24
Figura 13: Perfil estratigráfico sección 1	25
Figura 14: : Perfil estratigráfico sección 2	26
Figura 15: Perfil estratigráfico típico en la zona de estudio	26

Figura 16: Perfil estratigráfico sección 3 y 4 del Depósito el Galpón	27
Figura 17: Análisis de Estabilidad sección 1 Geo 5. FS=1.16	28
Figura 18: Análisis de Estabilidad sección 1 Slide5. FS=1.51	28
Figura 19: Análisis de Estabilidad sección 2 Slide. FS=1.328	29
Figura 20: Análisis de Estabilidad sección 2 Geo 5. FS=1.34	29
Figura 21: Análisis de Estabilidad sección 3 Slide. FS=1.361	30
Figura 22: Análisis de Estabilidad sección 3 Geo 5. FS=1.32	30
Figura 23: Análisis de Estabilidad sección 4 Slide. FS=0.903	31
Figura 24: Análisis de Estabilidad sección 4 Geo 5. FS=1.00	31
Figura 25: Secciones Alfa y Omega y secciones propias.	33
Figura 26: FS de la sección AA, sin estabilizar modelada con GEO5.....	34
Figura 27: FS después de la Zona estabilizada (Sección AA) modelada con GEO5.	34
Figura 28: Modelación sección B Alfa y Omega.....	35
Figura 29: Modelación sección B con GEO5.....	35
Figura 30: Modelación sección B Alfa y Omega con sismo	36
Figura 31: Modelación con GEO5 con sismo	36
Figura 32: FS de la Zona a estabilizar en la consultoría de Alfa y Omega (Sección BB) modelada con GEO5.	37
Figura 33: Modelación de la sección 2 por el método de Janbu.	41
Figura 34: Modelación de la sección 2 por el método de Spencer.	41
Figura 35: Modelación en Slide de la sección 3 por el método de Bishop.	42
Figura 36: Modelación en Slide de la sección 3 por el método de Spencer.....	42
Figura 37: Modelación en Geo5 de la sección 3 por el método de Bishop.	43
Figura 38: Modelación en Geo5 de la sección 3 por el método de Spencer.	43

Índice de Tablas

Tabla 1: Coordenadas perforaciones realizadas por Tecnisuelos 2018	7
Tabla 2: Coordenadas perforaciones realizadas por INTEINSA 2013	7
Tabla 3: Resultados desplazamientos de la instrumentación geotécnica	8
Tabla 4: Perfil de suelo de las perforaciones de Alfa y Omega	10
Tabla 5: Parámetros de resistencia de los materiales que componen el perfil típico	12
Tabla 6: Factores de seguridad adoptados para los análisis de estabilidad.	22
Tabla 7: Factor de Seguridad de las 4 secciones modeladas	32
Tabla 8: Factor de seguridad recomendado, incluyendo el riesgo de pérdidas de vidas y pérdidas económicas (Geotechnical Engineering Office, 2004)	32
Tabla 9: Comparación Factor de seguridad de secciones similares	33

1. Resumen

El depósito del Galpón fue construido con las rezagas del Túnel de Occidente o también llamado Túnel Fernando Gómez Martínez ubicado entre las ciudades Medellín-San Jerónimo, construido entre los años 1997 y 2005. Desde ese entonces se ha hecho necesario darle un monitoreo continuo a dicho depósito con el fin de garantizar su estabilidad y así poder darle el cierre ambiental al convenio 0583 de 1996, actualmente a cargo de la secretaria de Infraestructura Física de la Gobernación de Antioquia.

En el año 2013 la empresa Inteinsa realizó un estudio de consultoría evidenciando algunos puntos críticos y del cual se realizaron obras de estabilización, cerca al puente de la Quebrada la Negra. Para el año 2018 la empresa Alfa y Omega Ingenieros S.A.S, hace otra consultoría con el fin de analizar la estabilidad del talud y elaborar los diseños necesarios para las obras de estabilización del Galpón.

Dado lo anterior, en el presente proyecto se verificaron los estudios realizados por dicha consultoría, específicamente en la zona sur occidental del depósito del Galpón y además se evaluó las condiciones de estabilidad de otras zonas del Galpón. Todo esto con el fin de profundizar con más detalle en el conocimiento de la estabilidad del mismo predio.

Para realizar dicho estudio se modeló el talud en los programas Slide y Geo 5, para tener así forma de compararlos, además los parámetros de resistencia utilizados fueron los obtenidos por consultorías realizadas en la zona anteriormente por empresas como Inteinsa S.A. e Integral.

Efectivamente los resultados obtenidos por Alfa y Omega en la estabilidad de la zona sur occidental son semejantes a los arrojados en los programas utilizados y una vez realizada las obras de mitigación utilizando anclajes activos se logrará aumentar la estabilidad de la zona. La zona oriental en la cual se construyeron obras de estabilización presenta un factor de seguridad aceptable. En términos generales el Depósito del Galpón no presentaría problemas de estabilidad una vez terminadas las obras propuestas y el mejoramiento y la construcción de las nuevas cunetas.

2. Introducción

En las últimas décadas el Instituto Nacional de Vías INVIAS, el Departamento de Antioquia, el Área Metropolitana y el Municipio de Medellín, vienen realizando diversas Obras de grandes inversiones, con el fin de mejorar la Infraestructura

vial y la comunicación del Departamento de Antioquia en su interior y con en el resto del país, todo esto para tener una mejor competitividad, desarrollo económico, productividad e integración social de los habitantes del Departamento de Antioquia, además de cumplir con las políticas nacionales y el Plan de Desarrollo del Departamento de Antioquia [1].

Es así como con el convenio 0583 de 1996 que tiene por objeto “El Instituto, El Departamento, El Municipio Y El Área se comprometen a cofinanciar la construcción del proyecto de Comunicación Vial entre los valles de Aburra y del Rio Cauca, también denominado Variante Medellín – Santa Fe de Antioquia”, a cargo actualmente de la Gerencia de Proyectos Estratégicos de la Secretaría de Infraestructura Física de la Gobernación de Antioquia. Se llevaron a cabo diversas obras, entre ellas la construcción del Túnel de Occidente o también llamado Túnel Fernando Gómez Martínez ubicado entre las ciudades Medellín-San Jerónimo, que cuenta con una longitud de 4,6 Km, el cual se construyó entre los años 1997 y 2005, y fue puesto en servicio en enero 2006, fecha de su inauguración [1].

Las rezagas de la construcción del túnel y en fracción muy pequeña, secciones de corte de la vía fueron dispuestas en el Depósito del Galpón, al cual, durante varios años como parte del cumplimiento ambiental a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-, se le ha hecho un monitoreo constante, para identificar posibles movimientos de tierra o zonas inestables, que se puedan presentar debido a su construcción. Dadas las condiciones que se han encontrado, han hecho que la estabilización del depósito del Galpón haga parte del proyecto Conexión vial Aburra-Rio Cauca, como parte de una de las obras a realizar para darle cierre a la licencia ambiental de dicho proyecto [2].

En noviembre del 2018, la empresa Alfa y Omega Ingenieros S.A.S realizó un estudio geotécnico en el depósito el Galpón, tomando como base de referencia el estudio realizado por la empresa Inteinsa en el año 2013, lo anterior, con el fin de buscar propuestas de alternativas de solución y/o mitigación, de dar un diagnóstico a las problemáticas relacionadas con las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas e hidrológicas de las zonas inestables del depósito, vulnerables a la ocurrencia de remoción en masa. Además, de este estudio se obtuvo la caracterización del depósito y de los materiales de cimentación, a partir de exploración de campo, ensayos de campo y de laboratorio e instrumentación geotécnica.

Para verificar las condiciones de estabilidad de la zona evaluada, se partió de los resultados de desplazamientos registrados en los inclinómetros, instalados

adyacentes a las secciones y de los parámetros de resistencia y de deformación, utilizando un modelo tensión-deformación y por el método de elementos finitos (FEM). Posteriormente, con el método reducción de resistencia (SRF) se determinó un factor de seguridad para el depósito, dando como resultado un suelo inestable con posible riesgo a deslizamientos, con un valor menor al exigido por la norma NSR-10, en un sector del predio.

Dados los parámetros de resistencia, obtenidos en dicho estudio y en estudios anteriores, se tiene como finalidad en el presente trabajo, realizar un modelo del depósito el Galpón con el uso de los programas Slide y Geo5.

Lo anterior, con el fin de realizar un análisis comparativo de los resultados que se obtuvieron por parte de estos estudios y el análisis de secciones nuevas. Teniendo en mente además profundizar con más detalle en el conocimiento de la estabilidad del predio del Galpón.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Elaborar el análisis geotécnico del depósito el Galpón ubicado sobre la Conexión Vial Guillermo Gaviria Correa en la Abscisa km 13+300 calculando los factores de seguridad mediante el uso de los programas Slide y Geo5. Incluyendo análisis de nuevas secciones y la comparación con las secciones de los resultados de estudios realizados anteriormente.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica y recopilar la información de estudios de suelos realizados anteriormente en la zona de estudio con el fin de conocer la geología, geomorfología y parámetros geotécnicos y demás información útil para el modelo.
- Modelar y analizar perfil estratigráfico de las secciones analizadas por las empresas Alfa y Omega S.A.S e Inteinsa, en Geo5 y en Slide de Rocscience.

- Examinar los resultados obtenidos en la modelación y hacer una comparación con los estudios realizados anteriormente por la empresa Alfa Y Omega S.A.S E Inteinsa.
- Modelar y analizar nuevas secciones del talud del Galpón y brindar recomendaciones de acuerdo con los resultados obtenidos.

4. Zona de Estudio

Ubicación

El depósito el Galpón se localiza sobre la conexión vial Guillermo Gaviria Correa, aproximadamente en a abscisa km13+300, en el talud superior de la vía que conduce del municipio de Medellín hacia el municipio de Santa Fé de Antioquia, específicamente en el portal occidental del túnel Fernando Gómez Martínez, como se observa en la figura 1.



Figura 1: Localización general de la zona de estudio (Imagen tomada de Google Earth. Sin Escala)

Se recolecto información suministrada por la Gobernación de Antioquia de consultorías de Estudios Geotécnicos y Diseños de Ingeniería que han sido realizadas años anteriores con el fin de conocer las condiciones de estabilidad del Galpón y proponer las Obras necesarias, si es el caso para mitigarlo. El último estudio realizado al Depósito fue el de la empresa Alfa y Omega, en el cual recolecto

y se basó en el estudio realizado por Inteinsa en el año 2013. A partir de este estudio se tomó gran parte de información, especialmente de la composición estratigráfica del Depósito y de sus características físicas.

Instrumentación Geotécnica

La empresa Alfa y Omega, realizó 9 perforaciones en el año 2018 y se contaba con 5 más realizadas en el año 2013 por Inteinsa, para un total de 14 perforaciones, las cuales se encuentran listadas en las tablas 1 y 2 respectivamente, en donde se indica las coordenadas de su ubicación, la profundidad de exploración y la ubicación del nivel freático.

Tabla 1: Coordenadas perforaciones realizadas por Tecnisuelos 2018

Sondeo	Coordenadas		Profundidad de exploración (m)	Profundidad nivel freático (m)
	Este	Norte		
P1	821.885	1'191.602	30,00	No presenta
P2	821.851	1'191.594	8,00	No presenta
P3	821.730	1'191.697	30,00	No presenta
P4	821.855	1'191.685	30,00	27,00
P5	821.820	1'191.668	20,00	No presenta
P6	821.796	1'191.597	30,00	28,60
P7	821.794	1'191.781	16,00	No presenta
P8	821.741	1'191.568	30,00	23,00
P9	821.721	1'191.674	30,00	No presenta

Tabla 2: Coordenadas perforaciones realizadas por Inteinsa 2013

Sondeo	Coordenadas		Profundidad de exploración (m)	Profundidad nivel freático (m)
	Este	Norte		
P-1	821.885	1'191.602	31,00	13 m
P-2	821.851	1'191.594	31,00	14 m
P-3	821.730	1'191.697	30,10	12 m
P-4	821.855	1'191.685	31,00	10 m
P-5	821.820	1'191.668	30,50	9,0 m

Además, en la figura 2 se puede observar la ubicación en el plano de cada una de las perforaciones realizadas en el Depósito del Galpón de ambos estudios.

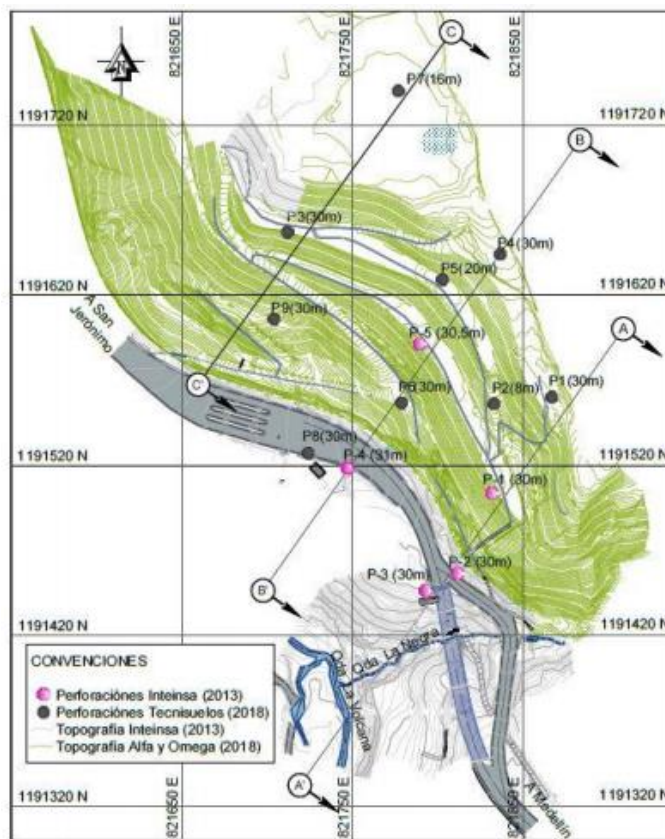


Figura 2: Localización de la exploración ejecutada depósito El Galpón
Tomado de informe geotécnico Alfa y Omega-2018

Con las perforaciones que fueron realizadas por estas dos empresas se instalaron nueve (9) inclinómetros de los cuales se obtuvo la siguiente información presentada en la tabla 4:

Tabla 3: Resultados desplazamientos de la instrumentación geotécnica
Fuente: Informe Alfa y Omega 2018

Inclinómetro	Prof (m)	Nro de lecturas	Desplazamiento total	Azimut A0	Azimut Desplazamiento.	Prof. Superficie de falla
TOCCI-3	29,5	10	1,56 cm	193°	216°	---
TOCCI-4	29,5	13	---	---	---	---
TOCCI-5	19,5	13	7,95 cm	234°	199°	14,0 m
TOCCI-6	29,5	10	8,00 cm	226°	212°	11,5 m
TOCCI-7	29,0	08	2,53 cm	181°	226°	25,0 m
TOCCI-8	18,0	12	6,25 cm	19°	197°	11,5 m
TOCCI-0A (*)	18,5	12	---	---	---	---

En la figura 11 se muestra los desplazamientos para cada uno de los inclinómetros en escala 10:1 en donde la longitud de la misma es indicio de la magnitud del movimiento. Con esta información arrojada por los inclinómetros la empresa Alfa y Omega realiza un modelo tensión-deformación.

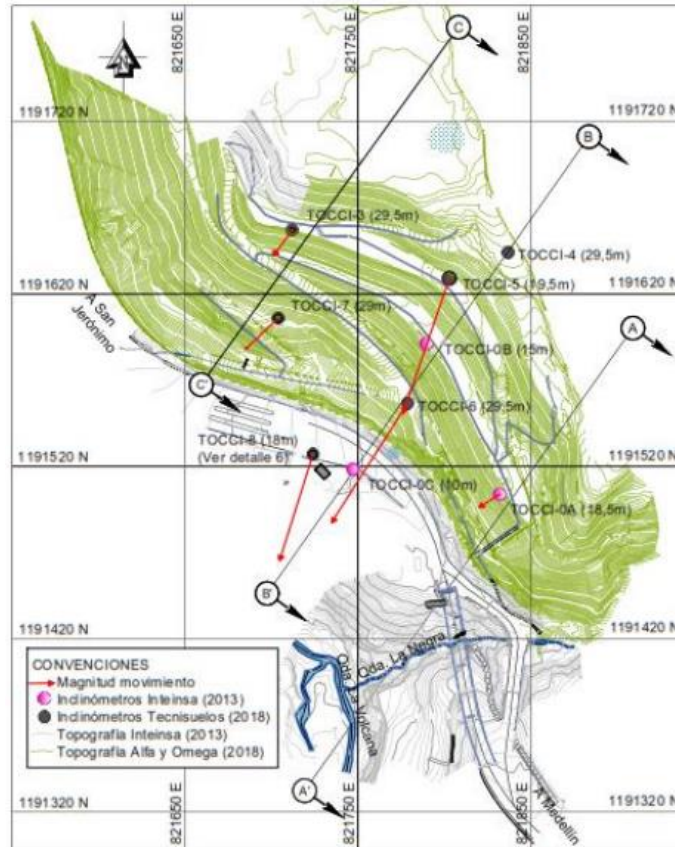


Figura 3: Dirección del movimiento obtenido a partir de las lecturas de los inclinómetros
Fuente: Informe Alfa y Omega 2018

Perfil Estratigráfico:

Para la obtención de los perfiles estratigráficos del depósito el Galpón, para la modelación de verificación y de las nuevas secciones a analizar se utilizó los perfiles que la empresa Alfa y Omega e Inteinsa usaron en sus modelaciones, ya que, según exploraciones y sondeos realizadas por Alfa y Omega en el año 2018, con ayuda de la empresa Tecnisuelos las características geológicas son similares. Además para las secciones diferentes a estas y teniendo en cuenta que el depósito está conformado por el mismo perfil estratigráfico, ya que este fue construido en su mayoría con las rezagas del Túnel, se pudieron realizar los perfiles similares.

Además de estos perfiles, también se tuvo en cuenta las perforaciones realizadas y los tipos de suelos encontrados en los mismos listados en la tabla 5.

Tabla 4: Perfil de suelo de las perforaciones de Alfa y Omega
Tomado de: Consultoría Alfa y Omega

ID	Nivel Freático [m]	Muestra	Perfil	Prof. [m]	
P 01	No presenta	M2	Lleno	4,00 - 4,45	
		M3		5,00 - 5,45	
		M4		6,00 - 6,45	
		M6 a M7	Flujo de lodos	6,85 - 13,00	
		M8 a M13	Roca IIB	13,00 - 30,0	
P 02	No presenta	M1 a M3	Lleno	0,00 - 8,00	
P 03	No presenta	M1 a M10	Lleno	0,00 - 11,00	
		M11	Depósito de vertiente	11,00 - 11,45	
		M12		12,00 - 12,45	
		M13		13,00 - 13,45	
		M14		14,00 - 14,45	
		M15		15,00 - 15,45	
		M16		16,00 - 16,45	
		M17		17,00 - 17,45	
		M18 a M22	Flujo de lodos	17,45 - 22,00	
M22 A M30	Roca IIA	22,00 - 30,00			
P 04	27,0	M1 a M4	Lleno	0,00 - 13,00	
		M5	Flujo de lodos	13,00 - 13,45	
		M6		14,00 - 14,45	
		M7		14,45 - 16,00	
		M8 a M12	Roca IIB	16,00 - 30,00	
P 05	No presenta	M1 a M4	Lleno	0,00 - 13,00	
		M5 a M7	Roca IIA	13,00 - 20,00	
P 06	28,6	M1 a M2	Lleno	0,00 - 7,00	
		M3 a M8	Roca IIA	7,00 - 25,00	
		M9	Dique	25,00 - 28,00	
		M10	Roca IIA	28,00 - 30,00	
P 07	No presenta	M1 a M5	Lleno	0,00 - 16,00	
P 08	23,0	M1	Depósito	1,00 - 1,50	
		M2	de vertiente	2,00 - 2,45	
		M4		4,00 - 4,45	
		M5		5,00 - 5,45	
		M6		6,00 - 6,45	
		M7		7,00 - 7,45	
		M8		8,00 - 8,45	
		M9		9,00 - 9,45	
		M10		10,00 - 10,45	
		M11		11,00 - 11,45	
		M12		12,00 - 12,45	
		M13 a M15		Transición IC-IIA	12,45 - 22,00
		M16 a M18		Roca IIA	22,00 - 30,00
		P 09	No presenta	M1 a M4	Lleno
M5 a M10	Roca IIA			11,00 - 30,00	

Ensayos Geofísicos

Con el fin de conocer más a detalle la estratificación del depósito El Galpón, en el año 2018 la empresa INGEOTEC S.A., realiza el informe “ELABORACIÓN DE LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA, PARA EL PROYECTO EL GALPÓN, EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN – DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, en donde se construyó un perfil promedio de velocidad de onda V_p (figura 12); el cual al evaluarse junto a las exploraciones realizadas con las perforaciones, permitió tener un entendimiento del comportamiento del material encontrado en el depósito.

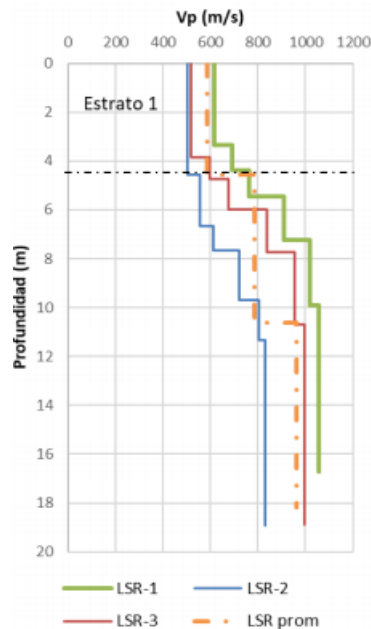










Figura 4: Perfil de Velocidad V_p
Tomado de: Informe Alfa y Omega 2018

Lo que se observa en la figura 12 es que los resultados de líneas de refracción son similares, presentando un material que incrementa su rigidez con la profundidad. Se puede destacar inicialmente un estrato superficial hasta aproximadamente 4.0 m, con una velocidad V_p promedio de 585 m/s. Posteriormente, hay un aumento en la consistencia del suelo, identificándose un estrato entre los 4.0 m y 11.0 m. Este tiene una V_p promedio de 785 m/s, pero se observa una mayor dispersión. Finalmente, por debajo de los 11.0 m se encontró un material con V_p promedio de 960 m/s.

Los parámetros de resistencia y de deformación fueron tomados de la tabla 4, los cuales fueron definidos a partir de información secundaria, exploración de campo, ensayos in situ, así como la calibración de los mismos hasta obtener los desplazamientos reportados por los inclinómetros mediante un análisis iterativo, realizado por la empresa Alfa y Omega.

Tabla 5: Parámetros de resistencia de los materiales que componen el perfil típico

Tomado de: Informe Alfa y Omega 2018

Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (kN/m ³)	Elastic Type	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (kPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Cohesion (residual) (kPa)
Lleno		Field Stress and Body Force	20	Isotropic	50000	0.4	Mohr Coulomb	Elastic	5		35		5	
Flujo de lodos		Field Stress and Body Force	18	Isotropic	10000	0.4	Mohr Coulomb	Plastic	8	0	29	29	15	15
Perfil IC esquisto		Field Stress and Body Force	19	Isotropic	100000	0.4	Mohr Coulomb	Elastic	5		30		15	
Perfil IIA esquisto		Field Stress and Body Force	24	Isotropic	130000	0.4	Mohr Coulomb	Elastic	200		32		200	
Perfil IIB esquisto		Field Stress and Body Force	24	Isotropic	500000	0.4	Mohr Coulomb	Elastic	214		35		214	
Dique IC		Field Stress and Body Force	21	Isotropic	50000	0.4	Mohr Coulomb	Plastic	8	0	30	30	8	8
Dique IIA		Field Stress and Body Force	21	Isotropic	50000	0.4	Mohr Coulomb	Plastic	15	0	32	32	15	15
Neis IIA		Field Stress and Body Force	24	Isotropic	130000	0.4	Mohr Coulomb	Plastic	210	0	35	35	210	210

4.1. Aspectos Geológicos

Con base en la revisión bibliográfica, estudios en la zona, se realiza una descripción de la geológica local y aspectos geomorfológicos relevantes de la zona.

Marco Geológico Regional: la zona de estudio se ubica geológicamente en la subregión del occidente del departamento de Antioquia, en medio de la Cordillera Central de los Andes cordón montañoso que se asocia a la zona de subducción del norte de los Andes; esta zona se caracteriza por una alta complejidad geológica, ya que cuenta con presencia de numerosas unidades de diferente edad y origen, que en su mayoría presentan contactos fallados. En esta zona se presenta la Falla de San Jerónimo, la cual pertenece al sistema Cauca–Romeral, y marca el contacto entre los dominios geológicos oceánico al Occidente representado por los Basaltos de Quebrada grande y el dominio Continental al Oriente representado por Esquistos [3].

En la figura 2 se describen las unidades geológicas que se pueden encontrar en la zona de estudio, tomadas textualmente del capítulo de Geología General del Área Urbana de Medellín, del documento “Memoria mapa geológico Antioquia”.

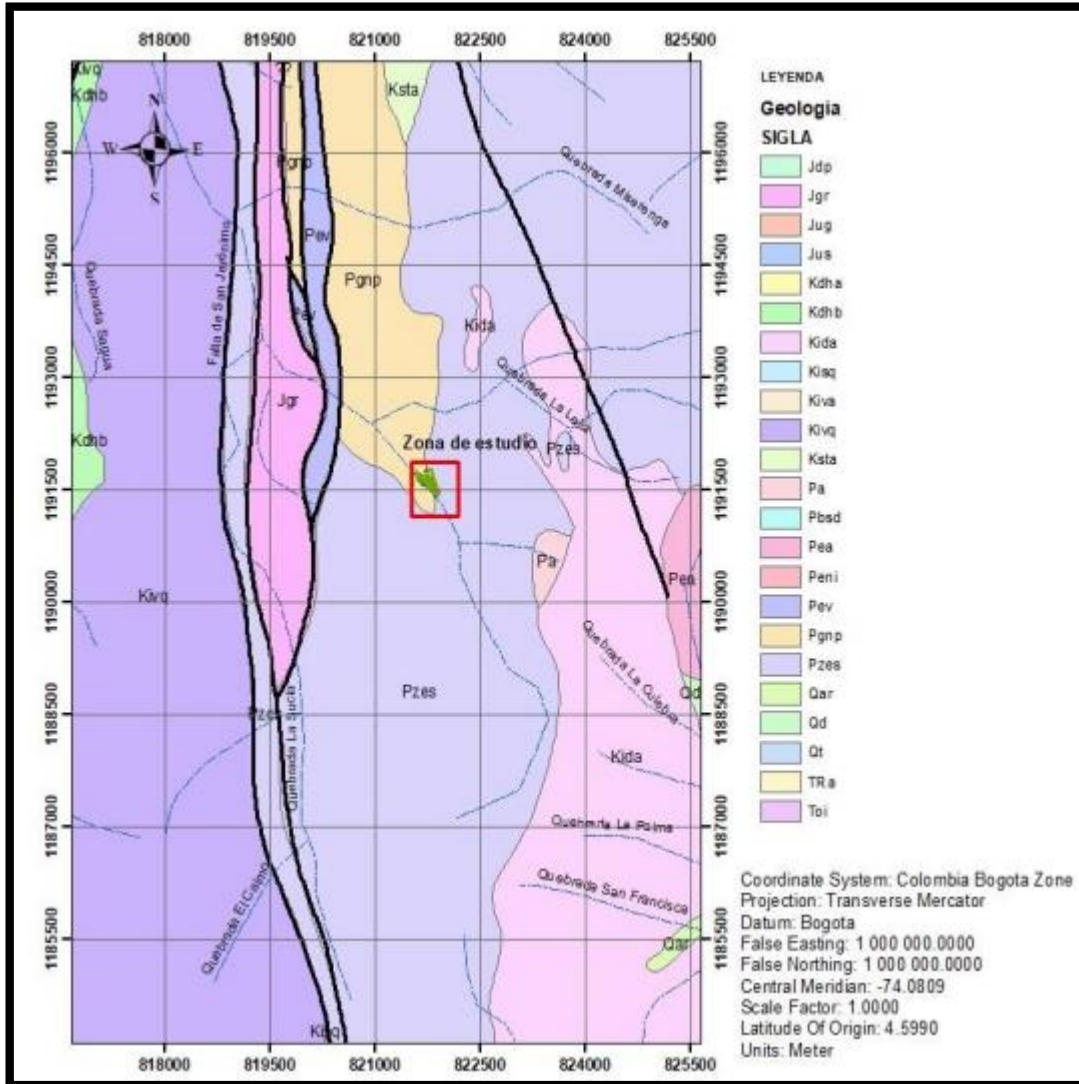


Figura 5: Plancha geológica recortada de la zona de estudio.
Tomado de la plancha 146, Medellín Occidental, Escala: 1:30.000. INGEOMINAS, 2006

En la zona de estudio, con las exploraciones realizadas se encuentran las unidades geológicas denominadas Esquistos Cuarzosericíticos, Neis de Palmitas, Gabros de Romeral, Stock de AltaVista, Basaltos de Quebradagrande, Depósito tipo flujo de lodos y llenos antrópicos [3], en donde se describirán a continuación:

Esquistos de Cajamarca (Trec): Corresponden a esquistos de bajo grado, su composición principal es Cuarzosericíticos, clorítica y grafítica. Están relacionados con cuerpos de anfibolitas sin granates y en general conforman topografías escarpadas. Los esquistos Cuarzosericíticos presentan variaciones transicionales a esquistos sericiticos y cuarcitas, pasando estas últimas a esquistos cuarzomoscovíticos y cuarzobioiticos [7].

En el sector occidental, corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los esquistos se encuentran intercalados con paquetes de otras unidades. El cuerpo de mayor dimensión cubre un área desde la zona del Cerro del Padre Amaya y Boquerón hasta el corregimiento de Palmitas. Este cuerpo se dispone en dirección N-NW y cruza parte de las veredas La Frisola, Las Playas, La Volcana, Guayabal y el casco urbano del corregimiento de Palmitas. Otros cuerpos de menor extensión se localizan en las veredas La Aldea y Potrera Miserenga, entre las quebradas La Volcana y La Miserenga, y en la vereda Urquitá cerca al estadero Aguacatillo. Esta unidad litológica también presenta fuertes efectos tectónicos, de hecho, las zonas de cizalla asociadas a las fallas de Romeral, San Jerónimo, muestran esquistos negros fuertemente replegados [4].

Gabros de Romeral (JgR): El nombre de Gabros de Romeral describe los cuerpos pequeños de gabro, relacionados con el sistema tectónico de Romeral. Algunos de estos cuerpos han sido reportados con nombres específicos en la literatura geológica: Gabro de Palmitas [5]. La Estrella y San Sebastián [6].

La unidad Gabros de Romeral agrupa numerosos cuerpos pequeños que se encuentran estrechamente relacionados con las rocas del Complejo Quebradagrande y las Dunitas de Medellín. Su disposición es en general Norte-Sur y es concordante con la de las fallas mayores del Sistema Cauca-Romeral, en este caso la falla de San Jerónimo.

En la zona de estudio estas rocas afloran en un cuerpo con ancho máximo de 1.5 km y aproximadamente 6 km de largo desde la vereda la Suiza hasta la vereda Urquitá en el extremo Norte de la zona de estudio. Estas rocas tienen grano medio a fino; sus contactos son fallados con las rocas de Quebradagrande y los Esquistos.

Gneis de Palmitas (TRgP): es el resultado de un metamorfismo regional en rocas ígneas. Generalmente en su afloramiento se observa de color blanco, con bandas grises y rastros de color amarillo-anaranjadas, de textura fanerítica media, por efectos térmicos tiene variaciones texturales por en donde se observa en grano fino y leve orientación [3]. En el depósito efectivamente no se encuentra aflorando, pero si se encontró en alguna de las perforaciones realizadas en estudios hechas por Solingral en el 2005 [1].

Deposito tipo flujo de lodos: esta unidad se encuentra en toda el área del depósito, y están constituidos por flujos de varias generaciones asociadas a la construcción del túnel. Están constituidos principalmente por una matriz arenosa a limo arcillosa con algo de grava, de color gris oscuro, fracturados y de geometría angulosa. Según la granulometría de este material pueden darse depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de la fracción fina [1].

Stock de AltaVista (KdA): Es un cuerpo ígneo de edad cretácea que aflora a lo largo de la vertiente Occidental del Valle de Aburrá, desde Itagüí en el Sur hasta la zona del Boquerón en el Norte, este cuerpo tiene una alta variación composicional y textural, con facies dioríticas y félsicas con predominio de las primeras y con textura desde grueso hasta finogranular con dominancia de la facie porfídica y presenta contacto intrusivo con la unidad de esquistos. La meteorización del Stock es avanzada y los suelos desarrollados alcanzan perfiles de hasta 45 m.

El suelo más desarrollado presenta de forma general un nivel superficial de suelo maduro limo-arcilloso (Nivel IB), de color claro y espesor mayor a 15 m, subyacente por un horizonte saprolítico (Nivel IC) limo-arenoso que da lugar a la zona de transición suelo a roca. En la zona de vertientes, donde el suelo es menos desarrollado, se presenta predominio de saprolito que conserva la textura y estructura de la roca parental y es altamente susceptible a la erosión; localmente se observa meteorización esferoidal.

Complejo Quebradagrande: El Complejo Quebradagrande fue descrito y nombrado inicialmente por Botero (1963) como formación Quebradagrande, conforme a la quebrada situada al sur del municipio de La Estrella que lleva el mismo nombre. Este autor describe los metasedimentos de la sección tipo como esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, liditas, cuarcitas de grano fino y diques de andesita y dacita. En contraste, las rocas volcánicas las incluye dentro de un grupo denominado rocas verdes, basado en la coloración verde producto de la cloritización de rocas basálticas. Este último tipo de rocas se caracteriza por texturas félsicas y porfídicas, y por tener una mineralogía compuesta por plagioclasas muy alteradas y augita como mineral mafico predominante [7].

En la zona de estudio aflora la unidad volcánica, la cual está compuesta por basaltos, diabasas y espilitas, con alteración variada, donde en general estas rocas son masivas y presentan un color verde debido a la alteración, por lo que en campo se les conoce como “rocas verdes”. En la zona de Palmitas, el complejo aflora en un cuerpo estrecho y continuo a todo lo largo de la zona de estudio en su extremo occidental, en contacto tectónico, con las unidades adyacentes y el cual lo marca la Falla San Jerónimo.

4.2. Geología Local

En los recorridos y exploraciones de campo realizados en diferentes consultorías se hallaron cuatro unidades geológicas predominantes: Esquistos Cuarzosericíticos, Neis de Palmitas, Depósito tipo flujo de lodos y llenos antrópicos.

Esquistos Cuarzosericíticos: esta unidad fue encontrada aflorando en superficie y en todas las perforaciones realizadas en el año 2013 por Inteinsa. Se identificaron niveles de meteorización IC, IIA y IIB. Además, esta unidad tiene una afectación por la presencia de dique intrusivos asociados al Neis de Palmitas como se muestra en la figura 3, exceptuando en las perforaciones P1 y P5, donde no se encontró presencia de este. En las perforaciones P1 y P4 tampoco se encontró nivel de meteorización nivel IC (saprolito).



*Figura 6: Afloramiento de esquistos y dique intrusivo en la vía industrial
Tomado de: Consultoría Inteinsa 2013*

El Nivel II A (transición suelo-roca) muestra una matriz limo arcillosa, con fragmentos de esquistos de menos de 20 cm de longitud, Los esquistos están altamente fracturados y con algunos fragmentos de cuarzo y zonas con presencia de saprolito del dique muy compacto.

Nivel IC (Saprolito) de Esquistos Cuarzosericíticos, se presenta como un suelo limo-arenoso con presencia de arcilla, conserva la estructura laminar y presenta algunos fragmentos de esquistos menores a 8cm. Solo se presentó en la perforación P2, con un espesor de 9.4m, donde se observó que entre los 3.0 m y los 4.4 m el material se presentaba más blando y con un poco más de contenido de arcilla. En esta misma perforación se encontró la intrusión del dique con un espesor de 4.4m y subyacente a este dique se encuentra nuevamente el saprolito de los esquistos.

Nivel II B (roca alterada), roca fracturada, foliada, con venas de cuarzo de hasta 8 cm de espesor, altamente fracturado, con recuperación alta (mayor al 90%) y RQD bajo a nulo.

Neis de Palmitas: no se encuentra aflorando, pero se encontró en P4 a 26m de profundidad, se encontró nivel de meteorización IIA.

Deposito tipo flujo de lodos: se encontró en toda la exploración que realizo Inteinsa en el año 2013, en la zona superficial como profunda, y en cuatro de las perforaciones realizadas por Solingral en el año 2005. Están cubriendo los esquistos y los diques, tienen espesores que van desde 1.8m a 12m y están recubiertos por el depósito del Galpón, asociada a la construcción del túnel. Los depósitos son de matriz arenosa a limo arcillosa.

Deposito Aluviotorrencial: estos depósitos se deben a la actividad torrencial de la quebrada la Frisola, tienen bloques de gran tamaño sobre el cauce y la margen, su espesor es de aproximadamente 8m.

Llenos Antrópicos: este lleno es el causado por las rezagas del túnel y conforman el denominado deposito el Galpón (figura 4), están compuestos principalmente por fragmentos de esquistos y rocas ígneas volcánicas entre 1 a 40cm de diámetro, con pequeños fragmentos de cuarzo, están en el talud superior de la vía suprayaciendo el depósito tipo flujo de lodos.

En la exploración realizada por Inteinsa se encontró en las perforaciones P1 y P5, con espesores entre los 6 y 13m, pero para los perfiles geométricos debido a su topografía se tomó de 15m.



*Figura 7: Talud del Depósito el Galpón con gran variación de tamaño de los fragmentos
Fuente: Propia*

En resumen, tomando los estudios de Alfa y Omega en el cual muestran un mapa de las formaciones superficiales del depósito el Galpón en la figura 5.

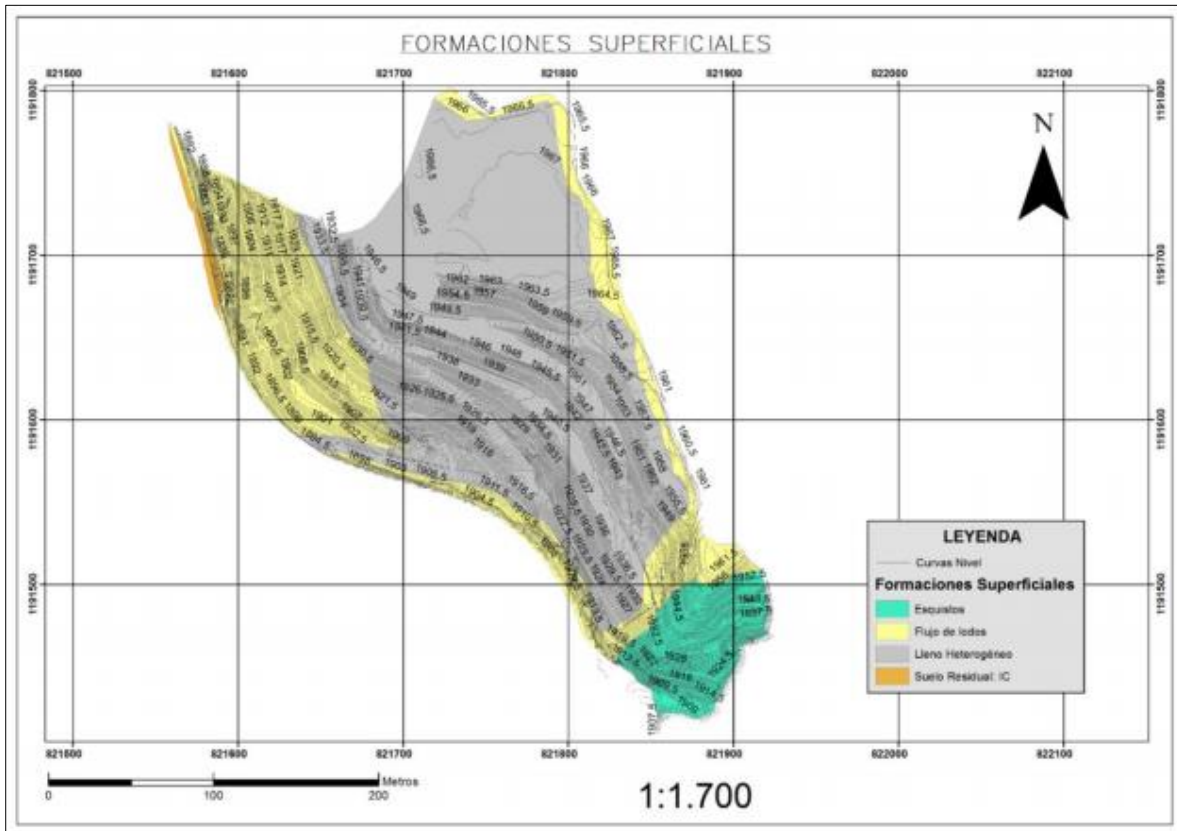


Figura 8: Mapa de Formaciones superficiales del Depósito el Galpón
Tomado: Consultoría Alfa y Omega

4.3. Aspectos Geomorfológicos

Esta zona se encuentra en un valle intramontano profundo y un poco estrecho que corta un sistema de superficies de erosión o altiplanos de edad Terciario Medio, ubicados a alturas sobre el nivel del mar que están entre los 2.200 y 3.200 m, los cuales conforman el rasgo morfológico más sobresaliente del norte de la Cordillera Central Colombiana.

Según Arias (1995), el valle de aburra comprende un relieve de segundo orden, posterior a los altiplanos a los cuales corta. La historia geomorfológica más antigua de este sector de la cordillera la conforman el conjunto de altiplanos formados en sucesivos pulsos del levantamiento orogénico durante el Terciario [8]. El Valle de Aburrá corresponde a un cañón entallado entre el sistema de altiplanos o superficies de erosión. La jurisdicción del Valle de Aburrá queda comprendida, de acuerdo con el estudio, en tres de las grandes unidades de relieve a saber: Superficies de erosión o altiplanos, escarpes regionales y cañones. La zona del corregimiento de San Sebastián de Palmitas, del municipio de Medellín, hace parte de la vertiente oriental del gran cañón del río Cauca (frentes erosivos).

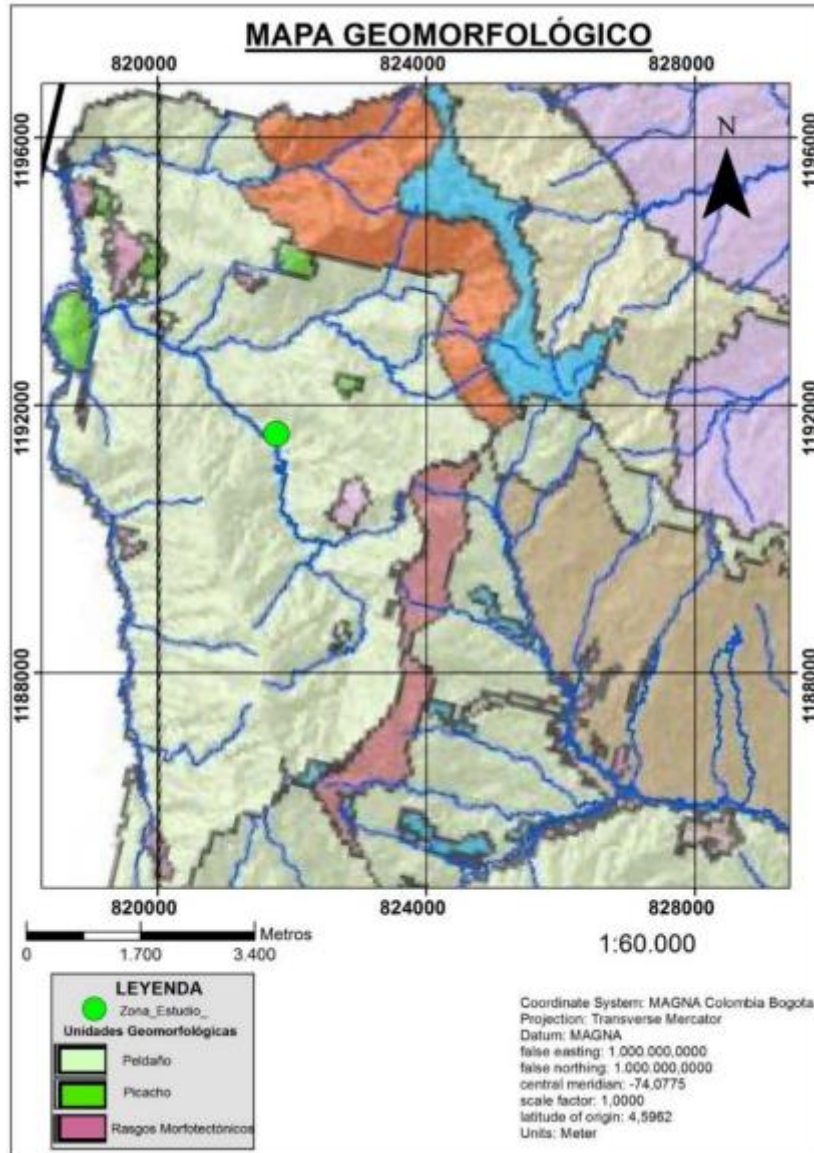


Figura 9: Plancha geomorfológica recortada de la zona de estudio.
 Tomado de la Microzonificación Sísmica 2006I, Escala: 1:60.000.

La geomorfología muestra zonas de laderas onduladas y vertientes con una alta modificación de su aspecto natural ya que sobre el talud superior de la vía se construyó el Depósito El Galpón, con la rezaga generada durante la excavación del túnel, dando lugar a un lleno antrópico de gran tamaño que presenta un aspecto escalonado, la pendiente se observa variable de fuerte a baja como se muestra en la figura 7. En la zona NE se observa el cauce de la quebrada La Negra, que presenta laderas escarpadas y un valle en forma de V, sobre esta se observan zonas con afloramientos de roca.



Figura 10: Morfología en la vertiente

Sobre el costado sur del Depósito El Galpón se presenta la quebrada La Negra. Esta es una corriente de cauce rectilíneo, controlado por la pendiente, con alto gradiente, presencia de saltos en roca, con un cauce en valle estrecho en V, vertientes escarpadas, la cual desemboca en la quebrada La Frisola, donde esta última presenta un cauce amplio, unos 30 m de amplitud, con gran cantidad de material de carga de fondo depositado en el cauce.

4.4. Procesos Morfodinámicos

En las vistas realizadas por ambas empresas se observó procesos morfodinámicos importantes, uno de ellos presenta una corona de 240m de longitud que de manera discontinua se presenta desde el nivel superior del Depósito El Galpón hasta el terreno natural, formando escarpes de hasta 1.5 m de altura y afectando algunas de las cunetas del depósito, generado así infiltración en el terreno dada la alta permeabilidad que tiene el depósito.

Además, este mismo año en una de las visitas que se realizó se observa el daño de las cunetas que se presenta por estos procesos morfodinámicos (figura 8), lo que significa que se presenta movimientos en el mismo.



Figura 11: Cuneta afectada por los procesos morfodinámicos

5. Marco Teórico

Software para el análisis de Estabilidad de Taludes

Slide: Es un programa en el cual se puede llevar a cabo la modelación de un talud en 2D, permite hacer análisis de la estabilidad del talud utilizando principalmente métodos de equilibrio limite. Este software computacional es experto para el análisis de la estabilidad de taludes bajo diferentes métodos existentes en la literatura. En el programa se pueden incorporar parámetros geotécnicos y geométricos del talud a estudiar, así como la condición del nivel freático del agua ya sea con una tabla de agua o con la metodología para modelar el flujo de agua por medio de elementos finitos. Utiliza el análisis de equilibrio limite y como resultado presenta el factor de seguridad para diferentes superficies de fallas y superficie crítica de falla [9].

Geo5: Este software se utiliza para el análisis de la estabilidad de un talud de tierra. Utiliza metodologías existentes en la literatura como métodos de falla circular (Bishop, Fellenius / Peterson, Janbu, Morgenstern-Price o Spencer) o poligonal (Métodos Sarma, Janbu, Morgenstern-Price o Spencer). Dentro de sus características están en poder conocer estados límites y factores de seguridad del talud. Se puede modelar con presencia de agua en el talud, presión de poros, efecto

sísmico modelo simple de cuerpos rígidos, optimización rápida y fiable de superficies de deslizamiento circulares y poligonales [10].

Exploración geotécnica: ejecución de un programa para la determinación del modelo geológico y la instalación de instrumentación geotécnica con el fin de evaluar la estabilidad de la zona.

Ensayos Geotécnicos de laboratorio: estos ensayos son utilizados para el análisis y estudio del comportamiento de materiales térreos (suelos o rocas) y para la determinación de las características geotécnicas de un terreno. Estos ensayos se pueden clasificar de acorde a las características del suelo: ensayos de identificación (compactibilidad), ensayos de estado, ensayos de resistencia, ensayos de permeabilidad, comportamiento dinámico entre otros [11].

Ensayo Geofísico: Método de exploración con el cual se puede obtener la estratigrafía del subsuelo en forma indirecta, este método funciona debido al cambio de propiedades dinámicas que tienen los materiales que conforman un estrato. Se basa en la medición de los tiempos de viaje de ondas de compresión (Ondas P), las cuales son generadas por un equipo que es la fuente de energía impulsiva a lo largo de diferentes puntos distribuidos en un eje en la superficie del terreno a evaluar [12].

Factor de Seguridad NSR-10: en ingeniería civil se define como la relación entre las fuerzas resistentes F_R y actuantes F_A , o con los esfuerzos y es usado para evaluar el estado límite de falla [15].

Los factores de seguridad obtenidos en los modelos deben cumplir con lo presentado en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10.

*Tabla 6: Factores de seguridad adoptados para los análisis de estabilidad.
Tomado de: Título H de la NSR-10*

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de Construcción serán el 50% de los de Diseño

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y pseudoestático fue tomado de las recomendaciones de la Norma de construcción sísmo resistentes (NSR-10) en la tabla 1.

Para el análisis pseudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sísmo de diseño, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestáticos de taludes (KST) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se calcula en función de la aceleración pico efectiva (Aa), del factor de amplificación Fa y del coeficiente de importancia (I) como:

$$a_{max} = Aa * Fa * I \quad \text{Ecuación 1}$$

Para el caso de la zona donde se ubica el Polígono, el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Medellín estableció un valor de Aa de 0.15 y considerando el tipo de edificaciones (grupo III), el coeficiente de importancia es 1.0 a_{max} 0.07 para sismos de servicio y si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que: $a_{max} = 0.25g$

Método de Spencer:

Fue desarrollado en el año 1967, se basa en el método de equilibrio límite, este método tiene en cuenta equilibrio de fuerzas y equilibrio de momento. Funciona bajo la hipótesis de que las fuerzas resultantes entre rebanadas son paralelas. Cualquier superficie de deslizamiento.

Supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$\frac{X}{E} = \tan\theta \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde x son las fuerzas verticales y E las horizontales. Para la fuerza normal se tiene:

$$P = \left[W(E_R - E_L) * \tan\theta - \frac{1}{FS} (c' l \sin i - u \tan \phi' \sin i) \right] / m_i$$

Ecuación 3

Donde m :

$$m_i = \cos i * \left(1 + \tan i * \frac{\tan \phi'}{F} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Y FS es el factor de Seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto la disponible; E_R y E_L son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de la rebanada; u es la presión de poro en la superficie de rotura; l es la longitud de la base de la rebanada; i la inclinación de la

base del elemento; c' y ϕ' la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de rotura.

En este método Spencer dedujo que el factor de seguridad resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a las fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coincidente con la de Bishop.

Además, también se tienen los ábacos de Spencer, los cuales se basan en soluciones calculadas mediante el riguroso método de Spencer, que satisface el equilibrio completo.

$$\phi_d = \tan^{-1}[\tan\phi/F] \quad \text{Ecuación 5}$$

6. Metodología

Para modelar las secciones del talud, se trazaron 4 cortes a lo largo de este con el fin de tener el perfil longitudinal de cada uno de estos como se muestra en la figura 13, y con este tener la geometría del talud para poder modelarlo tanto en Slide como en Geo5.

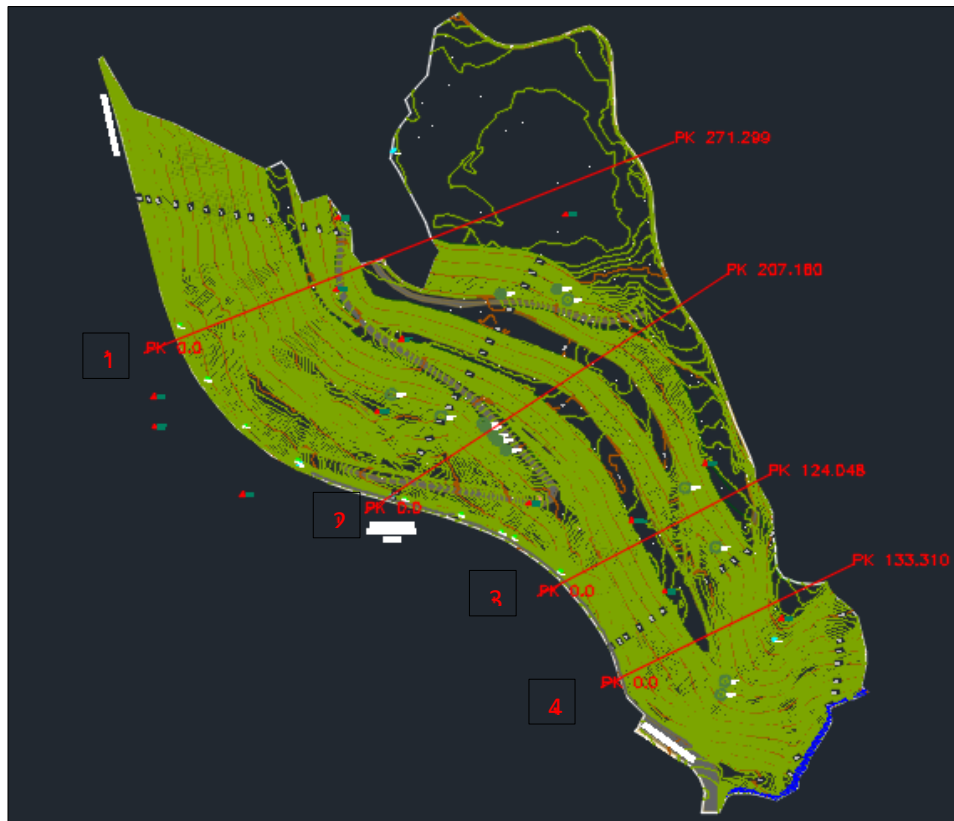


Figura 12: secciones de corte del talud a modelar
Elaboración: propia

MODELACIÓN

Para la ubicación del nivel freático de cada una de las secciones, se utilizó la información consignada en la tabla número 1 y 2, que se obtuvo a través de las perforaciones realizadas en cada una de las consultorías.

-Sección 1: para el caso de la sección1, el perfil se graficó hasta la mitad ya que no se tenía información de las curvas de nivel de la parte media de esa parte del talud, además, ya que en perforaciones cercanas que fueron de aproximadamente 30m de profundidad no se encontró nivel freático, para su modelación este se ubicó a 5m más de profundidad de estas perforaciones. Para el perfil estratigráfico se tuvo en cuenta las perforaciones P9, P3 y P7 y los espesores mostrados en la tabla 2.

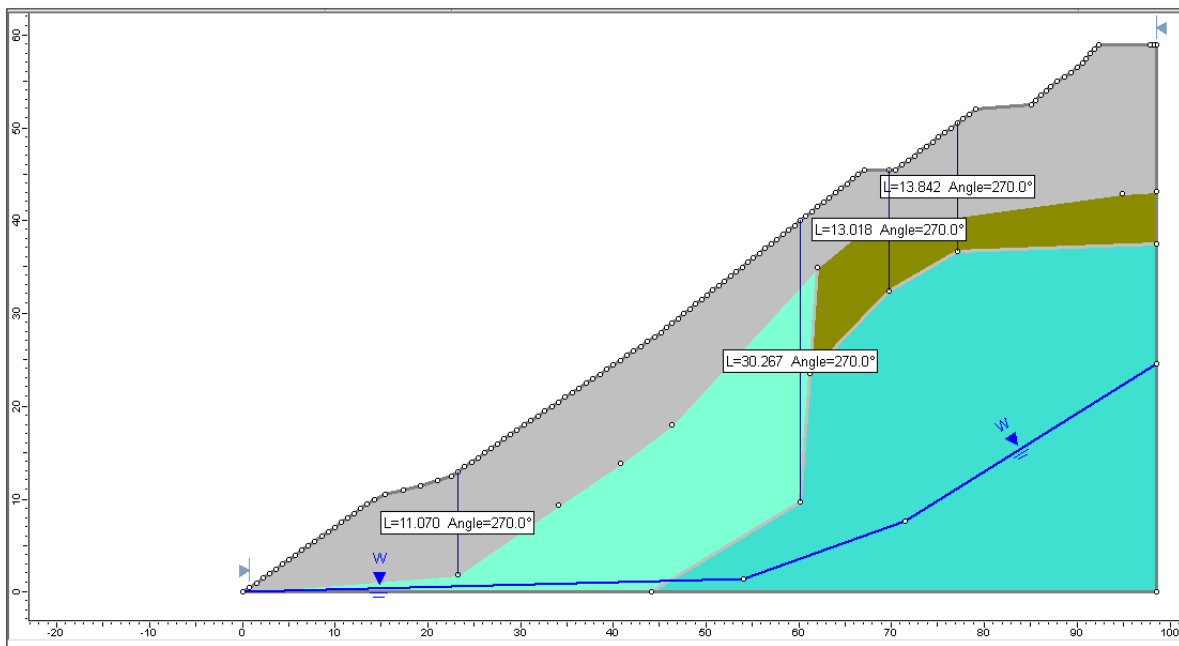


Figura 13: Perfil estratigráfico sección 1
Elaboración: propia

Sección 2: para el caso de la sección2, se tomó información de las perforaciones P8, P5, P4 y P1 realizadas por Alfa y Omega y de las perforaciones P-5 y P-4 realizadas por Inteinsa. Quedando un perfil como lo muestra la figura 15.

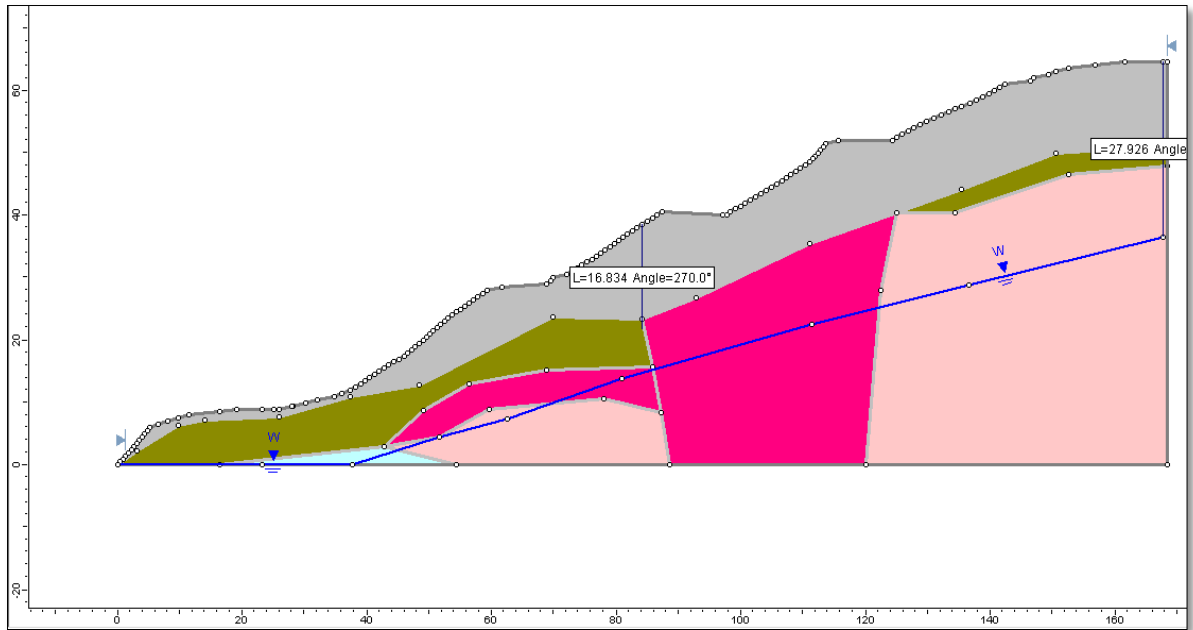


Figura 14: : Perfil estratigráfico sección 2
Elaboración: propia

Sección 3 y 4: para el caso de estas secciones se tuvo en cuenta el perfil ya realizado por Inteinsa mostrado en la figura 16, ya que estas secciones están cerca a estos perfiles.

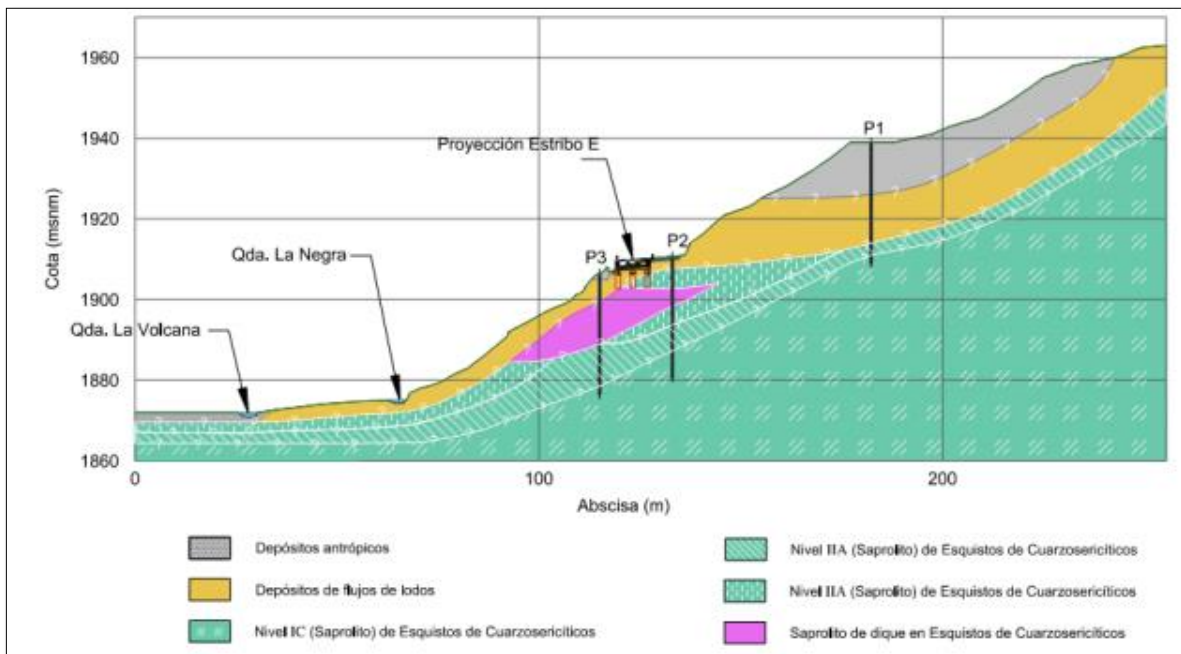


Figura 15: Perfil estratigráfico típico en la zona de estudio
Tomado de informe geotécnico INTEINSA-2013

Este corte corresponde a la sección A-A de la figura 10, es específicamente el lugar donde se encuentra ubicado el puente, que en ese momento era la zona de interés para Inteinsa. En este perfil se puede observar un nivel de depósito de flujos de aproximadamente 4m de profundidad, infrayacido por la unidad de esquistos Cuarzosericíticos IIA, la cual inicialmente presenta un saprolito hasta los 6 m, cerca de las perforaciones P2 y P3. Este saprolito está intruido por un dique ígneo de unos 9 m de espesor, hasta alcanzar así los 15.5 m de profundidad, nuevamente se presenta el saprolito de esquistos el cual alcanza una profundidad de 19 m, donde se presenta el Nivel IIA de los Esquistos, su transición de suelo a roca. En la parte superior del talud, cerca de la perforación 1, los espesores de estos estratos varían.

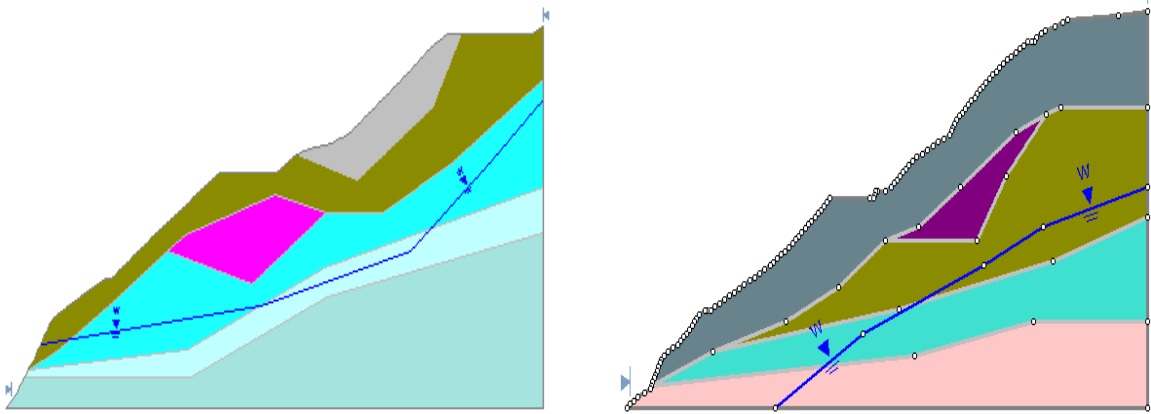


Figura 16: Perfil estratigráfico sección 3 y 4 del Depósito el Galpón

7. Resultados y Análisis

Se modeló cada una de las secciones con GEO 5 y SLIDE, para poder realizar una comparación de los resultados obtenidos. Para cada una de las secciones se hizo la modelación siguiendo la metodología establecida por Spencer, Bishop y Janbu ya que son las que tiene en común estos dos programas.

Perfil 1:

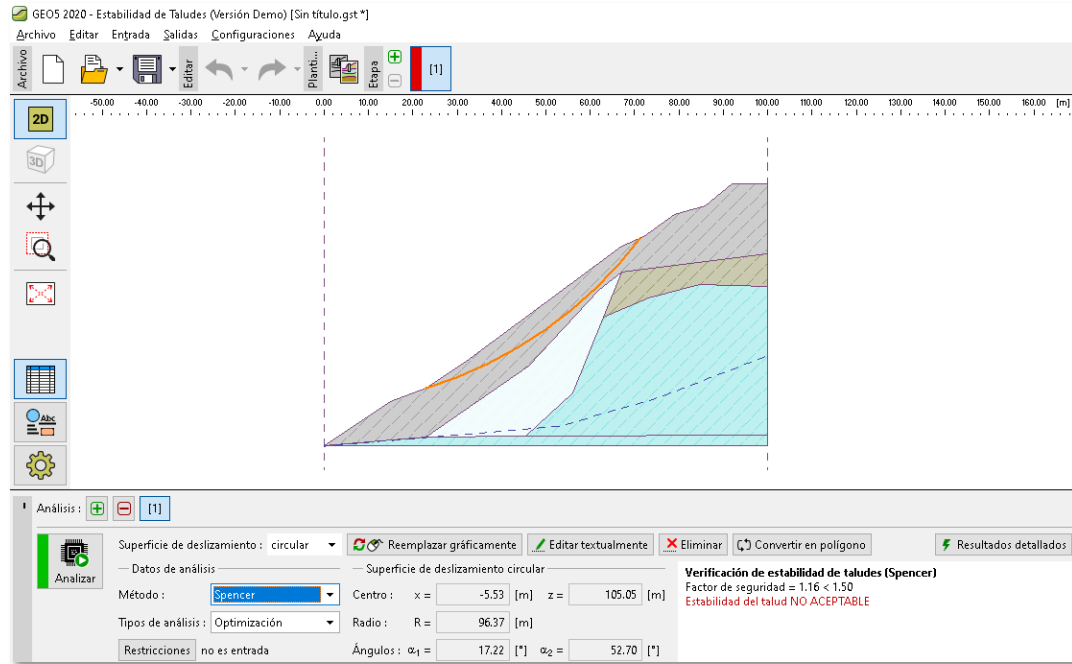


Figura 17: Análisis de Estabilidad sección 1 Geo 5. FS=1.16
Elaboración: Propia

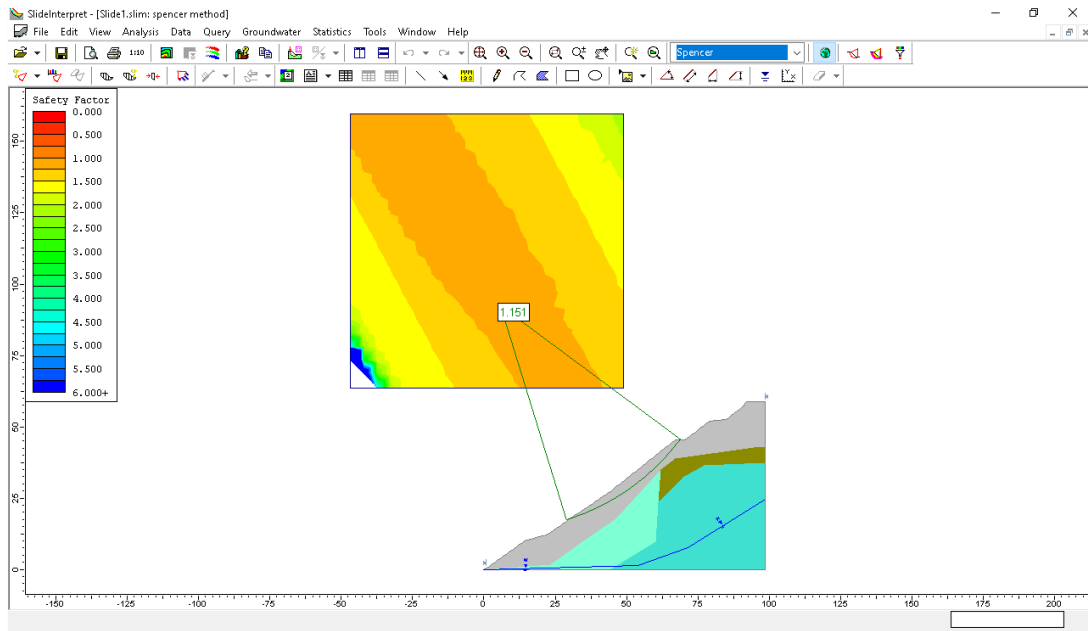


Figura 18: Análisis de Estabilidad sección 1 Slide5. FS=1.51
Elaboración: Propia

Perfil 2:

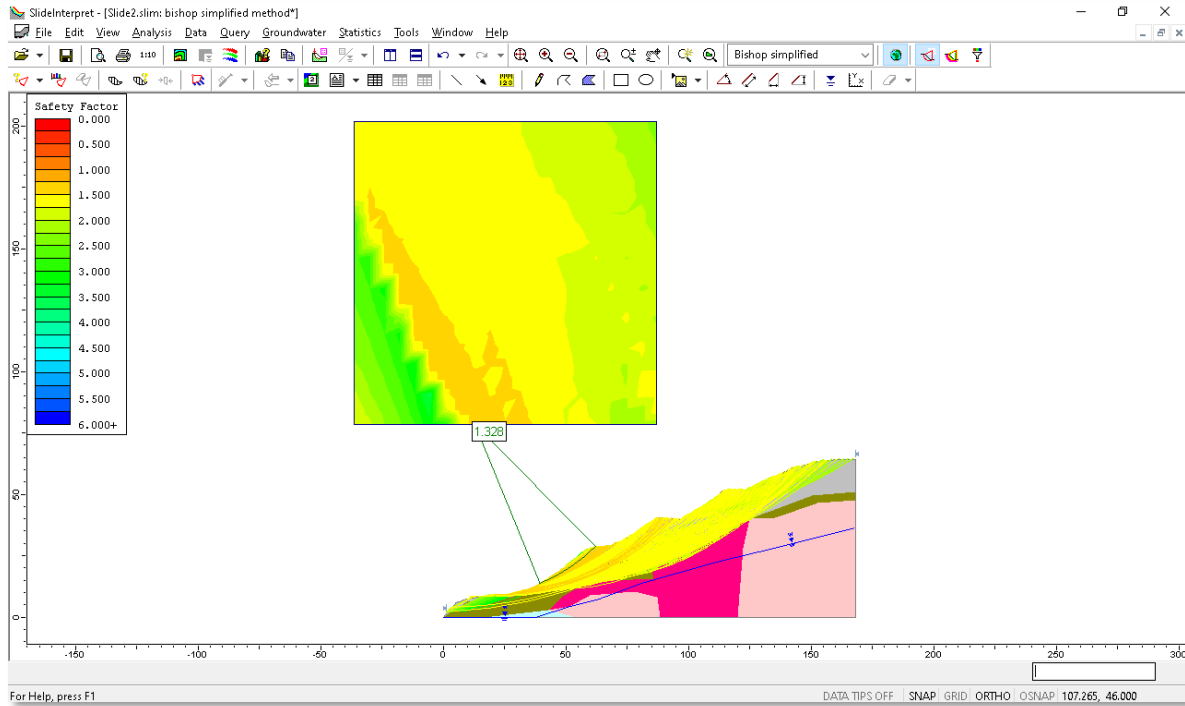


Figura 19: Análisis de Estabilidad sección 2 Slide. FS=1.328
Elaboración: Propia

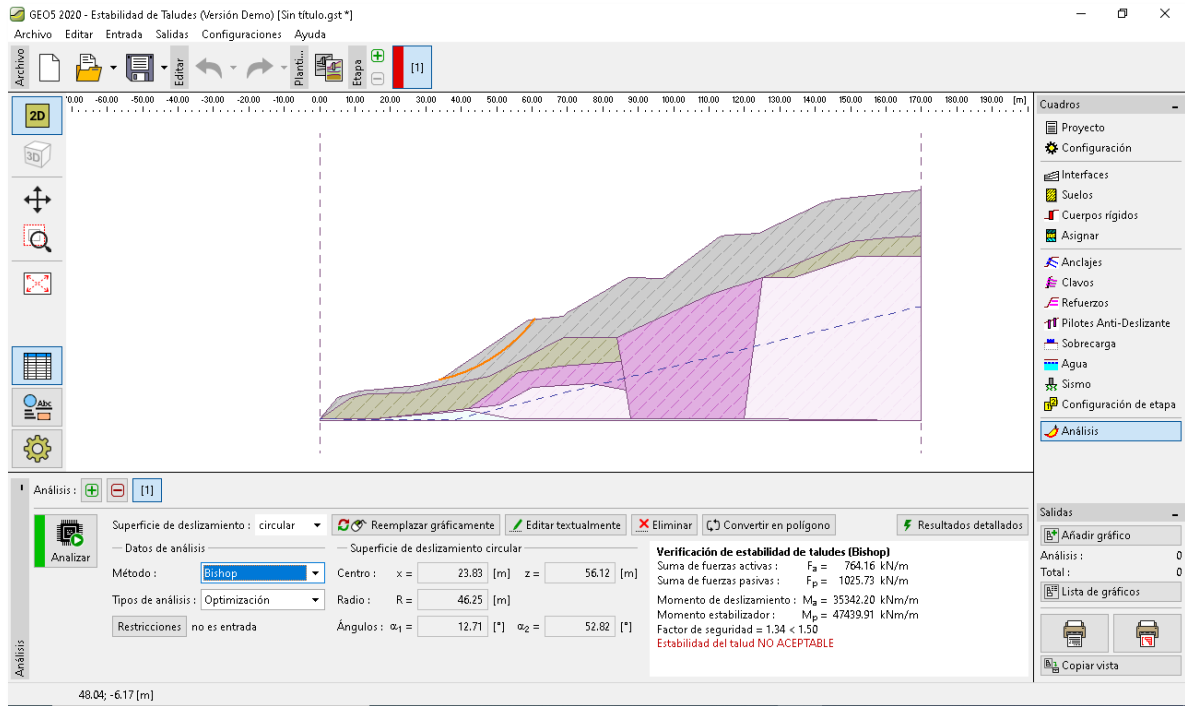


Figura 20: Análisis de Estabilidad sección 2 Geo 5. FS=1.34
Elaboración: Propia

Perfil 3

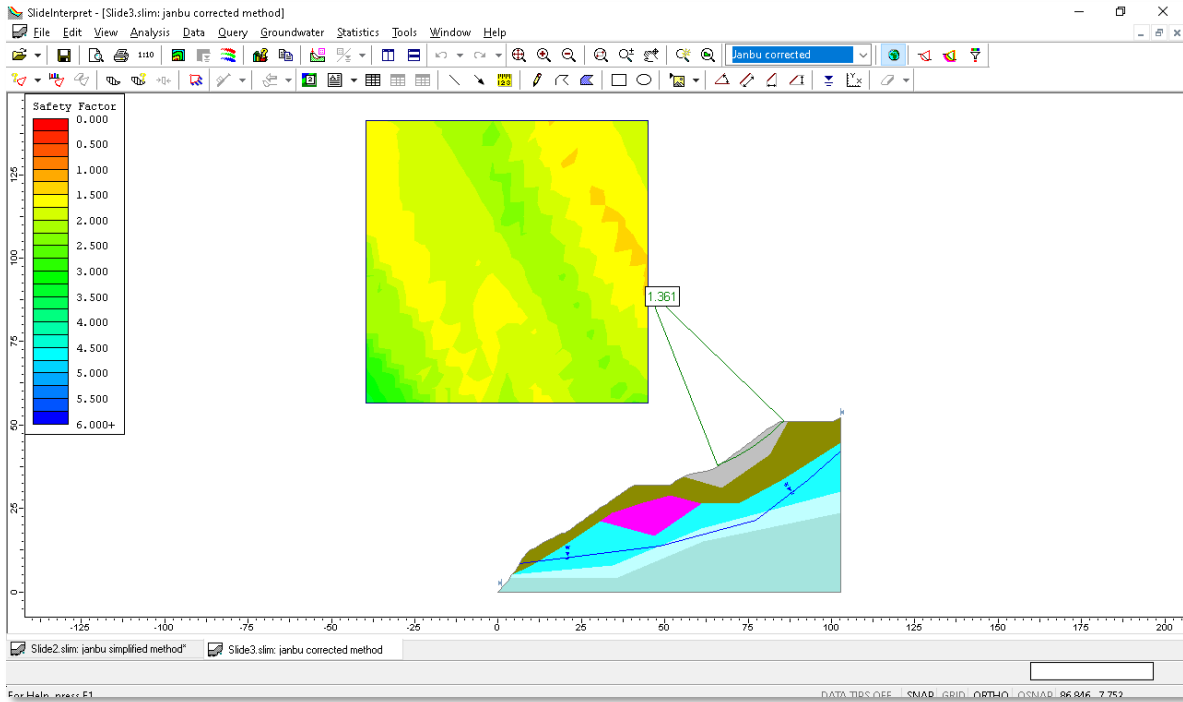


Figura 21: Análisis de Estabilidad sección 3 Slide. FS=1.361
Elaboración: Propia

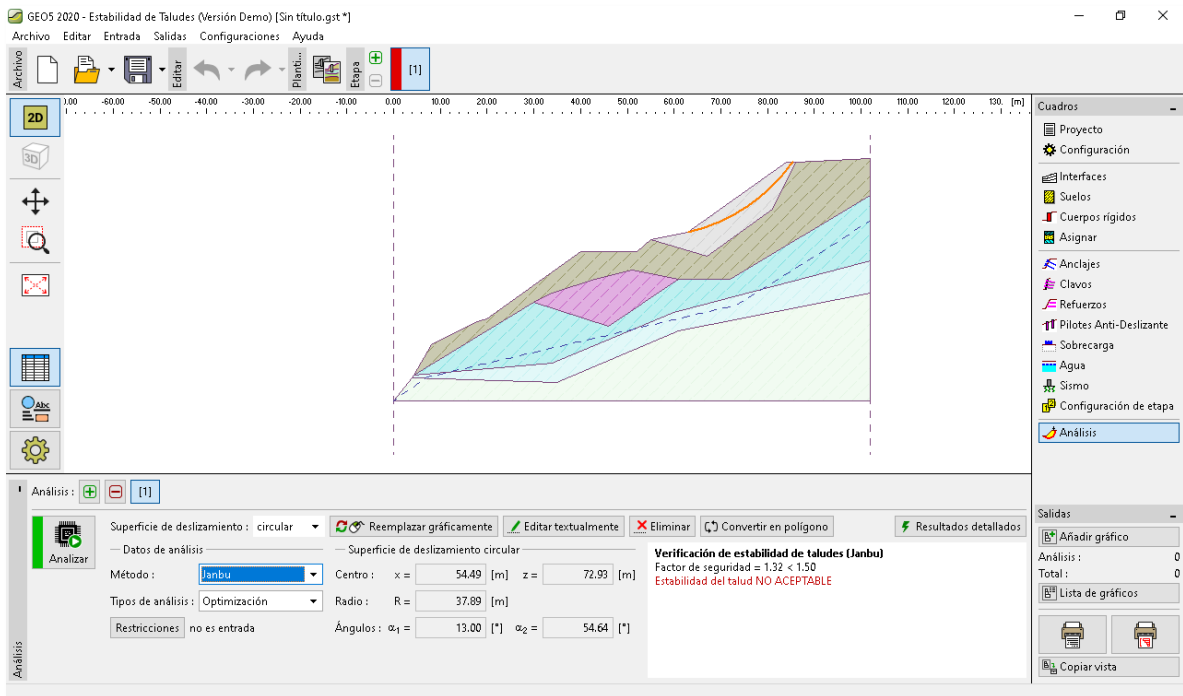


Figura 22: Análisis de Estabilidad sección 3 Geo 5. FS=1.32
Elaboración: Propia

Perfil 4:

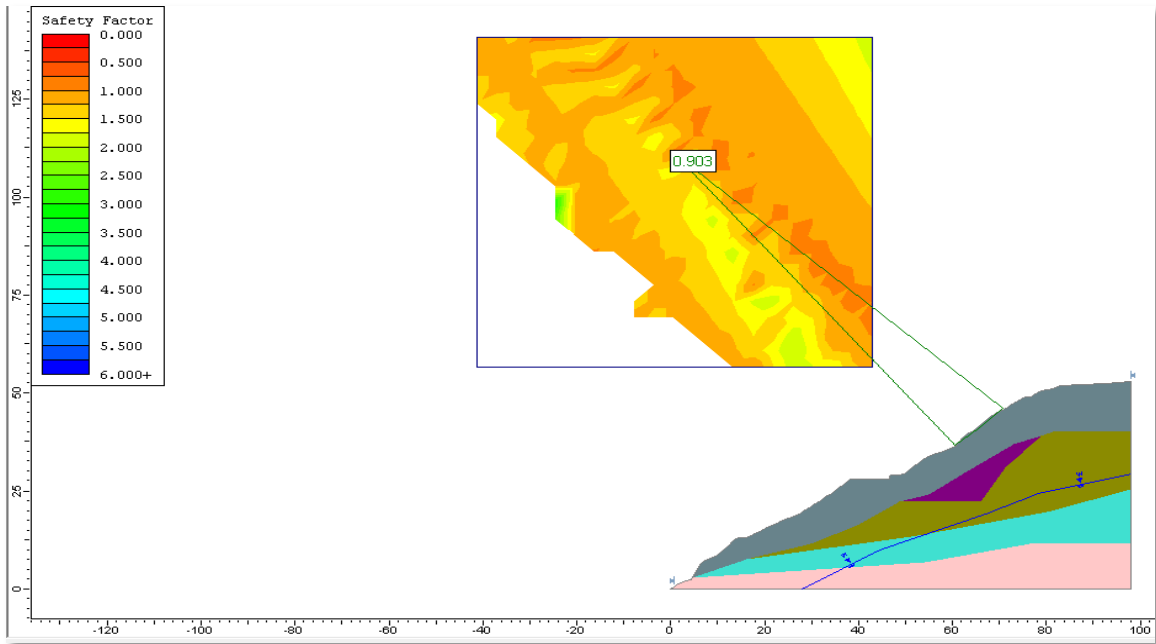


Figura 23: Análisis de Estabilidad sección 4 Slide. FS=0.903
Elaboración: Propia

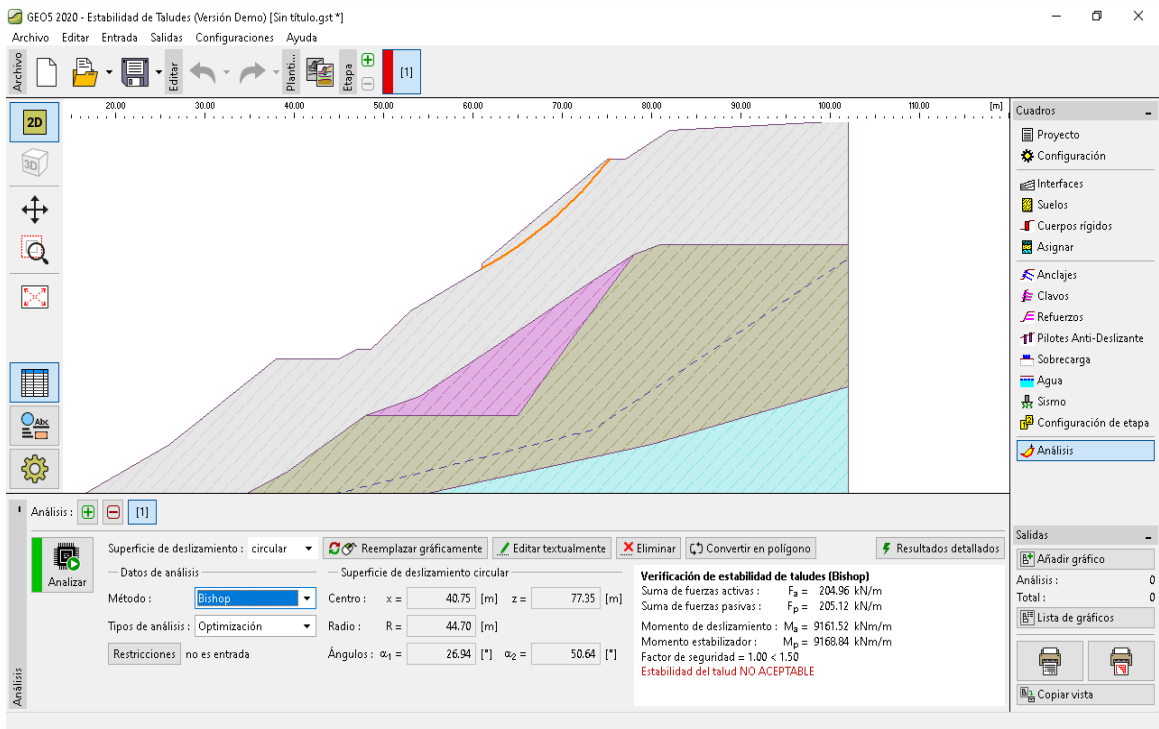


Figura 24: Análisis de Estabilidad sección 4 Geo 5. FS=1.00
Elaboración: Propia

Factor de Seguridad

Tabla 7: Factor de Seguridad de las 4 secciones modeladas

Sección/Factor de Seguridad	Slide Spencer	Geo5 Spencer	Slide Janbu	Geo5 Janbu	Slide Bishop	Geo5 Bishop
1	1.151	1.16	1.108	1.19	1.152	1.17
2	-	1.34	1.310	1.34	1.328	1.34
3	1.345	1.32	1.361	1.32	1.349	1.32
4	-	1.00	0.899	1.00	0.903	1.00

En términos generales, como se puede observar en la tabla 7, las modelaciones realizadas de cada una de las secciones y por cada uno de los métodos en los dos programas arrojan resultados muy similares, lo que nos puede dar confiabilidad en la modelación de estos.

Para dar un análisis de la estabilidad del talud según los resultados de factor de seguridad arrojados en los programas se puede tomar varias consideraciones, una de estas es la propuesta del Geotechnical Engineering Office (2004), en la cual recomienda realizar la evaluación teniendo en cuenta el nivel de riesgo por afectación de vidas humanas y pérdidas económicas (Tabla 8).

Tabla 8: Factor de seguridad recomendado, incluyendo el riesgo de pérdidas de vidas y pérdidas económicas (Geotechnical Engineering Office, 2004)

Riesgo por pérdidas económicas	Factor recomendado para las categorías de riesgo de vidas		
	Sin afectación	Bajo	Alto
Sin afectación	>1.0	1.2	1.4
Bajo	1.2	1.2	1.4
Alto	1.4	1.4	1.4

Según esta tabla podríamos clasificar el talud con un factor de seguridad de 1.4, teniendo en cuenta que tendría un riesgo por pérdidas económicas alto y riesgo de vida alto también. Por lo tanto, para las secciones nuevas que se analizaron habría que proponer una forma de mitigar el riesgo.

Otra de las formas para establecer el cumplimiento de los factores de seguridad en el talud, es con lo establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, basándose en la tabla 1, en la cual indica que para condiciones estáticas y en la fase de diseño el factor de seguridad debe ser mínimo de 1.5. Por lo cual tampoco las secciones modeladas cumplirían y serían inestables en esa zona de falla.

Cabe resaltar que las todas las superficies de falla se presentaron potencialmente en los llenos antrópicos y sin modelarlas con ningún tipo de obra de mitigación o estabilización.

Comparación:

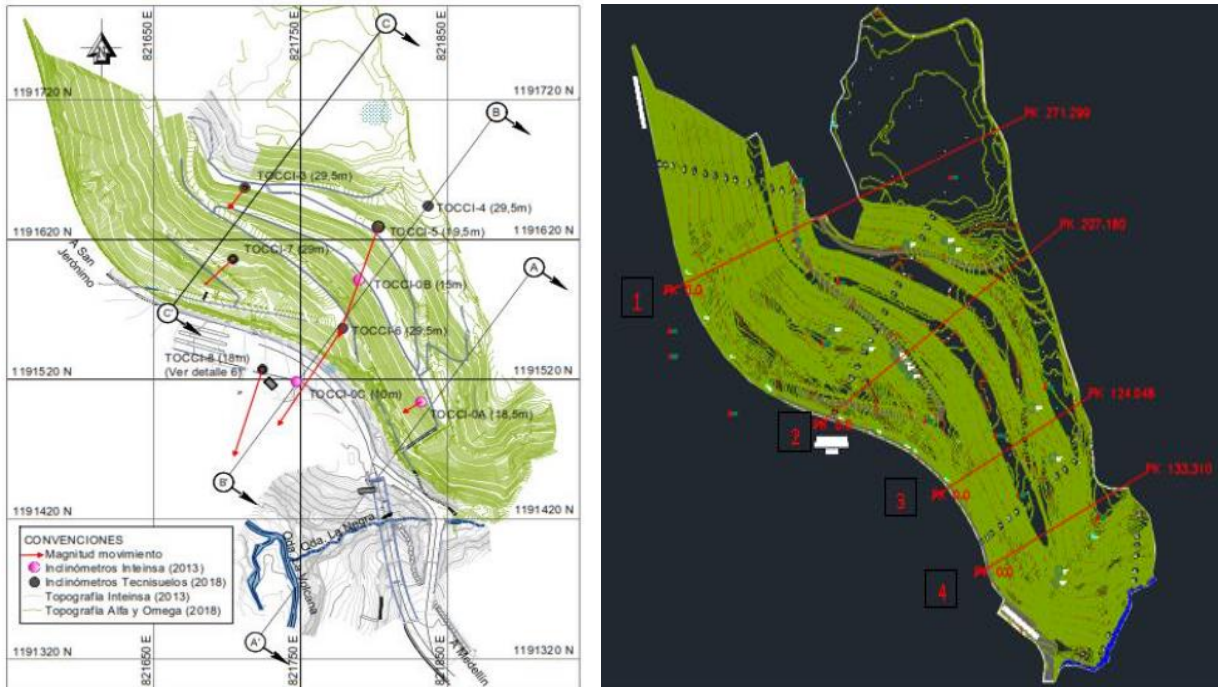


Figura 25: Secciones Alfa y Omega y secciones propias.
Elaboración: propia

Teniendo en cuenta los factores de seguridad obtenidos en este estudio y comparándolos con los de Alfa y Omega, es evidente que en ninguno de los dos estudios cumple con el factor de seguridad mínimo establecido en la norma NSR-10, y este podría disminuir según el agua que se infiltre en el talud, por lo tanto, es importante que las obras de drenaje existentes estén en buen estado y se realicen las obras establecidas en la consultoría realizada por Alfa y Omega.

Tabla 9: Comparación Factor de seguridad de secciones similares

Sección Alfa y Omega	Sección Propia	Alfa y Omega	Propios
B	2	1.15	1.33
C	1	1.3	1.16

Como se muestra en figura 26 y 27 la modelación de la sección AA, antes y después de las obras construidas propuestas por la consultoría realizada por Inteinsa en el año 2013, se observa que mejora considerablemente su factor de seguridad, pasando de 0.95 a 2.16 brindándole estabilidad a dicha zona.

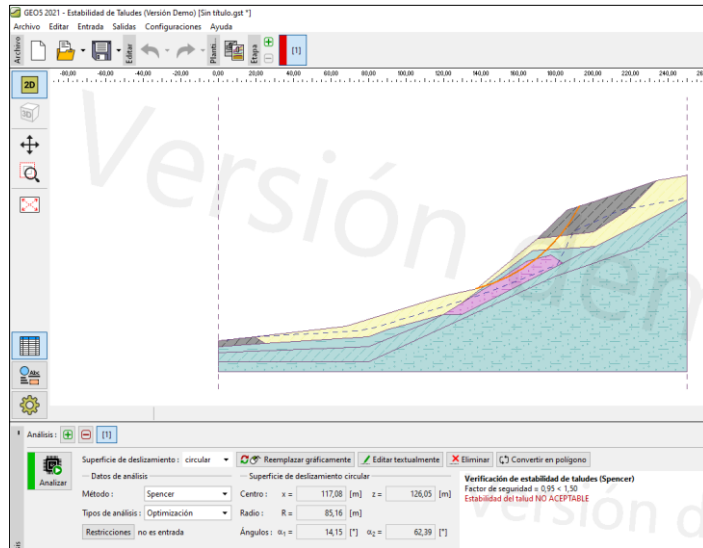


Figura 26: FS de la sección AA, sin estabilizar modelada con GEO5.

Elaboración: propia

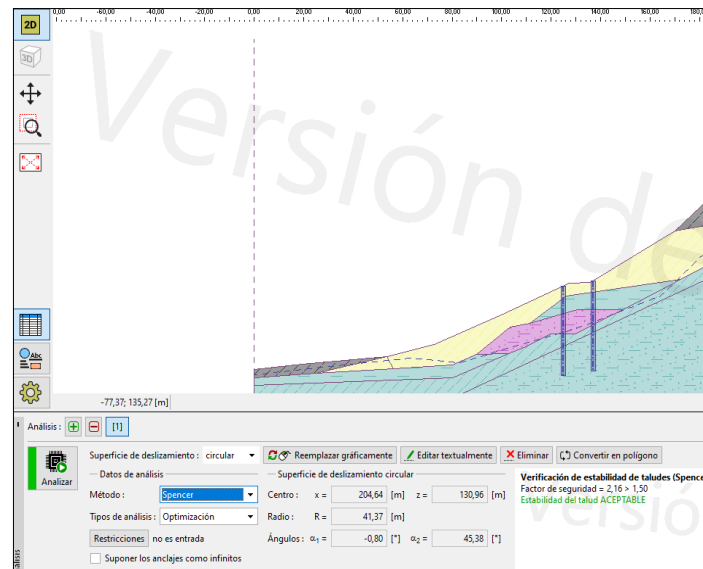


Figura 27: FS después de la Zona estabilizada (Sección AA) modelada con GEO5.

Elaboración: propia

Zona propuesta para estabilizar por Alfa y Omega

Como se puede observar en a figura 28 y 29, la superficie de falla que se analizó para la sección B en caso de Alfa y Omega y en el programa GEO5 en el caso de este estudio coinciden. El factor de seguridad para Alfa y Omega fue de 1.15 y el de GEO5 es de 1.08, estos pueden presentar variación debido a la posición del nivel freático o pequeñas diferencias en los espesores de los estratos de suelo. Sin

embargo, coinciden en que los valores del factor de seguridad no son aceptables para la NRS-10.

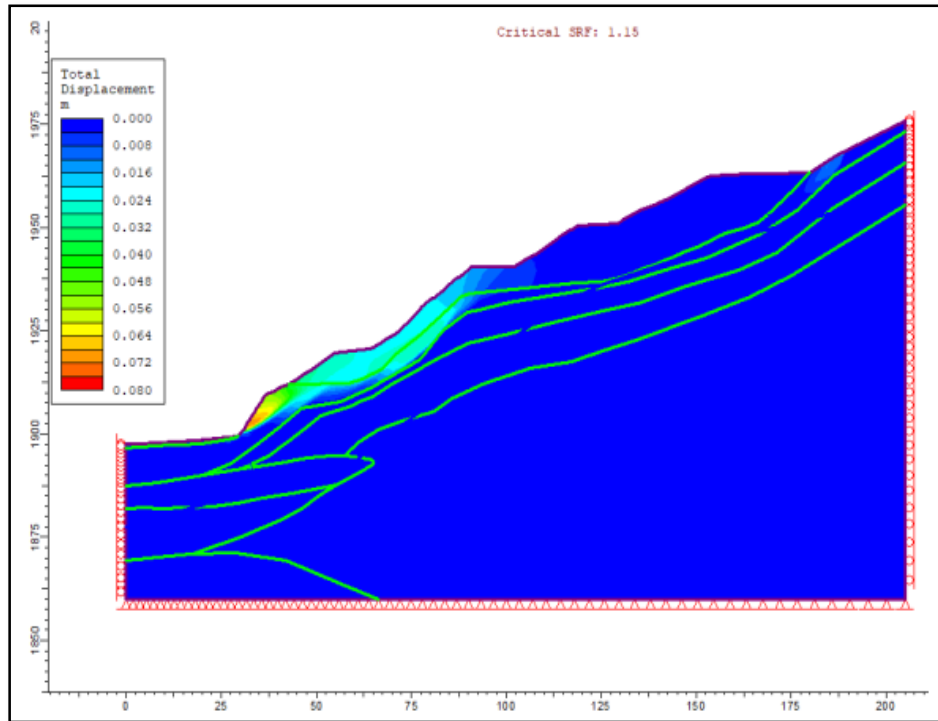


Figura 28: Modelación sección B Alfa y Omega
Elaboración: propia

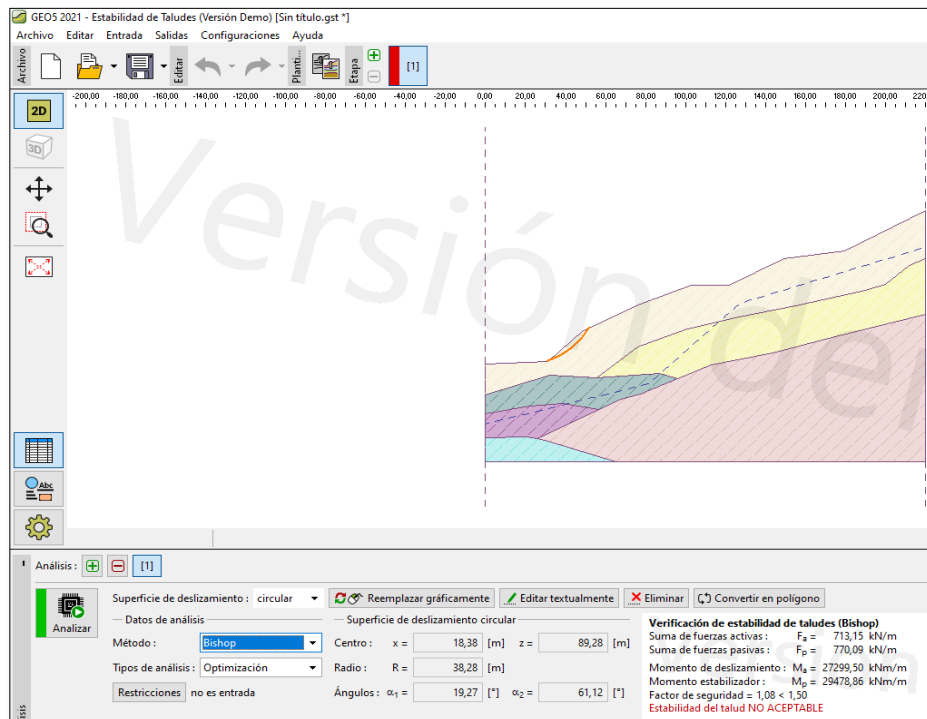


Figura 29: Modelación sección B con GEOS
Elaboración: propia

Lo mismo sucede para el caso del análisis de la estabilidad con sismo, tomando como $K_v=0.05$ y $K_h=0.13$. Para Alfa y Omega el valor de factor seguridad es de 0.94 y para la modelación de GEO5 es de 0.86, mostrados en la figura 28.

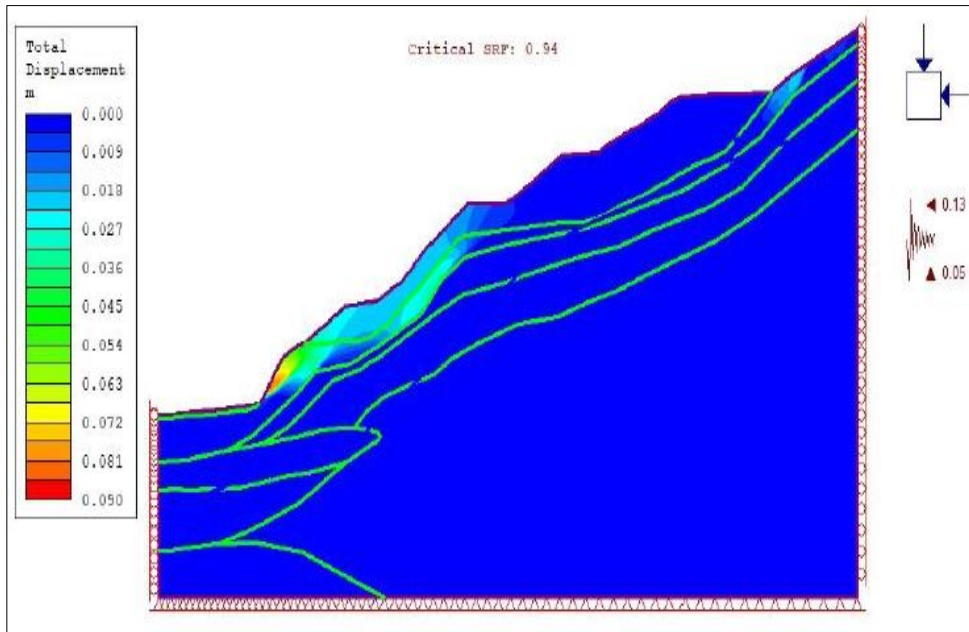


Figura 30: Modelación sección B Alfa y Omega con sismo
Elaboración: propia

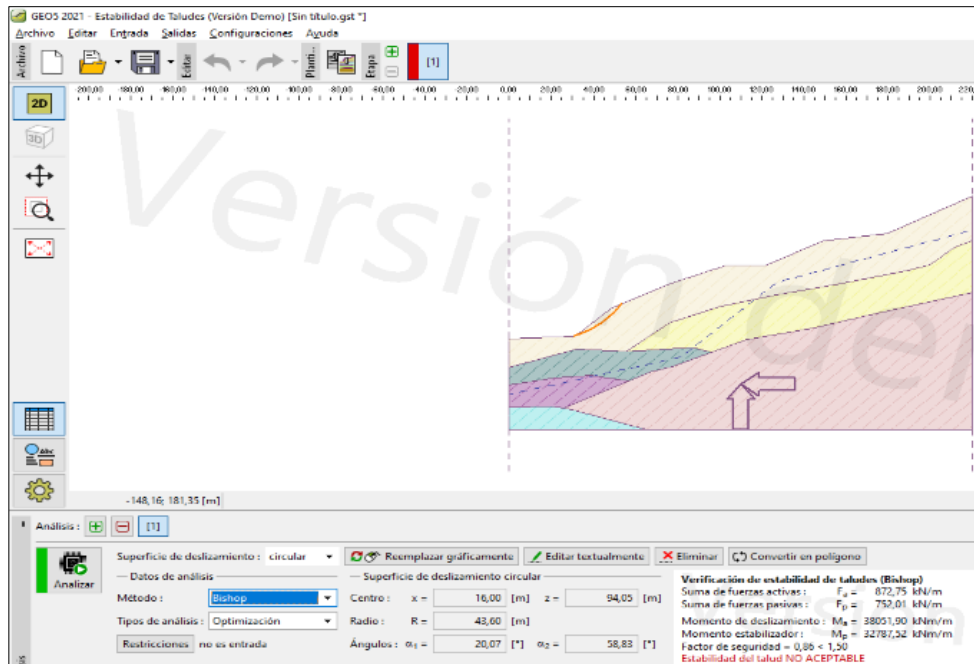


Figura 31: Modelación con GEO5 con sismo
Elaboración: propia

Una vez modelado la sección del talud (sección BB), con la propuesta dada por Alfa y Omega, la cual es la construcción de anclajes activos compuesto por 6 filas longitudinales variables, con una capacidad de 30 Ton por anclaje, cada uno formado por 3 torones de $\frac{1}{2}$ " y de una longitud de 30m de profundidad de los cuales 15m corresponden al bulbo y los otros 15m de longitud libre. Se puede observar en la figura 29 que la estabilidad mejora y pasa de tener un factor de seguridad de 1.08 a 1.75, en condiciones estáticas según la modelación arrojada por el programa GEO5.

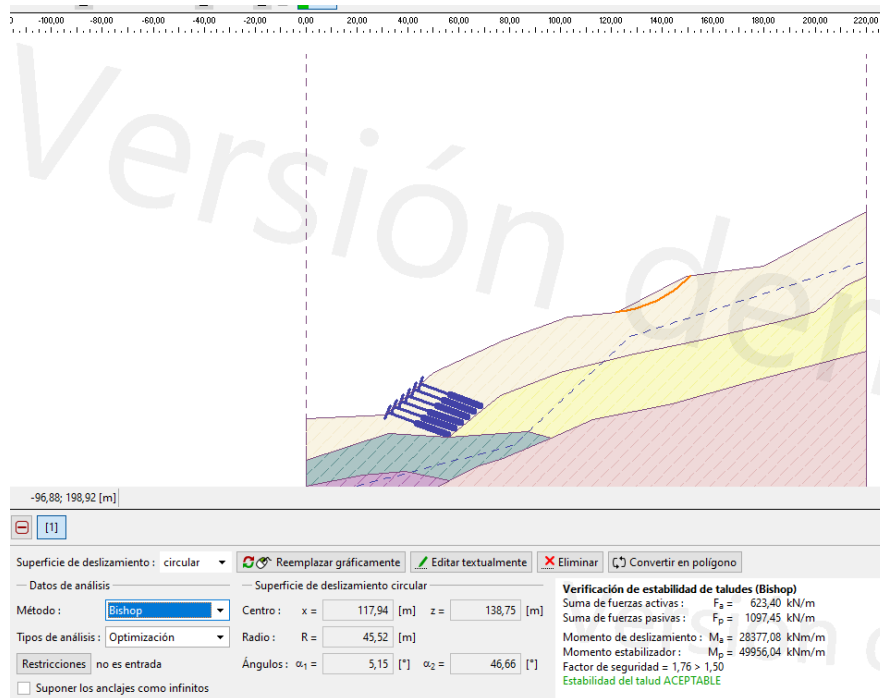


Figura 32: FS de la Zona a estabilizar en la consultoría de Alfa y Omega (Sección BB) modelada con GEO5.
Elaboración: propia

8. Conclusiones y Recomendaciones

- Con el factor de seguridad arrojado para la sección B obtenido por Alfa y Omega o para la sección modelada con GEO5 en este estudio se puede concluir, que la zona requiere una estabilización y según lo expuesto por Alfa y Omega en su informe de consultoría, la mejor propuesta y alternativa son los anclajes activos, mejorando notablemente el factor de seguridad de la zona.
- En la sección 3 y 4 la cual es la más cercana a la sección analizada por Inteinsa sección AA, no se presenta una superficie de falla potencial continua, según el análisis realizado de dicha sección con las obras ya construidas se observan condiciones de estabilidad para el sector oriental del depósito El Galpón cumpliendo con lo establecido con la NSR-10.
- Como está establecido en los estudios de Alfa y Omega, sí es necesario la construcción de nuevas cunetas, pero también se hace necesario el mantenimiento de las cunetas existentes dado el estado actual de las mismas según lo que se observó en las salidas de campo, todo para darle una mejor eficiencia al drenaje del talud y así evitar la mayor infiltración de agua.
- Al no contar con la topografía completa de la sección 1 como se evidencia en los planos mostrados, no se podría establecer ninguna consideración en cuanto a su estabilidad ni en las zonas aledañas a esta.
- El comparativo entre la modelación elaborada por el método de elementos finitos con fundamento en los datos obtenidos a partir de la información suministrada mediante el uso de inclinómetros, en comparación con la elaborada mediante el método Bishop del programa Geo5 y Slide es similar, de allí la importancia de la determinación de los parámetros geotécnicos del suelo y de la exploración de campo.

9. Referencias Bibliográficas

- [1] Bravo. J. (22 de diciembre de 2016). Tres décadas de grandes obras. El Mundo.com. Recuperado de <https://www.elmundo.com/portal/pagina.general.impresion.php?idx=113936>.
- [2] Resolución Por la cual se imponen medidas adicionales en desarrollo de un control y seguimiento ambiental en atención a una queja 1649. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 21 de diciembre de 2015.
- [3] INTEINSA S.A. “Consultoría para la realización de los estudios geotécnicos y diseños de ingeniería necesarios para las obras de mitigación y estabilización de puntos críticos en la conexión vial Guillermo Gaviria Correa y la antigua vía al mar Gonzalo Mejía – sitio crítico 02 puente quebrada la negra y depósito el galpón”. 2013. Medellín-Antioquia.
- [4] ALFA Y OMEGA INGENIEROS S.A.S. “Estudios geotécnicos y diseños de ingeniería necesarios para las obras de estabilización del depósito el Galpón en el proyecto Aburrá – río Cauca”. 2018. Medellín-Antioquia.
- [5] Grosse, E., 1926. Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia: Berlín, Verlag Von Dietrich Reimer (Ernst Vohsen), 361 P.
- [6] Mejía, N., 1984. Geología y geoquímica de las planchas 130 (Santafé de Antioquia) y 146 (Medellín Occidental), escala 1:100.000, memoria explicativa. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).
- [5] CONSORCIO MICROZONIFICACIÓN. “Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, sabaneta, La estrella, Caldas y Envigado”. 2006
- [6] GONZALES H.- INGEOMINAS. “Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales. Escala 1:400.000”. 2001. Disponible en: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040024267/documento/pdf/0101242671101000.pdf>
- [7] Botero, G., 1963. Libro de correspondencia tomo I. carta a Jaime De Porta, mayo de 1963. Archivo Museo de Geociencias, Facultad de Minas.
- [8] Arias, L. A., 1995. El Relieve de la zona central de Antioquia: Un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia Vol. 10, pp. 19-24.

- [9] Tierra y Tecnología, (2016). Slide la mejor aplicación de estabilidad de taludes. España. Disponible en: <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/#:~:text=Slide%20es%20un%20software%20de,el%20c%C3%A1lculo%20de%20la%20estabilidad.&text=El%20programa%20Slide%20ha%20ido,ordenador%20en%20los%20%C3%BAltimos%20a%C3%B1os.>
- [10] Fine. Geo5. Estabilidad de Taludes. España. Disponible en: <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/estabilidad-de-taludes/>
- [11] MARTÍNEZ, A.P. (2015). CEDEX. España. http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/LG/LINEAS/ENSGEOLAB.htm
- [12] RIVERA, M. PIEDRA, R. GARCÍA, P. Ensayos geofísicos de refracción sísmica y de medición de ondas de corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones. 2016. Universidad Nacional de Ingeniería. Disponible en: <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/download/18630/18868/>
- [13] Patiño, J., Noreña, J, A., (1984). Estudio de las Rocas Metamórficas en la Parte Sur del Municipio de Caldas, Antioquia. Tesis de grado Facultad de Minas.
- [14] Geotechnical Engineering Office (2004). Application of Back Analysis Approach to the Design of Slope Preventive or Remedial Works (GEO TGN No. 6). Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 2 p.
- [15] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica.

10. Anexos

Sección 2: GEO5 Janbu

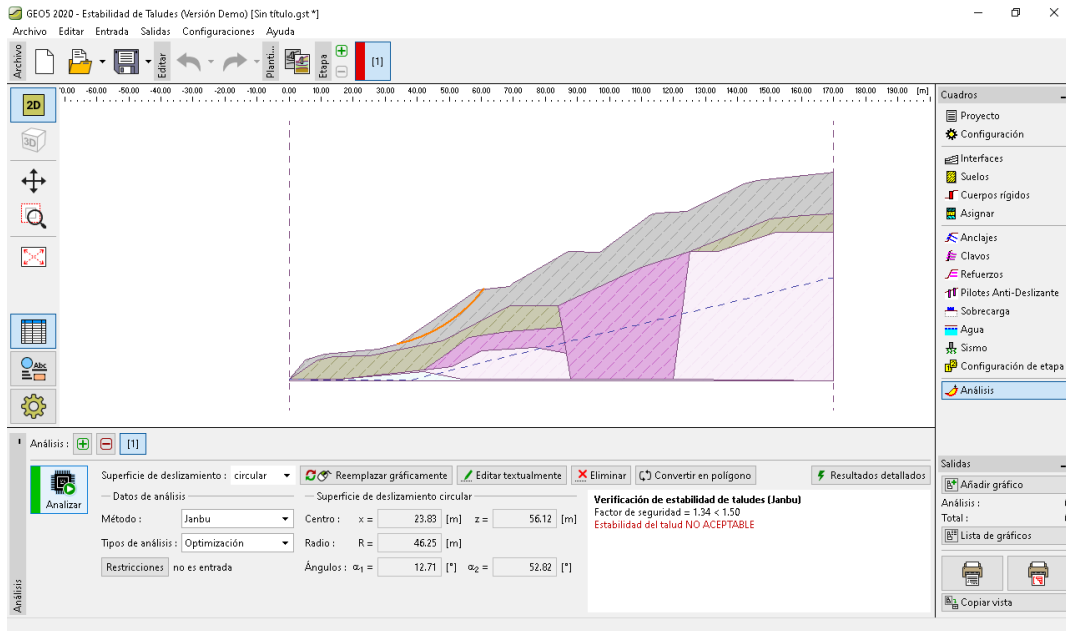


Figura 33: Modelación de la sección 2 por el método de Janbu.
Elaboración: Propia

Sección 2: GEO5 Spencer

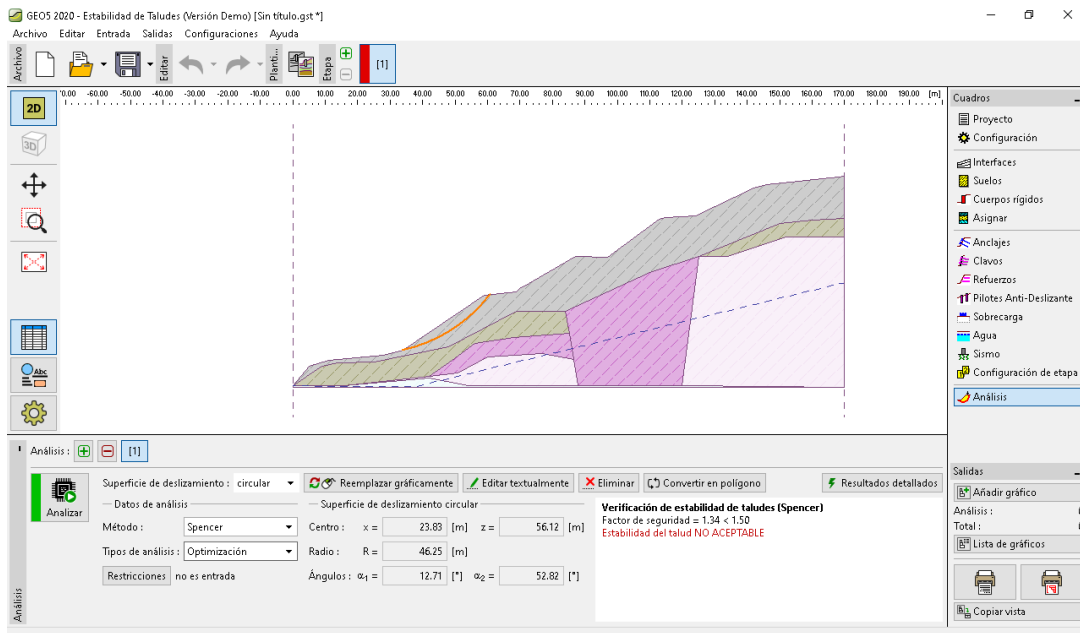


Figura 34: Modelación de la sección 2 por el método de Spencer.
Elaboración: Propia

Sección 3: Slide Bishop

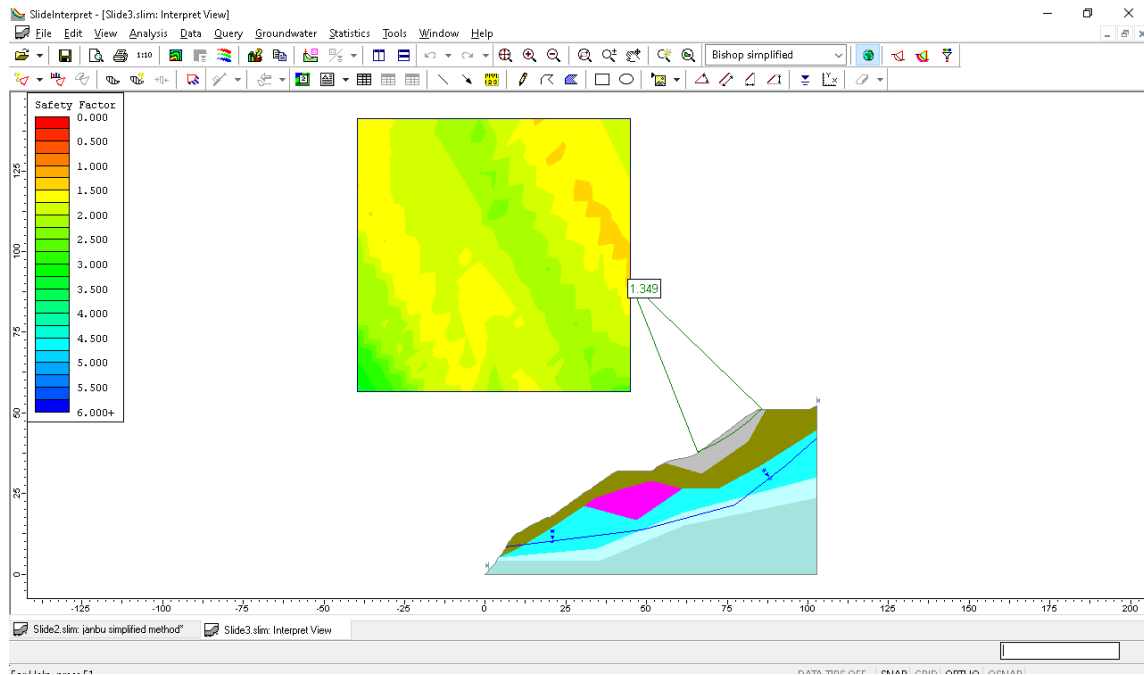


Figura 35: Modelación en Slide de la sección 3 por el método de Bishop.
Elaboración: Propia

Sección 3: Slide Spencer

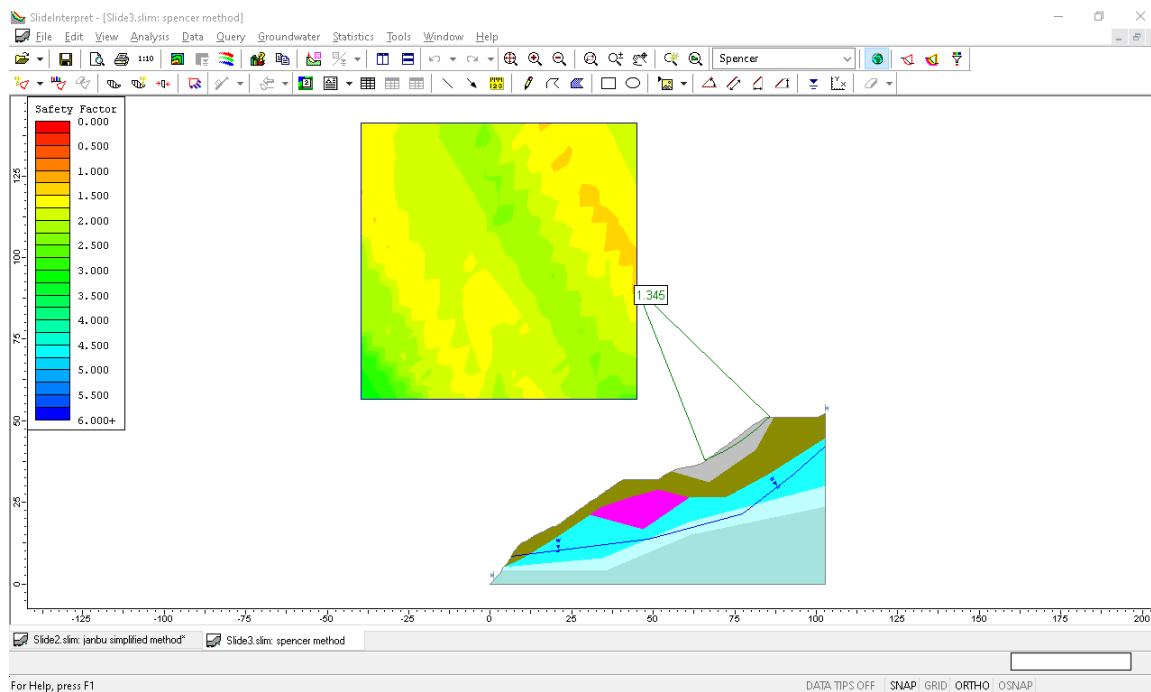


Figura 36: Modelación en Slide de la sección 3 por el método de Spencer.
Elaboración: Propia

Sección 3: GEO5 Bishop

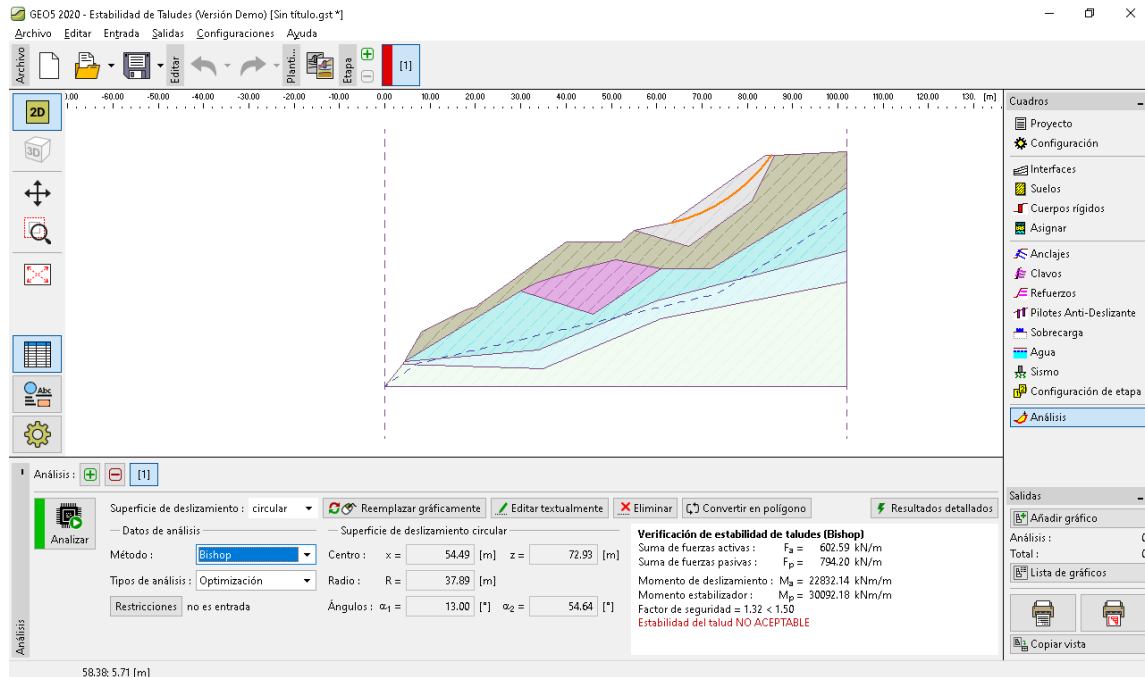


Figura 37: Modelación en Geo5 de la sección 3 por el método de Bishop.
Elaboración: Propia

Sección 3: GEO5 Spencer

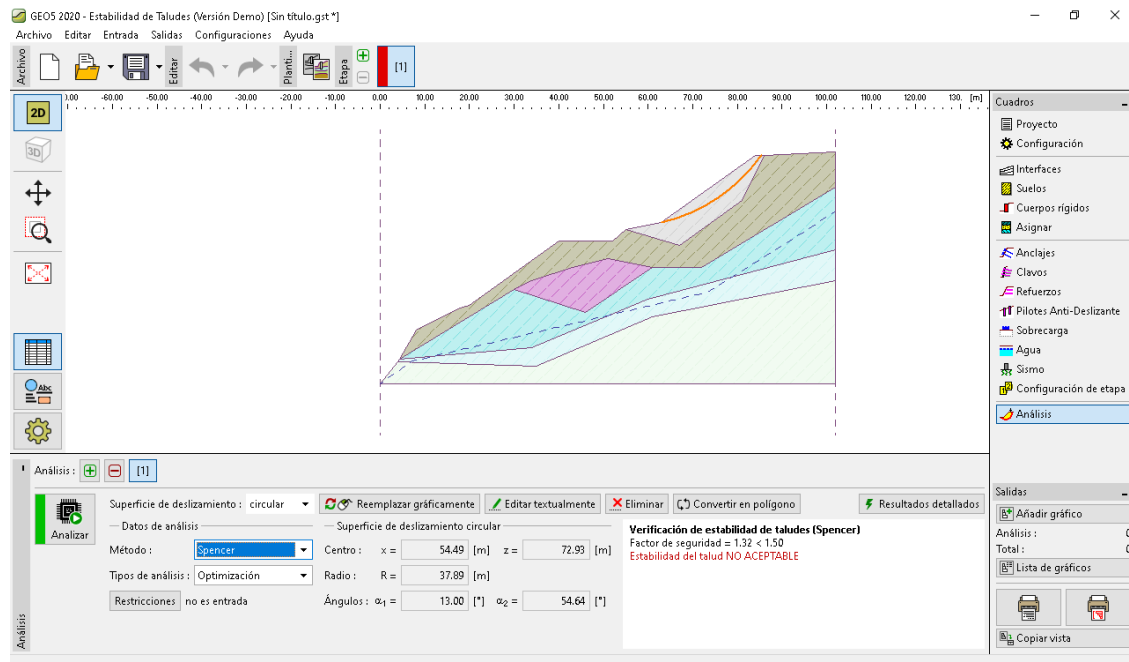


Figura 38: Modelación en Geo5 de la sección 3 por el método de Spencer.
Elaboración: Propia