

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación geológica, geomecánica y consideraciones
para el prediseño de la estabilidad del talud del
Santuario Blanca Estrella del Mar en el cerro de Olón,
Santa Elena-Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Geología

Presentado por:

Roberth Patricio Pineda Ruiz

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado primeramente a Papito Dios y a la Virgencita María, sin la bendición de ellos no pudiese cumplir ninguno de mis sueños y por permitirme alcanzar este logro importante.

A mis padres y hermanos que, con su gran esfuerzo, dedicación, paciencia y ayuda me incentivaron para conseguir mi objetivo, espero ser recíproco con todo el apoyo que me han brindado y llenarlos de orgullo.

A mi abuelito Luis y mi prima Josseline, que me acompañan desde el cielo y de quienes aprendí que ante las adversidades que se presenten en la vida siempre debemos sonreír y ser felices, gracias por todo, el cielo ha ganado unos seres especiales.

A mis sobrinos que son mi inspiración para salir adelante.

A Isabel por su cariño, paciencia e incondicional ayuda en cada momento de mis estudios finales y por alentarme cada día para ser un buen profesional y una persona de bien.

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres, hermanos y sobrinos por todo el apoyo incondicional brindado a lo largo de mis años, gracias por creer y confiar en mí.

Mis más sinceros agradecimientos a los doctores Paúl Carrión, Fernando Morante y Javier Montalván por guiarme en la preparación de este trabajo y por sus consejos que sirvieron en mi formación profesional.

A Boris, Joselyne, Carolina, Gabriela, Franco y Lady por el apoyo brindado durante las campañas geofísicas para desarrollar la presente investigación y a todo el personal del CIPAT: Gabriela y Don Carlos, por todos los buenos momentos y la buena camaradería durante mi estancia en el Centro.

A mis amigos Ximena Quiñonez, Michelle Villalta y John Peter Padilla por las incontables risas que pasamos a lo largo de nuestra etapa universitaria.

A los Ingenieros Andrés Sánchez, Maribel Aguilar, María Jaya, Cristian Sánchez y Josué Briones por la ayuda brindada para desarrollar mi proyecto de grado.

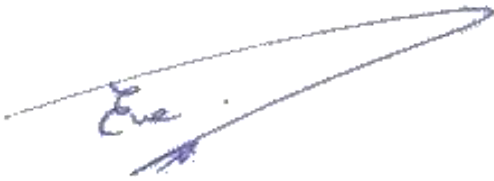
DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Roberth Patricio Pineda Ruiz doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Roberth Patricio Pineda Ruiz

EVALUADORES

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eva', with a long, sweeping horizontal stroke extending to the right.

Eva Rivas Pozo MSc.
PROFESOR DE LA MATERIA

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Paúl', with a large, stylized initial 'P' and a horizontal stroke at the bottom.

Ing. Paúl Carrión PhD.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La comuna Olón posee una de las playas más tranquilas de la costa ecuatoriana, posee algunos atractivos turísticos de los cuales se destaca el Santuario Blanca Estrella de Mar, que se encuentra sobre un acantilado de aproximadamente 40 metros de altura. En este Santuario descansa la Imagen de la Virgen María en su advocación a la Rosa Mística por tal motivo forma parte de la ruta de las siete iglesias en la Península de Santa Elena, siendo continuamente visitado por turistas. En la actualidad, la erosión, la baja resistencia y cohesión que presentan los materiales que conforman el macizo han generado inestabilidad en gran parte del talud. El objetivo de este proyecto es evaluar la estabilidad del acantilado de Olón, mediante el análisis geomecánico de imágenes obtenidas por dron, geología y geofísica para las consideraciones en el prediseño de estabilidad del talud. La metodología de este trabajo comprende cuatro fases: i) Procesamiento y sistematización de información, ii) caracterización geológica y geomecánica de la zona. iii) evaluación de estabilidad y susceptibilidad al desprendimiento del talud y, iv) cálculo del factor de seguridad por el método de Morgenstern-Price para las propuestas de estabilización. De acuerdo con los resultados obtenidos, el acantilado presenta una muy alta susceptibilidad al desprendimiento, debido a sus características litológicas inherentes respecto a la cohesión, y las condiciones antrópicas que se han desarrollado en los últimos años, por tal motivo el prediseño contempla múltiples medidas que se integran, utilizándose la implementación de anclajes perpendiculares, utilización de hormigón proyectado en la cara el talud, control del sistema de drenaje hacia el talud, y obras complementarias de mantenimiento periódico.

Palabras Clave: Estabilidad, Slope Mass Rating, Meteorización esferoidal, Susceptibilidad al desprendimiento, Factor de Seguridad.

ABSTRACT

Olón has one of the quietest beaches of the Ecuadorian coast, it has some tourist attractions of which the Blanca Estrella de Mar Sanctuary stands out, which is located on a cliff approximately 40 meters high. In this Sanctuary rests the Image of the Virgen María in its invocation to the Rose Mystical for this reason it is part of the route of the seven churches in the Santa Elena Province, being continuously visited by tourists. Actually, the erosion, the low resistance and cohesion presented by the materials that make up the massif have generated instability in much of the slope. The aim of this project is to evaluate the stability of the cliff of Olón, through the geomechanical analysis of images obtained by drone, geology and geophysics for considerations in the pre-design of slope stability. The methodology of this work includes four phases: i) Information processing and systematization, ii) Geological and geomechanical characterization of the area. iii) evaluation of stability and susceptibility to slope detachment and, iv) calculation of the safety factor by the Morgenstern-Price method for stabilization proposals. According to the results obtained, the cliff has a very high susceptibility to detachment, due to its inherent lithological characteristics regarding cohesion, and the anthropic conditions that have developed in recent years, for this reason the predesign contemplates multiple measures that they are integrated, using the implementation of perpendicular anchors, use of concrete projected on the side of the slope, control of the drainage system towards the slope, and complementary works of periodic maintenance.

Keywords: Stability, Slope Mass Rating, Spheroidal Meteorization, Susceptibility to detachment, Safety Factor.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
CAPÍTULO 1	15
1. Introducción	15
1.1 Preámbulo	15
1.2 Descripción del problema	16
1.3 Justificación del problema	17
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo General	19
1.4.2 Objetivos Específicos	19
1.5 Ubicación	19
1.6 Restricciones en el desarrollo del proyecto	20
1.6.1 Recursos	21
1.7 Diseño Metodológico	22
1.7.1 Cronograma	23
1.8 Estado del arte	26
1.8.1 Modelo geodinámico de la costa ecuatoriana	26
1.8.2 Clasificación geomecánica	26
1.8.3 Prospección geofísica	27

1.8.4	Sensores remotos	28
1.9	Estudios previos en la zona de interés	29
CAPÍTULO 2		30
2.	Marco geológico	30
2.1	Geomorfología.....	30
2.2	Estratigrafía	30
2.2.1	Grupo Ancón.....	31
2.3	Prospección Geofísica.....	33
2.3.1	Generalidades.....	34
2.3.2	Métodos Geoeléctricos	34
2.3.3	Medición de Resistividad.....	34
2.3.4	Medición en campo y procesamiento de datos.....	38
2.4	Principios geomecánicos	39
2.4.1	Factores que influyen en la estabilidad del talud	39
2.4.2	Litología	40
2.4.3	Estructuras geológicas	40
2.4.4	Factores hidrogeológicos	41
2.4.5	Propiedades geomecánicas de los macizos rocosos	42
CAPÍTULO 3		44
3.	Metodología.....	44
3.1	Fase I: Procesamiento y sistematización de información existente.....	45
3.2	Fase II: Trabajo de campo	48
3.2.1	Visitas de campo.....	48
3.2.2	Sobrevuelos con el dron.....	49
3.2.3	Geología	50
3.2.3	Caracterización geomecánica	54

3.3	Fase III: Evaluación de estabilidad	58
3.3.1	Clasificación geomecánica	59
3.3.2	Análisis de susceptibilidad al desprendimiento.....	64
3.3.3	Factor de Seguridad (FS).....	70
CAPÍTULO 4		72
4.	Resultados y análisis	72
4.1	Caracterización geológica	72
4.2	Geofísica	73
4.2.1	Sondeo Eléctrico Vertical:	73
4.2.2	Tomografía Geoeléctrica.....	77
4.3	Propiedades geomecánicas.....	83
4.4	Rock Quality Designation (RQD)	83
4.4.1	Zona 1.....	84
4.4.2	Zona 2.....	88
4.5	Clasificación Geomecánica	90
4.5.1	RMR (Rock Mass Rating).....	90
4.5.2	SMR (Slope Mass Rating).....	91
4.6	Evaluación de susceptibilidad al desprendimiento:	94
4.6.1	Condiciones actuales	94
4.6.2	Condiciones extremas.....	96
4.7	Factor de seguridad.....	97
4.7.1	Perfil 1.....	98
4.7.2	Perfil 2.....	98
4.7.3	Perfil 3.....	99
4.7.4	Perfil 4.....	99
4.7.5	Perfil 5.....	100

4.8	Análisis de resultados.....	101
CAPÍTULO 5		102
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	102
5.1	Conclusiones	102
5.2	Recomendaciones.....	103
BIBLIOGRAFÍA		106
6.	Bibliografía.....	106
ANEXOS		113
APÉNDICE A.....		115
6.1	Costos de ejecución del proyecto	115
6.2	Coste de personal	115
6.3	Coste de recursos materiales	115
6.3.1	Materiales fungibles	116
6.3.2	Gastos varios	117
6.4	Costos parciales	117
6.5	Gastos generales y gastos totales	118
6.6	Costos totales del proyecto	118

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Faculta de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
CIPAT	Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
CSMR	Chinese Slope Mass Rating
SMR	Slope Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
TG	Tomografía Geoeléctrica
FS	Factor de Seguridad
Fm	Formación geológica
SGR	Secretaría de Gestión de Riesgos
JASRAPO	Junta Administradora del Sistema Regional de Agua Potable “Olón”

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
m ²	Metro cuadrado
ρ	Rho
ΔV	Variación de potencial
$\Omega.m$	Ohmio por metro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Paleoambiente y bioestratigrafía del Grupo Ancón Y Grupo Azúcar. Editado de (Ordoñez, Jiménez, & Suárez, 2006).....	32
Figura 2.2 Recorrido del flujo de corriente en un medio homogéneo e isótropo. Fuente: (Amores, 2014).....	35
Figura 2.3 Líneas de flujo de corriente cercanas al electrodo A. Fuente: (Amores, 2014)	35
Figura 2.5 Configuración Schlumberger. Fuente: (Geología Web, 2019).....	37
Figura 2.6 Configuración Wenner. Fuente: (Geología Web, 2019)	38
Figura 2.7 Curva de resistividad aparente obtenida utilizando el software Ipi2win. ..	39
Figura 2.8 Tipos de niveles freáticos según la distribución de los materiales que constituyen el talud. Fuente: (González de Vallejo, 2002)	42
Figura 3.1 Flujograma de la metodología a seguir para el desarrollo del presente estudio.....	44
Figura 3.2 Parámetros identificados en la fase de empatizar dentro de la metodología Desing Thinking.....	45
Figura 3.3 Mapa de empatía de la información obtenida mediante una entrevista cualitativa realizada en el sector.....	46
Figura 3.4 Matriz de Impacto vs Esfuerzo. Fuente: (Dinngo, 2018)	48
Figura 3.5 (a) Configuración del plan de vuelo. (b) Plan de vuelo programado para el dron.	50
Figura 3.6 Flujograma de la metodología seguida en el levantamiento geológico ...	51
Figura 3.7 (a) Líticos de arenisca de grano fino a medio. (b) Segmento basal del talud.	52
Figura 3.8 (a) Mapa de Ecuador. (b) Vista lateral del acantilado. (c) Mapa de ubicación de ensayos geofísicos (SEV y TG).	53
Figura 3.9 Flujograma de la metodología para la caracterización geomecánica.	55
Figura 3.10 Subdivisión del talud.	56
Figura 3.11 Flujograma del análisis de condiciones de estabilidad del talud.	59
Figura 3.12 Flujograma para el análisis de susceptibilidad al desprendimiento.	65
Figura 3.13 Perfiles topográficos obtenidos mediante el Software ArcGis.	70

Figura 4.1 Columna estratigráfica del talud del cerro de Olón	72
Figura 4.2 Curva de resistividad del SEV_01.....	75
Figura 4.3 Parámetros obtenidos del SEV_01.....	75
Figura 4.4 Representación de la columna litológica obtenida del SEV01.....	76
Figura 4.5 Exterminación de puntos de la curva de resistividad para la TG01 utilizando el software “Res2Inv”.....	77
Figura 4.6 Exterminación de puntos de la curva de resistividad para la TG02 utilizando el software “Res2Inv”.....	78
Figura 4.7 Tomografía Geoeléctrica (TG01) de la zona de estudio.....	80
Figura 4.8 Tomografía Geoeléctrica (TG02) de la zona de estudio.....	81
Figura 4.9 Correlación entre el SEV01 y la TG01.....	82
Figura 4.10 Subdivisión del sector 1.....	84
Figura 4.11 Subdivisión del sector 2.....	85
Figura 4.12 Subdivisión del sector 4.....	86
Figura 4.13 Subdivisión del sector 5.....	87
Figura 4.14 Subdivisión del sector 6.....	88
Figura 4.15 Subdivisión de la zona conformada por el sector 3.....	89
Figura 4.16 Sectores con alta susceptibilidad en condiciones actuales.....	95
Figura 4.17 Sectores con muy alta susceptibilidad en condiciones actuales.....	95
Figura 4.18 Sectores con alta susceptibilidad en condiciones extremas.....	97
Figura 4.19 Sectores con muy alta susceptibilidad en condiciones extremas.....	97
Figura 4.20 Factor de seguridad del perfil 1 en la zona 2.....	98
Figura 4.21 Factor de seguridad del perfil 2 en la zona 2.....	98
Figura 4.22 Factor de seguridad del perfil 3 en la zona 1.....	99
Figura 4.23 Factor de seguridad del perfil 4 en la zona 1.....	99
Figura 4.24 Factor de seguridad del perfil 6 en la zona 1.....	100
Figura 5.1 Implementación de anclajes en el escarpe.....	104
Figura 5.2 Sistema de distribución de anclajes y drenes.....	104
Figura 6.1 Modelo tridimensional del talud del cerro Olón.....	113
Figura 6.2 Curvas de nivel en el modelo tridimensional.....	113
Figura 6.3 Fracturamiento en forma de cuña (a). Meteorización esferoidal en el sector5 (b).....	114

Figura 6.4 Muro electrosoldado de rocas implementado para evitar el desgaste de la base del acantilado por acción del fuerte oleaje. 114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Equipos, materiales y softwares utilizados en el proyecto.....	21
Tabla 1.2 Cronograma de actividades distribuido para cada semana durante el II Término 2019-2020.	24
Tabla 1.3 Sistemas de clasificación para valoraciones geomecánicas de un macizo rocoso. Fuente: (R. Tomas, 2009)	27
Tabla 2.1 Resistividades de algunos suelos y rocas. Fuente: (EDP Proyectos, 2012)	37
Tabla 2.2 Tabla comparativa de las características de los métodos Wenner y Schlumberger. Fuente: (EDP Proyectos, 2012)	38
Tabla 2.3 Factores condicionantes y desencadenantes que inciden en la estabilidad de un talud. Fuente: (González de Vallejo, 2002)	40
Tabla 3.1 Métodos de estabilidad de taludes de acuerdo con los parámetros establecidos por varios expertos. Editado de (González de Vallejo, 2002)	47
Tabla 3.2 Cambios de la dirección del talud por zonas.	55
Tabla 3.3 Dirección de buzamiento y buzamientos de las zonas conforman el talud.	56
Tabla 3.4 Valoración de la clasificación RQD (%). Fuente: (NGI, 2015)	58
Tabla 3.5 División por subsectores para la obtención el RQD.	58
Tabla 3.6 Valoraciones para obtener el índice RMR. Fuente: (Bieniawski Z. , 1989)	60
Tabla 3.7 Calidad de macizos rocosos de acuerdo con el índice RMR obtenido. Fuente: (Bieniawski Z. , 1989)	61
Tabla 3.8 Factores de ajuste de la clasificación SMR. Fuente: (Romana M. , 1985)	62
Tabla 3.9 SMR asociado para cada tipo de rotura. Fuente: (Romana, Serón, & Montalar, 2001)	63
Tabla 3.10 Tipos de estabilidad según el índice SMR. Fuente: (Romana, Serón, & Montalar, 2001)	63
Tabla 3.11 Valores de λ para las discontinuidades. Fuente: (Chen, 1995).....	64
Tabla 3.12 Valoración asignada a cada parámetro principal. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	65
Tabla 3.13 Características y estado de la roca con su respectiva valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)	66

Tabla 3.14 Condiciones existentes para la presencia de vegetación. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	66
Tabla 3.15 Características litológicas y su valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	66
Tabla 3.16 Valoración asignada para cada característica sísmica. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	67
Tabla 3.17 Deterioro de la roca y valoración asignada para cada término. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)	67
Tabla 3.18 Características morfométrica y su respectiva valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	68
Tabla 3.19 Grado de fracturación y su valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)	68
Tabla 3.20 Valoración según la evidencia de agua. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)	69
Tabla 3.21 Categorización según el grado de la susceptibilidad. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018).....	70
Tabla 4.1 Descripción de las unidades litológicas que conforman el talud.....	73
Tabla 4.2 Valores de resistividad obtenidos en las campañas geofísicas.	73
Tabla 4.3 Descripción de las unidades obtenidas en SEV.	75
Tabla 4.4 Intervalo de resistividad asignado para cada unidad litológica	79
Tabla 4.5 Propiedades geomecánicas de las muestras obtenidas en campo.	83
Tabla 4.6 Cálculo del RQD (%) para el sector 1.	84
Tabla 4.7 Cálculo del RQD (%) para el sector 2.	85
Tabla 4.8 Cálculo del RQD (%) para el sector 4.	86
Tabla 4.9 Cálculo del RQD (%) para el sector 5.	87
Tabla 4.10 Cálculo del RQD (%) para el sector 6.	88
Tabla 4.11 Cálculo del RQD (%) para el sector 3.	89
Tabla 4.12 Calidad de los sectores del talud según el porcentaje de RQD obtenido.	89
Tabla 4.13 RMR obtenido para los sectores 1, 2, 4, 5 y 6 de la zona 1.	90
Tabla 4.14 RMR obtenido para el sector 3 de la zona 2.	90
Tabla 4.15 Resumen de los valores del índice RMR obtenido para cada zona.....	91
Tabla 4.16 Valores obtenidos para los factores de corrección de cada sector.....	92

Tabla 4.17 Cálculo del SMR de las zonas del macizo rocoso.	92
Tabla 4.18 Resumen de los valores del SMR obtenido para cada zona.	92
Tabla 4.19 CSMR calculado para los sectores que conforman la zona 1 del talud ...	93
Tabla 4.20 CSMR calculado para los sectores que conforman la zona 2 del talud ...	93
Tabla 4.21 Resumen de los valores del CSMR obtenido para cada zona.....	93
Tabla 4.22 Resultados obtenidos de la evaluación de estabilidad.	94
Tabla 4.23 Susceptibilidad obtenida en condiciones actuales para cada sector del macizo rocoso.	94
Tabla 4.24 Resumen de susceptibilidad en condiciones actuales obtenida para cada zona del talud.	95
Tabla 4.25 Susceptibilidad obtenida en condiciones extremas para cada sector del macizo rocoso.	96
Tabla 4.26 Resumen de susceptibilidad en condiciones extremas obtenida para cada sector del talud.	96
Tabla 4.27 Resumen de factores de seguridad y susceptibilidad según la zona del talud.	100
Tabla 6.1 Costos de personal.	115
Tabla 6.2 Costos recursos materiales.....	115
Tabla 6.3 Costos de licencias.	116
Tabla 6.4 Resumen de costos por equipos informáticos y licencia de software.	116
Tabla 6.5 Costos de material fungible.....	117
Tabla 6.6 Costos de gastos varios.....	117
Tabla 6.7 Resumen de costo de materiales.....	117
Tabla 6.8 Costos parciales.	117
Tabla 6.9 Gastos generales y gastos totales.	118
Tabla 6.10 Resumen de costos.	118

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

La comuna Olón posee una de las playas más tranquilas y seguras de la costa ecuatoriana, cuenta con varios paisajes naturales que realzan su biodiversidad, pero sin duda, el acantilado del cerro de Olón se destaca por su gran altura y por qué allí se encuentra el Santuario Blanca Estrella de Mar, lugar en donde reposa la imagen de la Virgen María en su advocación a la Rosa Mística, siendo uno de lugares más reconocido a nivel Nacional. (Hogar de la Madre, 2015)

El Santuario Blanca Estrella del Mar fue fundado el 8 de septiembre de 1984 por el Padre Othmar Staheli y la Srta. Isabel Dietrich (El Universo, 2017) y dirigido actualmente por la Fundación Santa María del Fiat. El Santuario es visitado durante todo el año, teniendo un aproximado de 65 visitas de lunes a viernes, cerca de 340 los fines de semana y alrededor de 1400 visitas en los feriados. (Arquidiócesis de Guayaquil, 2017)

El Santuario está ubicado a cinco minutos de la comuna Montañita, que es la localidad más cercana a 0.5 kilómetros. Está construido en piedra, en forma de barco sobre un acantilado con una altura de 40 metros aproximadamente que, desde lo alto, brinda una vista panorámica de la playa de Olón y de la comunidad. Es una estructura que aprovecha la topografía del talud sobre el que se asienta, ofreciendo una vista panorámica en la que se parecía la playa de Olón. Hoy en día, su estado de conservación está en riesgo de colapsar y no existe un suceso de recuperación debido a factores ambientales naturales tales como: lluvia, viento y el fuerte oleaje; por lo que se han implementado medidas de seguridad para el uso adecuado de este atractivo. (Peralta, Freire, & Fortis., 2018)

Según (Córdova, 2019), los trabajos de mantenimiento han sido constantes en los últimos años, sin embargo, han resultado poco útiles frente a los factores condicionantes y desencadenantes de la inestabilidad, como la estratigrafía,

presencia de agua y las propiedades de los materiales que conforman el escarpe. Algunos de estos trabajos consisten en:

- Reducir el paso de vehículos pesados con el objetivo de evitar vibraciones en el terreno, que induzcan al colapso del talud.
- Disminuir el horario de visitas al Santuario, para salvaguardar la seguridad de los turistas.
- Implementar señaléticas indicando las zonas potenciales de mayor peligro.

Para realizar esta tarea, se necesita ejecutar estudios de carácter geológico, geofísico y geotécnico para las respectivas consideraciones en el prediseño de estabilización del talud.

1.2 Descripción del problema

Actualmente, el talud sobre el cual se asienta el Santuario presenta algunos problemas serios en su base, generando incertidumbre a los turistas que visitan este lugar espiritual. Estos problemas en su mayoría son producto de la erosión, lo cual genera el desgaste del material que constituye el escarpe afectando directamente su estabilidad.

El tránsito de vehículos pesados por la vía que atraviesa el escarpe genera una serie de vibraciones, estas a su vez promueven el desprendimiento del material desde la parte superior del talud, perjudicando a las cimentaciones de las construcciones. Estos desprendimientos de bloques y rocas amenazan la seguridad de los turistas que visitan la playa de Olón en las cercanías del talud.

Según Córdova (2019), el material utilizado para construir el Santuario fue de mala calidad, ya que una gran cantidad fue obtenido de playas cercanas, y por efecto de haloclastia, las partículas salinas afectan directamente al hierro de las columnas provocando corrosión, este problema está sujeto a la mala colocación de la red de drenaje de aguas lluvias, las mismas que caen directamente sobre la cara del talud

y atacan a las cimentaciones de la construcción, con la consecuente pérdida de estabilidad.

A continuación, se presenta una lista de condiciones que presenta el talud debido a los problemas de estabilidad:

- Inestabilidad en la mayor parte del acantilado, debido a su verticalidad y bloques inestables que sobresalen de la cara del talud.
- Proceso de erosión y desgaste del macizo por acción del viento y del agua que afectan el escarpe sobre el cual descansa el Santuario Blanca Estrella de Mar.
- Fracturación del talud, baja cohesión del material que constituyen las rocas sedimentarias del talud.

Estas condiciones son parte de un problema que obliga a tomar medidas de control, especialmente cuando hay presencia de fuerte oleaje y lluvias.

1.3 Justificación del problema

En el año 2010 se registró una de las peores épocas de invierno que azotaron a la zona de estudio, lo que generó la caída de una gran parte de la cruz del Santuario Blanca Estrella del Mar. Este hecho obligó a la Secretaría de Gestión de Riesgos (S.G.R.), en el mismo año a implementar un plan de restauración del Santuario urgente, reduciendo el horario de visitas y misas que se daban en este sitio. (Arquidiócesis de Guayaquil, 2017)

El desgaste de la mayoría del talud, los desprendimientos de grandes volúmenes de roca y la calidad del material que conforma el escarpe, han generado daños en la infraestructura del Santuario, el cual es catalogado un ícono para la localidad y sus relaciones tanto comerciales como económicas.

En los últimos años se ha tratado el estado del Santuario, in embargo, no se ha concretado un plan de estabilización inmediato que permita preservar su estado. Por este motivo, el pedido de la comunidad de Olón y de las organizaciones

(J.A.S.R.A.P.O. y la Fundación Santa María del Fiat), para que se realice este estudio, nace de un deseo de salvaguardar un bien patrimonial y turístico que los identifica, además que en este entorno giran negocios como restaurantes, hoteles, y turismo en general.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa un diagrama en el cual se detalla los principales parámetros que afectan la estabilidad del escarpe, sus efectos, y la importancia de realizar una evaluación que considere los parámetros descritos.

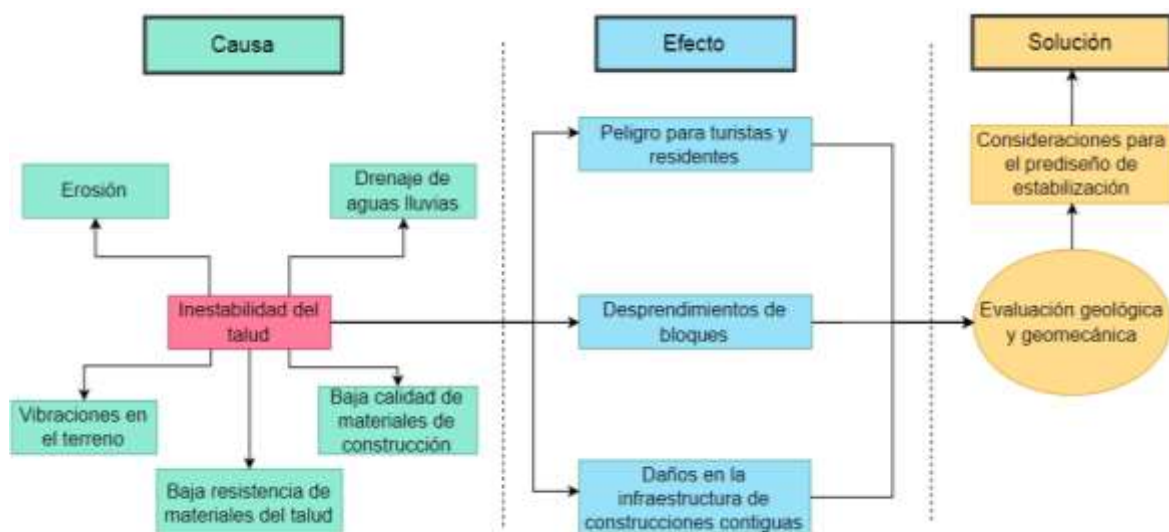


Figura 1.1 Diagrama de la justificación del problema.

Analizando las condiciones actuales que presenta el talud. ¿Es posible, con una evaluación de las condiciones geológicas y geomecánicas, dar las consideraciones para el prediseño de una solución a los problemas de inestabilidad, susceptibilidad y seguridad a las personas que deciden visitar este lugar turístico y espiritual?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar la estabilidad del acantilado de Olón, mediante el análisis geomecánico de imágenes obtenidas por dron, geología y geofísica para las consideraciones en el prediseño de estabilidad del talud.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Realizar el levantamiento geológico del sector mediante análisis estratigráfico, sondeos eléctricos verticales, tomografías geoelectricas y ensayos de propiedades físicas de las rocas, que faciliten la caracterización litológica y posibles estructuras asociadas.
2. Caracterizar las condiciones geomecánicas del talud, utilizando la clasificación propuesta por Chen (CSMR), estableciendo la calidad del macizo rocoso.
3. Determinar el grado de susceptibilidad al desprendimiento de bloques en el talud, mediante el análisis de factores condicionantes y desencadenantes que permitan la zonificación de las zonas más vulnerables del macizo.
4. Analizar el factor de seguridad del eskarpe mediante el método de Morgenstern & Price para las consideraciones del prediseño de estabilización.

1.5 Ubicación

El Santuario Blanca Estrella del Mar está ubicado en la Península de Santa Elena, al norte de la parroquia Manglaralto, en la comuna Olón. El Santuario descansa sobre un talud que tiene una longitud de 245 m y 40 m de altura, con una extensión de 113.000 m², tal como se representa en la Figura 2.1

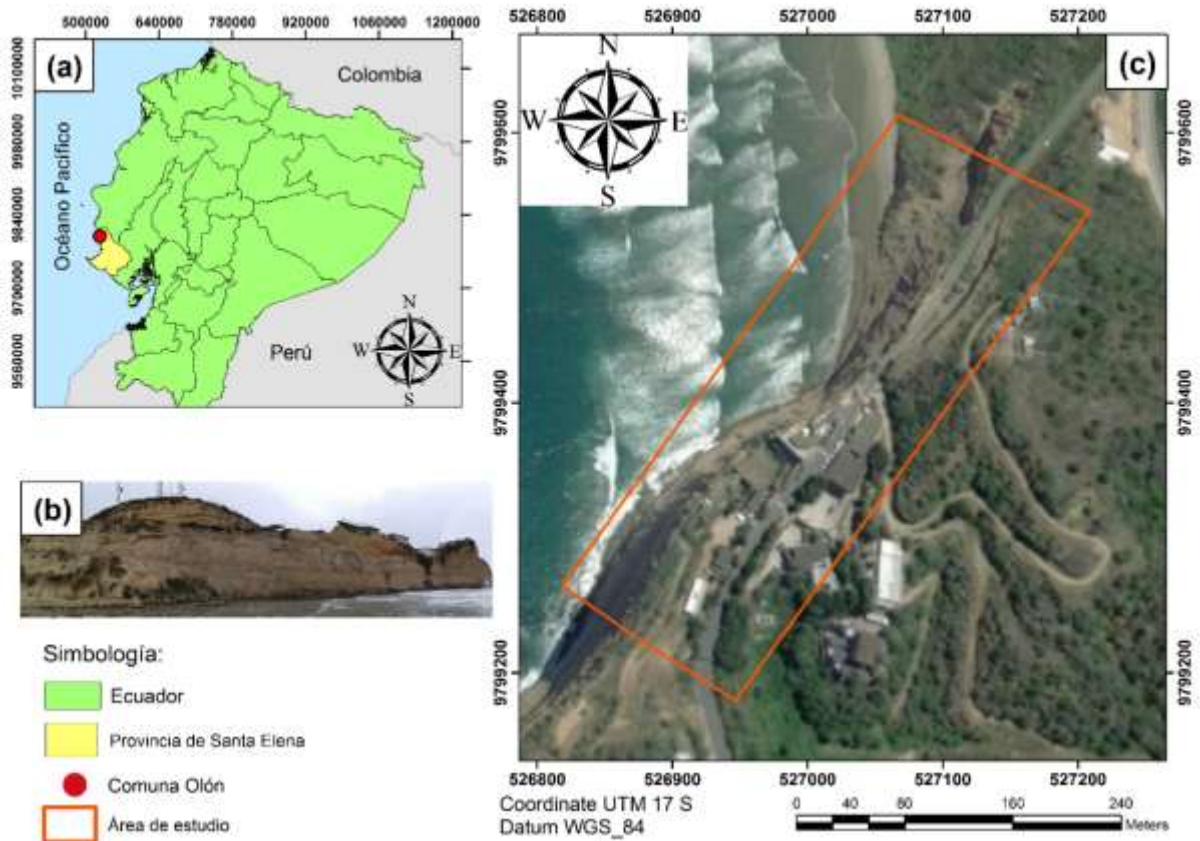


Figura 1.2 Mapa de ubicación de la zona de estudio. (a) Mapa del Ecuador. (b) Vista frontal del talud. (c) Vista en planta de la zona de ubicación.

1.6 Restricciones en el desarrollo del proyecto

El desarrollo del proyecto presenta las siguientes restricciones:

- El presupuesto disponible para realizar los trabajos de estabilización es bajo, ya que el Santuario es administrado por la Fundación Santa María del Fiat, que es una organización sin fines de lucro, sin embargo, la autogestión ha permitido realizar trabajos mínimos para la preservación del Santuario.
- El peligro de trabajar en la base del acantilado debido a la caída permanente de bloques de roca.
- Dificultad de la descripción a meso escala de las litofacies ubicadas en la parte superior del escarpe.

- Presentación de los estratos subhorizontales para la obtención de una columna estratigráfica.
- Difícil acceso a informes técnicos que permitan analizar estudios relacionados al área de trabajo.

1.6.1 Recursos

Para realizar el siguiente proyecto se utilizará equipos, materiales y softwares los cuales son descritos en la siguiente Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Equipos, materiales y softwares utilizados en el proyecto.

Equipos y materiales	Softwares
Libreta geológica	ArcGis
Martillo geológico y cincel	QGis
Brújula y GPS Garmin	Agisoft Photoscan
Dron marca "Phanton"	Google Earth
GPS diferencial "Trimble"	Ipi2win
Cinta métrica	Res2 INV
Lupa	ABEM Terrameter
Resistivímetro	Strater 5.0
Tomógrafo	Slide 5.0
Carretes de cables eléctricos	
Electrodos	
Batería de 12V	
Cámara fotográfica	
Acido clorhídrico al 10%	
Computadora y procesador "Core i7"	
Accesorios de campo	

- Para el levantamiento de información geológica y geomecánica se utilizará: libreta de campo, martillo geológico, cinta métrica, cincel, brújula, GPS y accesorios de campo.
- Para los estudios geofísicos se utilizará el "Resistivímetro" y "Tomógrafo" para los SEVs y tomografías geoelectricas respectivamente y mediante los

softwares “ABEM Terrameter”, “Ipi2win”, se descargará e interpretará los datos obtenidos en campo.

- La topografía se llevará a cabo mediante el GPS diferencial acompañada de ortofotos obtenidas por el dron, y serán procesadas utilizando el software “Agisoft Photoscan”, corroborándolas con los softwares “ArcGis” (Laboratorio de Computación FICT-ESPOL) y “QGis”, y mediante el software “Strater” se digitalizará la columna litológica.
- Finalmente, para el cálculo del factor de seguridad se empleará el software “Slide 5.0”. Se necesitará de un procesador fuerte y capaz de trabajar con información pesada para el modelamiento de los datos.

1.7 Diseño Metodológico

Para la realización del presente proyecto se llevará a cabo la siguiente metodología, la cual está conformada por cuatro fases:

Fase I: Procesamiento y sistematización de información existente

Consiste en sistematizar la información geológica-geomecánica: identificación y evaluación del problema que presenta el sector y la corroboración con informes técnicos, publicaciones y tesis que guarden relación con la zona de estudio.

Fase II: Trabajo de campo

Comprende el levantamiento de información geológica de la zona: reconocimiento de campo, visitas de campo, sobrevuelos del dron, sondeos eléctricos verticales y tomografías geoeléctricas, estratigrafía del sector a través la descripción de las estructuras y litofacies presentes. Además, en esta fase se realizará la caracterización geomecánica mediante ensayos geomecánicos estableciendo las propiedades físico-mecánicas de las rocas que conforman el macizo rocoso.

Fase III: Evaluación de estabilidad y susceptibilidad

Mediante ortofotos obtenidas con el dron se generó un modelo tridimensional del talud, para la evaluar la estabilidad mediante la clasificación geomecánica

propuesta (Chen, 1995), partiendo de una clasificación inicial propuesta por (Romana M. , 1985), para el cálculo del índice RMR.

Para el análisis de la susceptibilidad al desprendimiento de bloques se consideró el estado de las juntas, presencia de agua y otros parámetros necesarios para evaluar la susceptibilidad y finalmente, el cálculo del Factor de Seguridad mediante perfiles obtenidos de la topografía previamente generada considerando los valores de resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna.

Fase IV: Análisis de resultados

En esta última fase se presenta el análisis e interpretación de los datos geológicos-geomecánicos y las consideraciones de prediseño de estabilización para el acantilado.

1.7.1 Cronograma

El cronograma de actividades a realizar, en el tiempo establecido para el desarrollo del proyecto, el cual se detalla a continuación en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2 Cronograma de actividades distribuido para cada semana durante el II Término 2019-2020.

Actividad	Septiembre (2019)				Octubre (2019)				Noviembre (2019)				Diciembre (2019)				Enero (2020)				Febrero (2020)							
	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4	Sm1	Sm2	Sm3	Sm4				
Trabajo de oficina: Recopilación bibliográfica y organización de información.																												
Visitas de campo: Reconocimiento de campo y aplicación de herramientas del Desing Thinking																												
Elaboración de la propuesta de materia integradora																												
Trabajo de campo: Sobrevuelos con dron, geofísica y topografía																												
Levantamiento geológico y geomecánico																												
Capítulo I: Antecedentes, ubicación, restricciones, objetivos, estado del arte y marco teórico.																												
Digitalización de los datos obtenidos en campo.																												
Capitulo III: Metodología																												
Modelo Digital del Terreno																												
Identificación de zonas potenciales al deslizamiento																												

Clasificación geomecánica propuesta por Chen (CSMR)															■	■									
Capítulo IIV: Análisis de resultados																	■								
Consideraciones para el prediseño de estabilización																	■								
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones																	■	■							
Anexos: Informe socioeconómico, fotos, tablas, sondeos, tomografías																	■								
Presentación 5 Mins Pitch																		■	■	■					
Presentación final																						■			

1.8 Estado del arte

1.8.1 Modelo geodinámico de la costa ecuatoriana

Benítez (1995), en su tesis de doctorado titulada *“Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire”*, explica el modelo geodinámico de la costa ecuatoriana y las posibles causas que generan el movimiento de subducción mediante el análisis y comparación de las velocidades de las placas tectónicas.

Di Celma (2010), en su artículo *“Stratigraphic evolution from shoreface to shelf-indenting channel deposition systems during transgression: Insights from the lower Pliocene Súa Member of the basal Upper Onzole Formation, Borbón Basin, northwest Ecuador”*, detalla que los sistemas de depósitos de la costa hasta la plataforma, presenta conductos para mover sedimentos fluviales de granulometría grande cercana a la costa incluso durante el aumento relativo del nivel del mar.

1.8.2 Clasificación geomecánica

Chen (1995), en su estudio *“Recent Developments in Slope Stability Analysis”*, genera una base de datos de los deslizamientos de tierra y taludes de roca, en relación con el desarrollo de recursos hídricos usando las siguientes clasificaciones: el sistema Q sugerido por (N. Bartón, 1974), y el sistema RMR de (Bieniawski Z. , 1976)teniendo una gran aceptación. Actualmente, el sistema RMR-SMR propuesto por Bieniawski y modificado por (Romana M. , 1985), otorga una valoración completa de taludes.

Tomas et al, (2009), durante el VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables presentó su trabajo denominado *“Propuesta Metodológica Para La Aplicación Del Slope Mass Rating Continuo (SMR-C) Mediante un Sistema de Información Geográfica”*, en el cual compara los siguientes sistemas de clasificación Tabla 1.3:

Tabla 1.3 Sistemas de clasificación para valoraciones geomecánicas de un macizo rocoso. Fuente: (R. Tomas, 2009)

Clasificación	Autor
Rock Mass Strength (RMS)	(Selby, 1980)
Slope Mass Rating (SMR)	(Romana M. , 1985)
Slope Rock Mass Rating (SRMR)	(Robertson, 1988)
Rock Mass Rating (RMR)	(Bieniawski Z. , 1976)
Mining Rock Mass Rating (MRMR)	(Laubscher, 1990)
Mining Rock Mass Rating, modificado (MRMR-modificado)	(Haines, 1991)
Chinese Rock Mass Rating (CRMS)	(Chen, 1995)
Natural Slope Methodology (NSM)	(Shuk, 1994)
Modified Rock Mass Rating (M-RMR)	(Unal, 1996)
Slope Stability Probability Classification (SSPC)	(Hack, 1998)
Slope Stability Probability Classification modificado (SSPC-modificado)	(Lindsay, 2001)

Estas clasificaciones fueron analizadas identificando las diferencias entre ellas y posteriormente fueron aplicadas a casos de la vida real, como es el caso de un talud de carretera o un frente de cantera; demostrando su utilidad para identificar zonas susceptibles al deslizamiento. Sin embargo, la clasificación que mejor se adapta para evaluar la estabilidad de un macizo rocoso es el sistema Chinese Rock Mass Rating (CRMS), propuesto por Chen (1995).

Morante et al, (2018), en su artículo “*Evaluation of Slope Stability Considering the Preservation of the General Patrimonial Cemetery of Guayaquil*”, tiene como objetivo evaluar la estabilidad del talud a través de un análisis geotécnico para preservar el Cementerio General de Guayaquil, sitio declarado como patrimonio nacional.

1.8.3 Prospección geofísica

Montalván (2008), en su tesis de grado “*Caracterización Geoeléctrica del Acuífero de la Cuenca del Río Olón para la Propuesta de Plan de Explotación*” caracterizó

el acuífero mediante SEVs realizados en el sector, para identificar zonas potenciales para la construcción de nuevos pozos de agua, para evitar que la cuña salina ingrese y contamine las reservas, de esta manera se gestiona para que el recurso sea sostenible.

Valencia (2017), en su tesis de grado *“Análisis Hidrogeológico De La Cuenca Del Río Manglaralto para la Caracterización de sus Sistemas Acuíferos”* elaboró un modelo delimitando los tres acuíferos (Simón Bolívar, Manglaralto y Cadeate), mediante geofísica para establecer la geología y calcular el volumen explotable de agua del acuífero de Manglaralto analizando el plan de recarga anual para el sostenimiento del acuífero.

Quiñónez (2019), en su tesis de grado *“Modelo Geométrico del Acuífero Costero De Manglaralto y su Incidencia en el Aprovechamiento Sostenible del Agua, Santa Elena-Ecuador”*, genera un modelo geométrico del acuífero mediante la correlación de información geológica y geofísica utilizando el programa “Geomodeller”, para el cálculo estimado del volumen y finalmente recomendar propuestas de aprovechamiento sostenible.

1.8.4 Sensores remotos

Riquelme et al, (2014), en el artículo *“A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds”* implementa la metodología de sensores remotos para generar modelos en 3D de macizos rocosos mediante el software Agisoft y Cloud Compare para identificar y determinar las discontinuidades que conforman un macizo rocoso.

Paruelo (2008), en su artículo *“La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos”*, explica la importancia del uso de los sensores remotos, para la caracterización estructural de un paisaje permitiendo la interpretación del terreno mediante el análisis del comportamiento espectral (valores de reflectancia) sin ningún tipo de información acerca de los mecanismos del vínculo entre los datos registrados y los procesos funcionales del ecosistema.

1.9 Estudios previos en la zona de interés

Chávez & García (2007), en su artículo *“Propuestas de Soluciones Técnicas para la Estabilización de Taludes de Roca Blanda en la Vía Guayaquil”* presenta, casos de taludes con inestabilidad y los clasifica utilizando el método SMR para proponer técnicas para la estabilización de taludes, en el cual se menciona la impermeabilización de bermas, mejoras en el sistema de drenaje y mejoras en el sistema de estribos, para dar una posible solución a la inestabilidad del talud.

Calderón (2010), en su tesis de grado *“Modelo Conceptual del Acuífero del Río de Olón”* elaboró un modelo conceptual ajustado a la litología e hidrogeología de la cuenca hidrográfica con el objetivo de verificar si la ubicación de los pozos y colectores es la ideal para explotar el acuífero e identificar zonas potenciales para la explotación de este.

Duque (2015), en su tesis de grado *“Revisión de las estrategias de promoción de los atractivos y servicios turísticos de la comuna Olón de la Provincia de Santa Elena con el fin de preparar un plan de promoción turística local 2015”*, sugiere una lista de actividades para impulsar el turismo en la comuna Olón, con el objetivo de incrementar la economía del sector mediante de la promoción de los lugares más representativos de la comuna.

CAPÍTULO 2

2. MARCO GEOLÓGICO

2.1 Geomorfología

La zona de estudio está ubicada geomorfológicamente en la Cordillera Chongón Colonche, conformada por rocas que van desde el Jurásico hasta el reciente, formando una serie de rocas de origen volcano-sedimentario. Presencia de fallas con dirección NW-SE o NNW-SSE que atraviesan la cuenca, mediante un movimiento vertical con efecto de desplazamiento horizontal, estos movimientos pueden estar relacionados con una de sus fases, específicamente la segunda de la orogénesis andina por lo cual, es importante aclarar que, en el valle de Olón, las fallas no tienen influencia sobre los estratos. (MIDUVI, 1997)

2.2 Estratigrafía

La zona de estudio presenta líticas que van desde Oligoceno inferior hasta el Eoceno superior. El relleno sedimentario está conformado por sedimentos del Grupo Ancón, pertenecientes al Eoceno superior, el mismo que está conformado por: la Formación Socorro de edad Eoceno medio, constituida por sus dos miembros: Caliza Javita y Arenisca de Dos Mangas; la Formación Seca, del Eoceno Superior y sus dos miembros Lutita Seca y Punta Ancón, seguido de la Formación Zapotal perteneciente al Eoceno superior y Oligoceno inferior y finalmente en el techo de la secuencia deposicional se encuentran los depósitos aluviales (Valencia, 2017), tal como se presenta en la Figura 2.1.

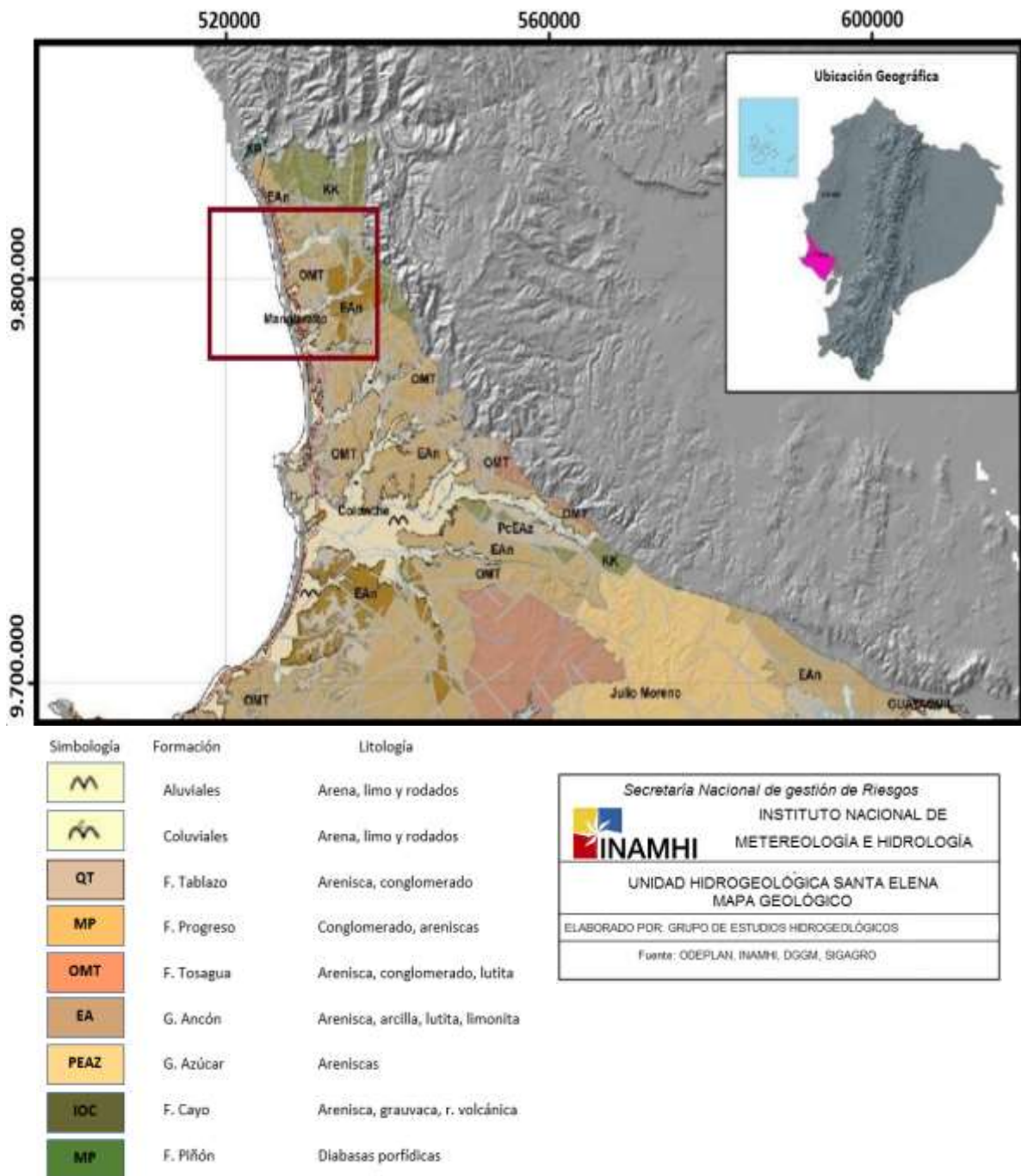


Figura 2.1 Mapa de ubicación de la zona de estudio. (a) Mapa del Ecuador. (b) Vista frontal del talud. (c) Vista en planta de la zona de ubicación.

2.2.1 Grupo Ancón

De acuerdo con Valencia (2017). El grupo Ancón está constituido por cuatro litofacies, depositadas desde la más antigua hasta la más reciente: Formación

Clay Pebble Beds, Socorro, Seca y Punta Ancón. En la Figura 2.2 se representa la columna paleolitológica del grupo ancón.



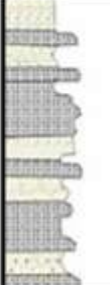

FORMACIONES		LITOSTRATIGRAFÍA	ESPEORES (m)	LITOLÓGÍAS	EDADES RELATIVAS Y ZONAS BIOESTRATIGRÁFICAS	PALEOAMBIENTES
GRUPO ANCÓN	PUNTA ANCÓN		150	Areniscas y lutitas	Eoceno Medio medio- Eoceno Medio tardío. Zonas: P13 - P14; N P16; <i>Podocyrthis mitra</i>	Marino de salinidad normal, plataforma externa, mezcla de aguas cálidas y frías
	SECA		500	Lutitas calcáreas	Eoceno Medio medio. Zonas: P12; N P15 - N P16; <i>Podocyrthis ampla</i>	
	SOCORRO		460	Arcillolitas, areniscas y conglomerados	Eoceno Medio temprano - Eoceno Medio medio. Zonas: P11 - P12; N P14 - N P15; <i>Thyrsoyrtis triacantha</i>	
	CLAY PEBBLE BEDS		0 - 650	Areniscas, lutitas, cherts y calizas	Eoceno Temprano - Eoceno Medio. Zonas: P8 -P10; N P12; <i>Dictyoprora mongolfieri</i>	

Figura 2.1 Paleambiente y bioestratigrafía del Grupo Ancón Y Grupo Azúcar. Editado de (Ordoñez, Jiménez, & Suárez, 2006)

2.2.1.1 Formación Socorro (Eoceno Medio y Superior)

Es definida por Núñez del Arco (2003), como un flysch constituida por una secuencia turbidítica de arenisca con alternancia de lutitas color gris verde. Posee fallas activas y deformaciones singenéticas que han sido el resultado de deslizamientos.

2.2.1.2 Formación Seca (Eoceno Superior)

Se encuentra sobreyaciendo la Formación Socorro y está conformada por areniscas y lutitas, esta unidad es un flysch distal, que presenta una facie arrecifal, nerítico y radiolarítica. (Bristow & Hoffstetter, 1977)

Según DINAGE (1974), posee un ambiente litoral, conformado por arcillas, conglomerados ligníticos, areniscas grawáquicas y lutitas interestratificadas. Se presenta en la base de la Formación Zapotal conocida anteriormente como Calizas Las Delicias.

2.2.1.3 Formación Zapotal (Eoceno superior-Oligoceno inferior)

Está conformada de areniscas gruesas masivas y bancos de conglomerados de origen turbidítico e intercalaciones de lutitas con moluscos, posee una potencia de 300 metros aproximadamente. La formación yace discordante sobre las deposiciones de las formaciones antiguas. (MIDUVI, 1997)

2.2.1.4 Depósitos Aluviales

Núñez del Arco (2003), define a los depósitos aluviales como un material no consolidado conformado por conglomerados, areniscas, limos y arcillas, que se depositaron en ríos, quebradas y se hallan sobreyaciendo a las formaciones geológicas.

Estos líticos se presentan generalmente en los ríos Ayampe, Olón, Manglaralto y Valdivia, con una potencia aproximadamente de 25 a 30 m. (MIDUVI, 1997). En el área de estudio estos sedimentos son de gran interés para establecer la geología del escarpe de Olón.

2.3 Prospección Geofísica

La geofísica es un método indirecto que comprende un conjunto de técnicas física que se aplican a la exploración del subsuelo, estudio de unidades estratigráficas, búsqueda de yacimientos tanto de hidrocarburos como hidrogeológicos mediante observaciones realizadas en la superficie terrestre. (Orellana, 1982)

2.3.1 Generalidades

Según (Orellana, 1982), la prospección geofísica es una rama de la Física Aplicada que tiene como objetivo el análisis de estructuras internas de la Tierra para localizar y delimitar zonas por medio el contraste de los materiales que los conforman.

2.3.2 Métodos Geoeléctricos

(Orellana, 1982), explica que los métodos geoeléctricos se fundamentan en la Ley de Ohm el cual se basa en el paso de la corriente eléctrica atravesando algunos materiales como rocas y sedimentos. Esta Ley define que la diferencia de potencial ΔV entre dos puntos es directamente proporcional a la corriente eléctrica de intensidad I y la resistencia R que posee el material por donde viaja la corriente.

$$\Delta V = I \cdot R \quad (2.1)$$

La resistencia R va a depender del medio y la forma geométrica del conductor, generalmente se la relaciona con la forma de un cilindro de longitud L y sección S , entonces reemplazando en la ecuación anterior, se tiene:

$$\Delta V = I \cdot (\rho \cdot L) / S \quad (2.2)$$

La resistividad es una propiedad inversamente proporcional a la conductividad eléctrica σ y la unidad es ($\Omega.m$)

2.3.3 Medición de Resistividad

Auge (2008), indica que para medir la resistividad en medios homogéneos e isotrópicos se debe inyectar corriente eléctrica por medio de un electrodo A en la

superficie terrestre **IA** es similar a la obtenida en el electrodo **B**, **IB** tal como se muestra en la Figura 2.2

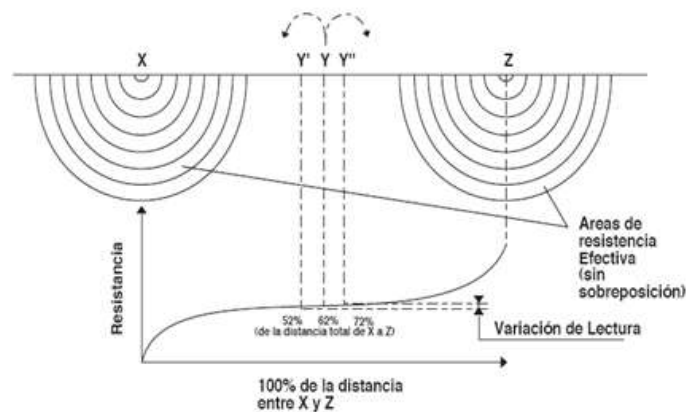


Figura 2.2 Recorrido del flujo de corriente en un medio homogéneo e isótropo. Fuente: (Amores, 2014)

Los electrodos A y B son separados y las líneas de corriente serán divergentes y radiales adoptando una forma equipotencial Figura 2.3 por lo tanto la resistividad del suelo será expresada como:

$$\rho = \frac{2\pi (r_2 - r_1) r_1 * r_2}{r_1 * r_2} * \frac{\Delta V}{I} = K * \frac{\Delta V}{I} \quad (2.3)$$

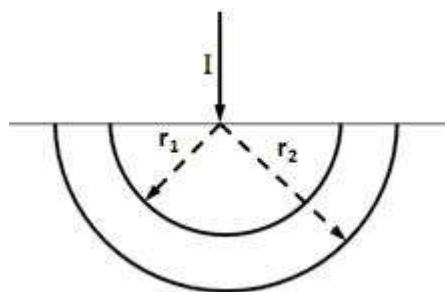


Figura 2.3 Líneas de flujo de corriente cercanas al electrodo A. Fuente: (Amores, 2014)

Donde **K** es la constante, que depende de la geometría de dispositivo utilizado para inyectar y registrar la corriente.

Según (Orellana, 1982), generalmente las rocas y sedimentos tienden a comportarse como semiconductores inclusive, son catalogados como

conductores de baja capacidad, es decir poseen una alta resistividad. Las resistividades de algunos minerales y rocas varían de acuerdo con sus propiedades físicas tales como: porosidad, tamaño del grano, tipo de matriz, entre otras. En la Figura 2.2 se muestran los valores de resistividades para materiales y rocas más frecuentes.

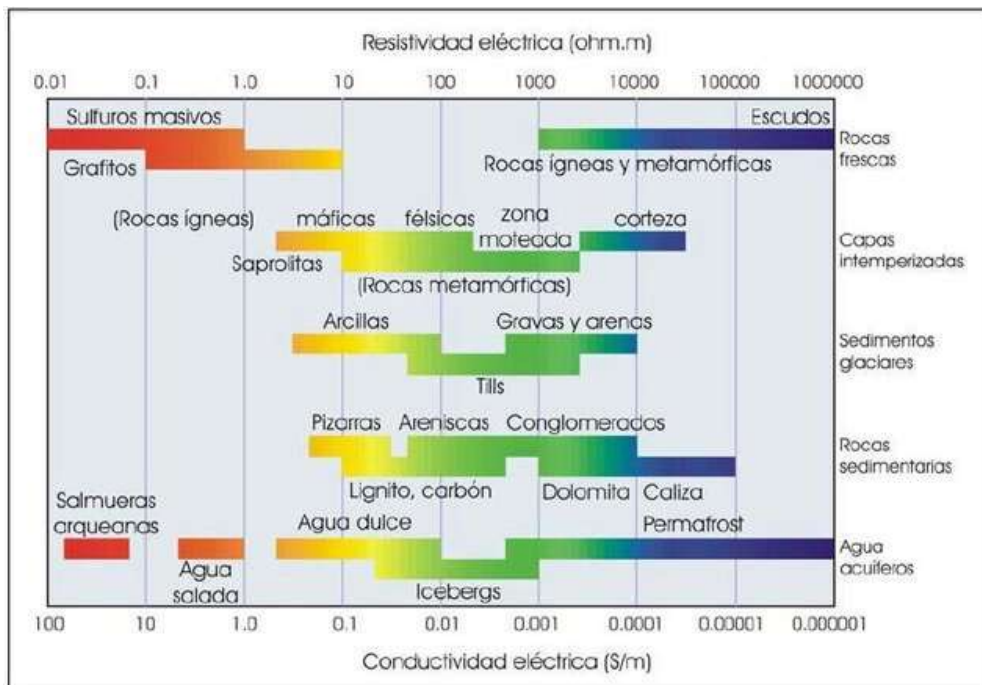


Figura 2.2 Rango de resistividades de algunas rocas y materiales. Tomado de (Palacky, 1988), editado por (Arango, 2005).

Revisando algunos autores en busca de los valores de resistividad para un terreno específico, encontramos que la mayoría no coinciden en los valores. Por lo tanto, para cada investigador se tendrá valores diferentes. Se recomienda usar dichos valores como una aproximación teórica, siendo de gran importancia los datos obtenidos en campo para una interpretación real. En la Tabla 2.1 se presentan los valores de resistividad aproximados de algunos suelos típicos:

Tabla 2.1 Resistividades de algunos suelos y rocas. Fuente: (EDP Proyectos, 2012)

TIPO DE SUELO	ρ (Ohm-m)
Limos, Arcillas, Suelo Vegetal y de Cultivo	10 – 100
Tierra Fina, Turbas, Fangos, Suelos Finos y Concretos Húmedos	100 – 300
Tierra Aluvial, Arenas firmes, Suelos secos y Cimientos de concreto	300 – 800
Arena Eólica, Lecho de Río, Cascajo, Areniscas secas	800 – 3,000
Rocas Estratificadas, Fracturadas, Volcánicas	3,000 – 10,000
Suelos de Feldespatos, micas, cuarzos, Roca Monolítica	5,000 – 30,000
Concreto Ciclópeo Estructural Aéreo (Seco)	10,000 a más

Normalmente se registra la resistividad aparente (ρ_a), por este motivo se utilizan dos tipos de configuraciones de los dispositivos lineales y polares. (Auge, 2008)

2.3.3.1 Configuración Schlumberger

Configuración que se caracteriza por la ubicación de los electrodos de forma que se cumpla condición que la distancia **AB** es mayor o igual a **5MN** Figura 2.4 (Auge, 2008).

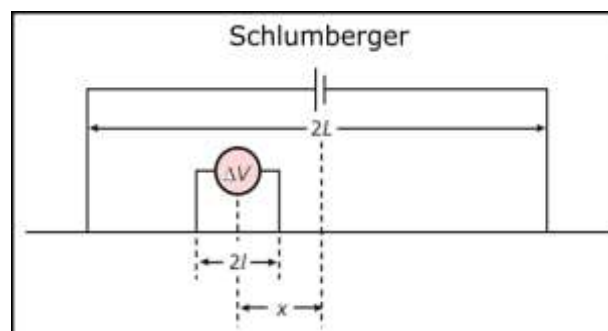


Figura 2.4 Configuración Schlumberger. Fuente: (Geología Web, 2019)

2.3.3.2 Configuración Wenner

Configuración simétrica, es decir la equidistancia de los electrodos es igual. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. (Auge, 2008)

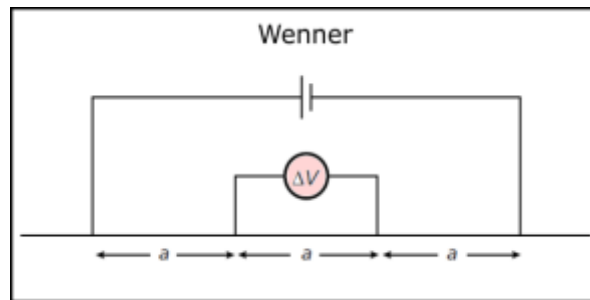


Figura 2.5 Configuración Wenner. Fuente: (Geología Web, 2019)

A continuación, en la Tabla 2.2, se muestran las principales características de los métodos utilizados en el presente estudio.

Tabla 2.2 Tabla comparativa de las características de los métodos Wenner y Schlumberger. Fuente: (EDP Proyectos, 2012)

CONCEPTO	MÉTODO DE WENNER	MÉTODO DE SCHLUMBERGER
Aplicación	Sondeos poco profundos (< a 25 m) Diseño de Puestas a Tierra de Corriente Alterna	Sondeos profundos (> a 100 m) Diseño de Puestas a Tierra de Corriente Continua
Requerimientos Básicos	Contacto de los electrodos con el suelo	Alta sensibilidad en el registro de datos del instrumento
Instrumento de Medidas	Equipo de precisión normal (< a 3%)	Equipo alta precisión (> a 0.5%)
Sensibilidad para el registro de resistividades	Pequeña	Compensada
Procedimiento por seguir	Colocación de los cuatro electrodos equidistantes, se hace circular y mide una corriente entre los dos laterales y los centrales registran (VS)	Colocación de los cuatro electrodos no equidistantes, se hace circular y mide una corriente entre los dos laterales móviles y los centrales fijos registran (VS)
Ejecución	Rápida y baja económicamente	Laboriosa

2.3.4 Medición en campo y procesamiento de datos

En el marco nuestro proyecto, y de acuerdo con Valencia (2017), para la medición de los SEVs se utilizará la configuración Schlumberger, este método consiste fijar los electrodos M y N, estos miden el potencial eléctrico V a una distancia del

origen, a continuación se colocan los electrodos A y B que son los que inyectan la corriente y se calcula con esto la resistividad en cada posición.

Como resultado se obtendrá una curva de resistividad medida en escala logarítmica, esta curva se denomina también como curva de resistividad aparente (ver Figura 2.6). El eje de las abscisas representa la distancia $AB/2$ (m) y el eje de las ordenadas las resistividades (Ωm) la profundidad es proporcional a la distancia de la separación entre los electrodos.

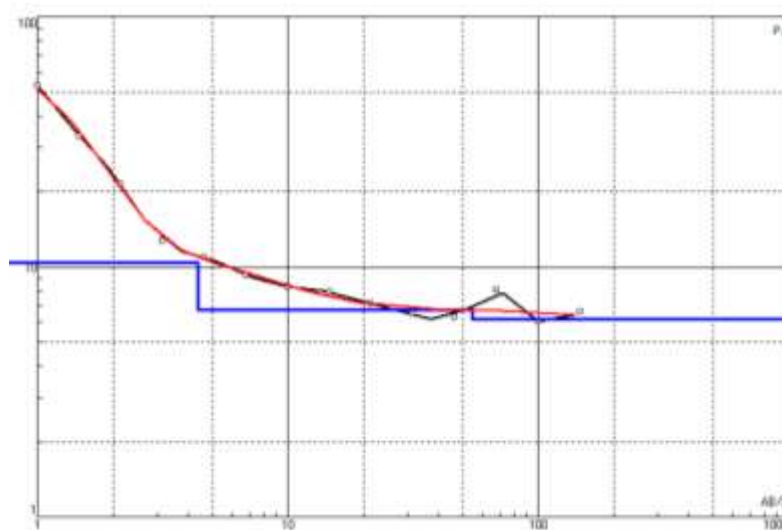


Figura 2.6 Curva de resistividad aparente obtenida utilizando el software Ipi2win.

A partir de estos valores se obtiene un modelo 1D del subsuelo, este modelo se formará debajo del centro o punto O (centro); un conjunto de electrocapas horizontales de acuerdo con sus resistividades y profundidades que generan la curva de resistividad aparente que se acerca al valor de resistividad aparente del subsuelo. (Auge, 2008)

2.4 Principios geomecánicos

2.4.1 Factores que influyen en la estabilidad del talud

Existen diversos factores que influyen en la estabilidad de un talud, entre ellos se destacan los geométricos (altura, inclinación), geológicos (presencia de planos y estructuras en el talud), hidrogeológicos (porcentaje de humedad) y factores

geotécnicos o que guarden relación con el comportamiento del terreno (resistencia o deformabilidad). Tabla 2.3 (González de Vallejo, 2002)

Tabla 2.3 Factores condicionantes y desencadenantes que inciden en la estabilidad de un talud. Fuente: (González de Vallejo, 2002)

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Estratigrafía y litología	Sobrecargas estáticas
Estructura geológica	Cargas dinámicas
Condiciones y comportamiento hidrogeológicos de los materiales	Cambios en las condiciones hidrogeológicas. Factores climáticos
Propiedades físicas, resistentes y deformacionales	Variación en la geometría
Tensiones naturales y estado tenso-deformacional	Reducción de parámetros resistentes

2.4.2 Litología

El material que conforma un talud incide con el tipo de inestabilidad que puede sufrir. Las propiedades geomecánicas, físicas de cada material y la presencia de agua, determinará el comportamiento tenso-deformacional y a su vez en su estabilidad. (González de Vallejo, 2002)

2.4.3 Estructuras geológicas

Las discontinuidades y estructuras geológicas son muy importantes en el análisis de estabilidad de un talud. La estructura del bloque se define según la disposición espacial de las familias de las discontinuidades, los cuales se unen entre si mediante sus características y propiedades. Cuando un macizo rocoso presenta discontinuidades implica un comportamiento anisótropo y unos planos preferenciales de rotura, de tal forma que el talud tendrá un comportamiento sujeto a las microdiscontinuidades o por varios sistemas de juntas o planos de debilidad, condicionando la segmentación de la inestabilidad. (González de Vallejo, 2002)

2.4.4 Factores hidrogeológicos

El agua presente en el terreno genera condiciones que influyen en la inestabilidad de un talud, entre ellas se tiene: presión intersticial, arrastres y erosión. En términos generales, el agua es uno de los principales enemigos de la estabilidad de un talud; el agua reduce directamente la resistencia del terreno e incrementa las fuerzas tendentes de la inestabilidad. Según González de Vallejo (2002), los efectos causados más relevantes son los siguientes:

- Disminución de la resistencia al corte de los planos de rotura cuando disminuye la tensión normal efectiva.
- La presión que se ejerce sobre las grietas de tracción contribuye al deslizamiento.
- El peso del material aumenta por saturación.
- Se produce erosión interna debido al flujo subsuperficial.
- Meteorización producto de los cambios en la composición mineralógica de los materiales componentes del talud.

La superficie freática es definida por varios factores; la geometría del talud y las condiciones de contorno, para los macizos rocosos, la estructura geológica influye en la forma de la superficie freática y, por lo tanto, en la distribución de las presiones intersticiales Figura 2.7 (González de Vallejo, 2002)

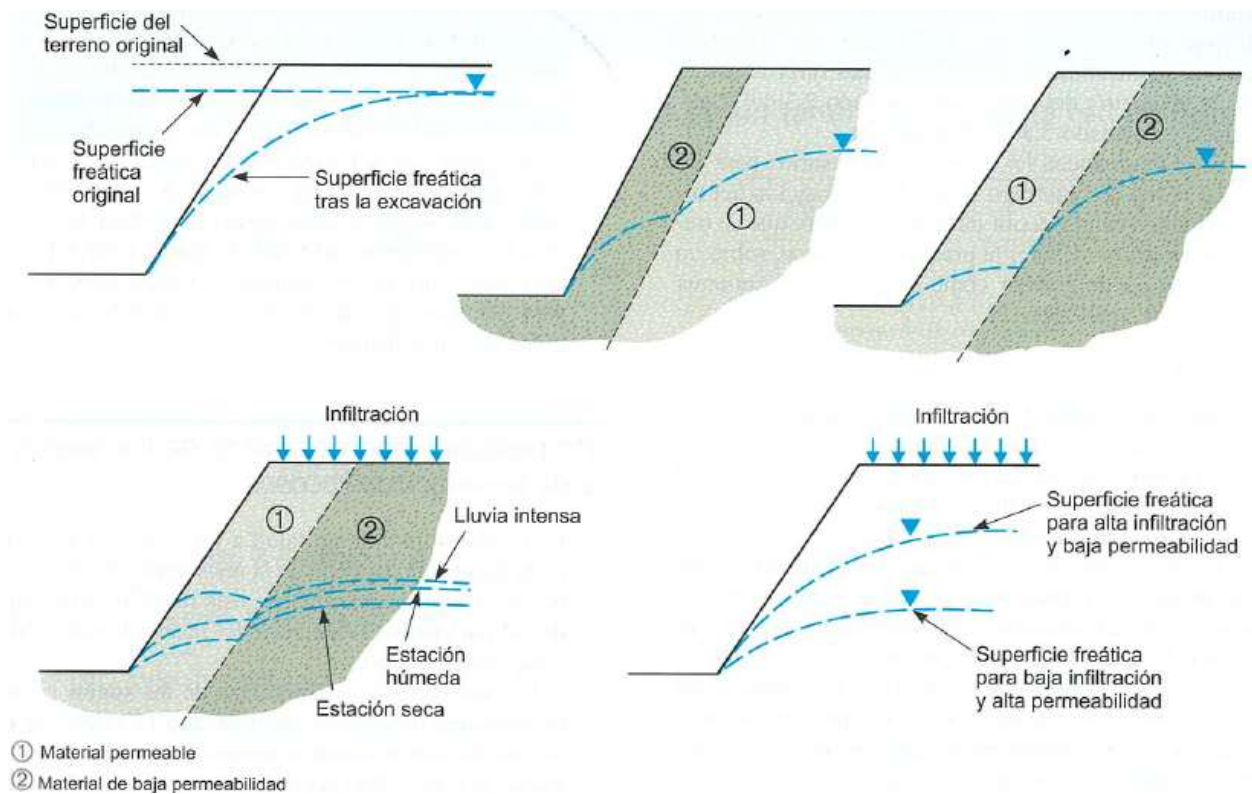


Figura 2.7 Tipos de niveles freáticos según la distribución de los materiales que constituyen el talud. Fuente: (González de Vallejo, 2002)

Es necesario conocer los aspectos más importantes para evaluar la distribución de las presiones intersticiales en el talud y los efectos desencadenantes del agua según (González de Vallejo, 2002) son:

- Conducta hidrogeológica de los materiales.
- Niveles freáticos y piezométricos.
- Presencia del flujo de agua en el talud.
- Coeficiente de permeabilidad, gradiente hidráulico.

2.4.5 Propiedades geomecánicas de los macizos rocosos

Cuando un talud sufre una rotura a favor de una superficie, ésta depende de la resistencia al corte de esta. Se conoce que depende de las propiedades

resistentes del material como la cohesión y el rozamiento interno. (González de Vallejo, 2002)

Para el caso de los macizos rocosos dependen, de las características de las discontinuidades, su litología y evolución geológica a lo largo de los años. La resistencia está sujeta a condiciones como la rugosidad, espaciado, espesor, continuidad y los planos de rotura pueden ser a favor de los planes de discontinuidades y a través de la matriz rocosa; de los cuales los últimos aportan resistencia al conjunto. (González de Vallejo, 2002)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el desarrollo de este proyecto está conformada por cuatro fases como se muestra en la Figura 3.1, las cuales son: I) Procesamiento y sistematización de información existente, II) Trabajo de campo, III) Caracterización geomecánica y evaluación de la susceptibilidad y finalmente IV) Análisis e interpretación de resultados.

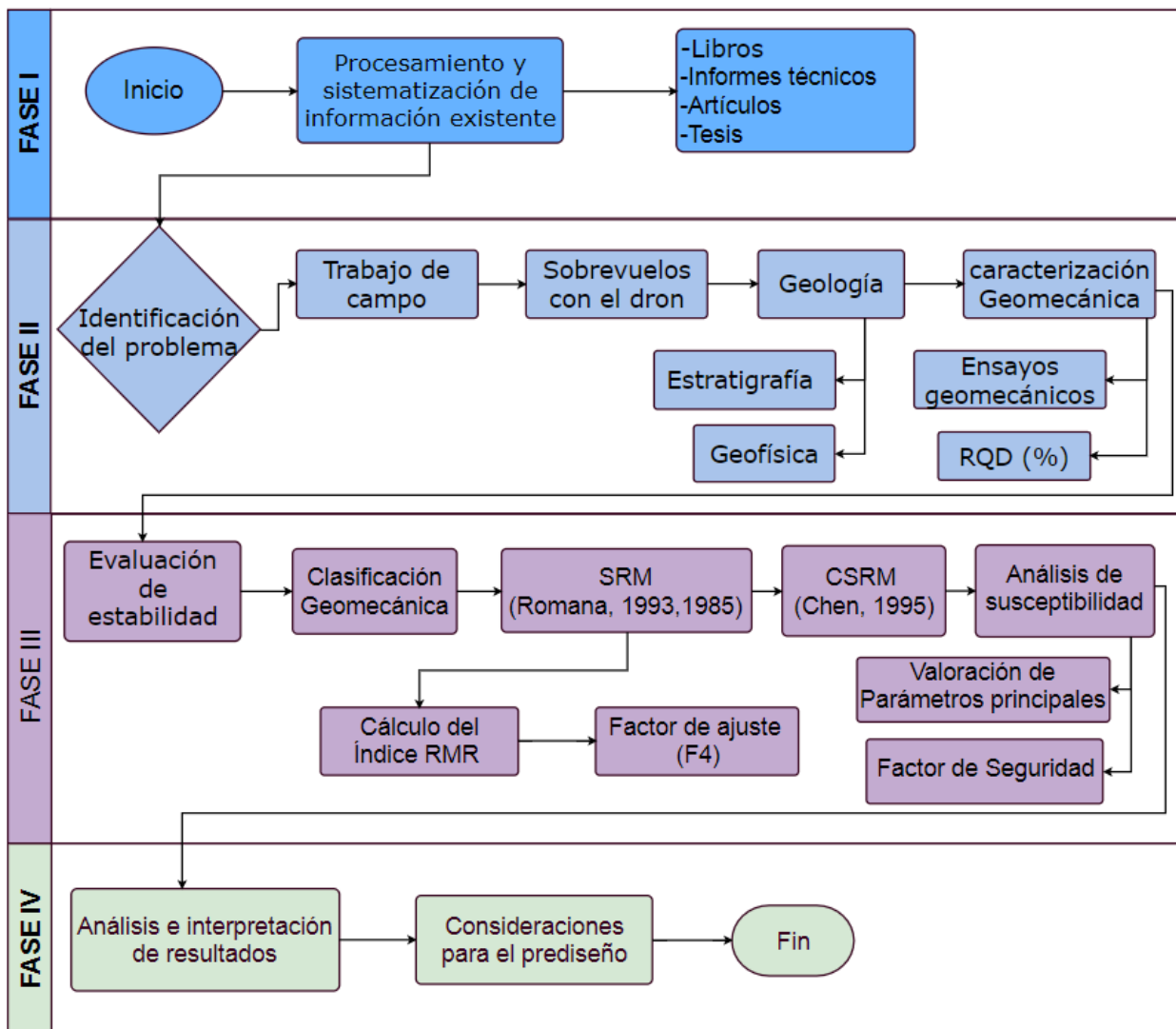


Figura 3.1 Flujograma de la metodología a seguir para el desarrollo del presente estudio.

3.1 Fase I: Procesamiento y sistematización de información existente

Para el desarrollo del presente proyecto se inicia con el procesamiento y sistematización de información existente, la cual está conformada por artículos científicos, informes técnicos, tesis de grado y trabajos que guarden relación con el presente estudio.

Adicionalmente, (Dinngo, 2018), explica las diferentes técnicas que se puede utilizar en cada una de las fases que conforman la metodología Desing Thinkg. Para la fase de empatizar se escogió la herramienta “observación encubierta”, la cual tiene como objetivo obtener información sin interferir en las acciones de los usuarios y de esta manera comprender y analizar la situación actual que se vive en el sitio.

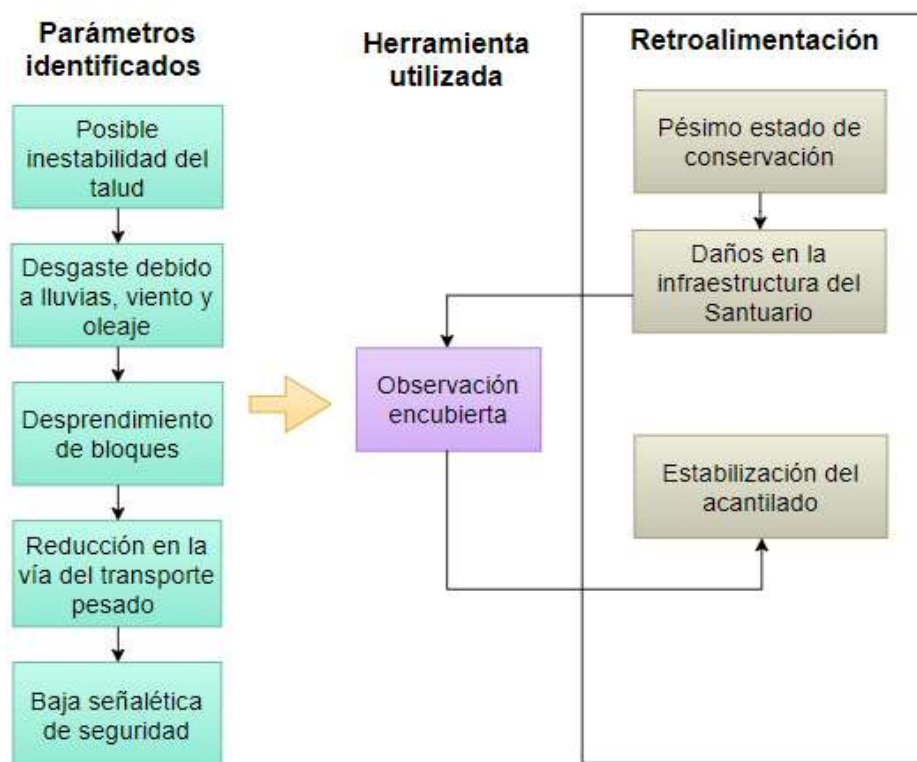


Figura 3.2 Parámetros identificados en la fase de empatizar dentro de la metodología Desing Thinking.

En la fase de definir el problema; (Dinngo, 2018), propone una serie de técnicas que pueden ser aplicadas, sin embargo, en el marco de nuestro estudio se eligió la

herramienta “Mapa de empatía”. Esta herramienta tiene como objetivo aumentar la empatía con los usuarios escogidos para definir el problema en el sector.

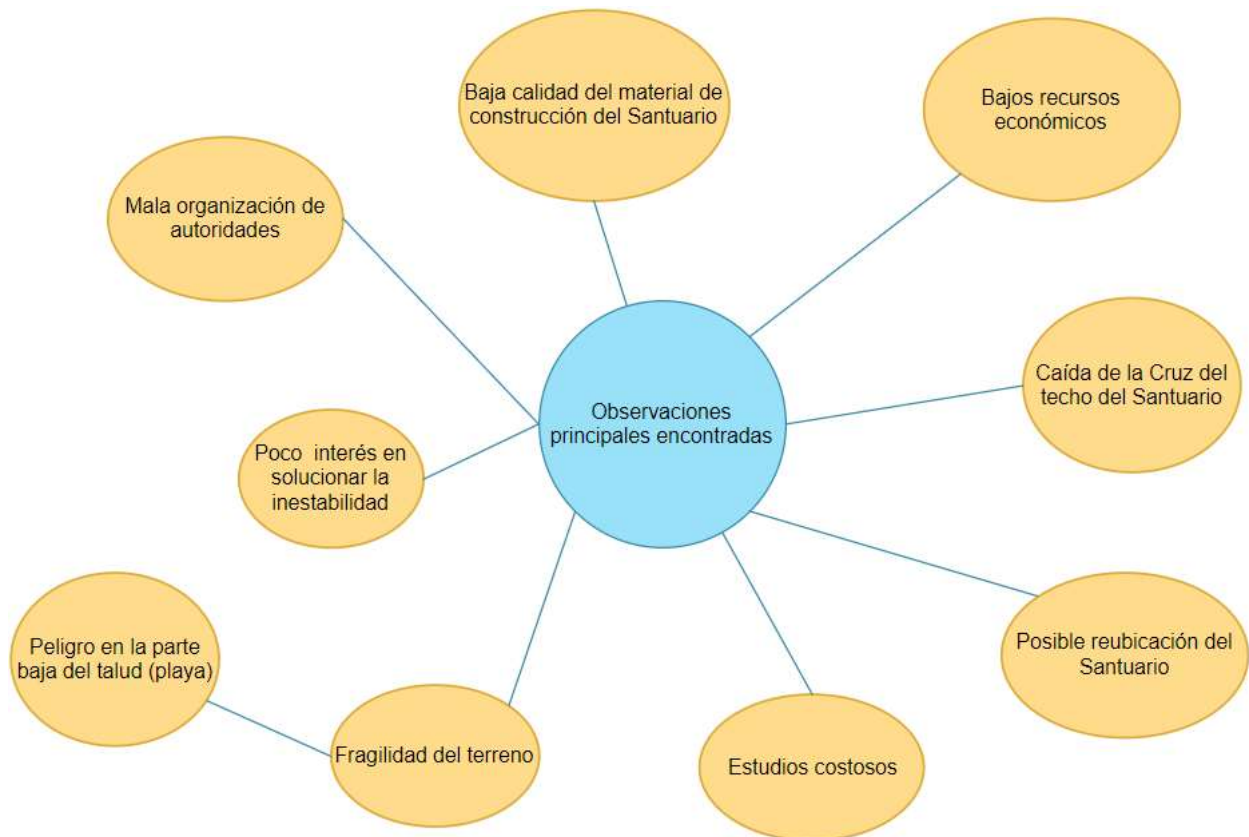


Figura 3.3 Mapa de empatía de la información obtenida mediante una entrevista cualitativa realizada en el sector.

Es importante resaltar la importancia de identificar, evaluar y plantear la problemática, analizando las causas que han derivado en el estado actual que presenta el escarpe y las afectaciones que trae consigo su inestabilidad.

Además, para el desarrollo del presente estudio es necesario recalcar que en el apartado del Estado de arte detallado en el capítulo 1; se estableció que la clasificación geomecánica propuesta por (Chen, 1995), se adapta de mejor manera para realizar una valoración geomecánica completa considerando el factor de la altura del talud, de igual forma, la metodología propuesta por (Aguilar & Ramírez, 2018), basándose en trabajos previos realizados por expertos, los cuales consideraron las condiciones que presentan las discontinuidades del escarpe,

permiten obtener un análisis completo de la susceptibilidad al desprendimiento de bloques del macizo rocoso.

Para el cálculo del factor de seguridad (FS) es necesario analizar los diferentes métodos propuestos por expertos como se ve en la Tabla 3.1, considerando las características que propone cada uno, para escoger el que mejor se adapte a nuestro talud.

Tabla 3.1 Métodos de estabilidad de taludes de acuerdo con los parámetros establecidos por varios expertos. Editado de (González de Vallejo, 2002)

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	Método muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Este método asume que todas las fuerzas cortantes entre dovelas son cero. Por lo tanto, no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Forma libre de superficie de falla.	Fuerzas	Janbú utiliza un factor de corrección E_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Forma libre de superficie de falla.	Fuerzas	Este método supone que las fuerzas poseen una dirección igual que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Forma libre de superficie de falla.	Fuerzas	Las fuerzas entre partículas presentan un ángulo igual al de la superficie del terreno y a las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Forma libre de superficie de falla.	Momentos y fuerzas	El ángulo de inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada.
Morgenstern y Price (1965)	Forma libre de superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El ángulo de inclinación de las fuerzas entre dovelas varía de acuerdo con una función arbitraria.
Elementos finitos	Forma libre de superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.

De acuerdo con las características que presenta el talud, se estableció que el método de (Morgenstern & Price, 1965), se ajusta a las condiciones del talud debido a la disposición que presentan las familias de discontinuidades identificadas en el macizo rocoso.

En la Figura 3.4 se representa la matriz de impacto vs esfuerzo, en la cual se analiza los parámetros identificados en el desarrollo del presente estudio. Analizando la posible implementación de un método de estabilización costoso que implicaría un mayor esfuerzo, por otro lado, realizar la reconstrucción del Santuario implicaría un alto impacto en la sociedad y no se brindaría una solución oportuna. Sin embargo, es necesario ejecutar obras con un alto grado de esfuerzo e interés para obtener una medida de estabilización que contemple los factores analizados en la fase previa.

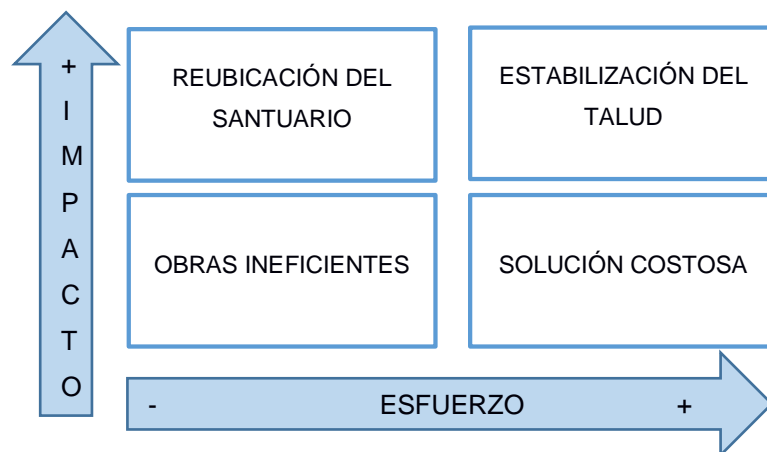


Figura 3.4 Matriz de Impacto vs Esfuerzo. Fuente: (Dinngo, 2018)

En esta fase se incluye la planificación de las salidas de campo, los materiales y equipos necesarios para realizar la fase II del presente estudio.

3.2 Fase II: Trabajo de campo

3.2.1 Visitas de campo

Previo al levantamiento de información se realizó el reconocimiento de campo y la disponibilidad de lugares adecuados para realizar sobre vuelos con el dron, los

mejores sitios para realizar los SEVs y tomografía geoeléctricas, así como también la descripción a macro y meso escala del talud.

3.2.2 Sobrevuelos con el dron

El dron marca “Phanton” 4 Pro, posee un “Sistema Flight Autonomy” con sensores adicionales en la parte trasera y lateral, el cual nos permite obtener imágenes en alta calidad, debido a la máxima resolución de su cámara (20 MP). La batería nos ofrece un sobrevuelo de 30 minutos, sin embargo, el tiempo puede variar en función del uso del dron. (DJI, 2016). Por este motivo se ha escogido el uso del dron ideal para realizar este tipo de trabajo.

El trabajo empieza con la planeación de los sobrevuelos **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (a) y la colocación de puntos de control en el terreno para la georreferenciación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (b). A continuación, el dron realizó el sobrevuelo en la zona de interés y se obtuvieron fotografías de alta resolución y mediante el software “Agisoft” se obtuvo el modelo digital del terreno (MDT), el cual nos servirá para la caracterización y valoración geomecánica del acantilado en las siguientes fases.

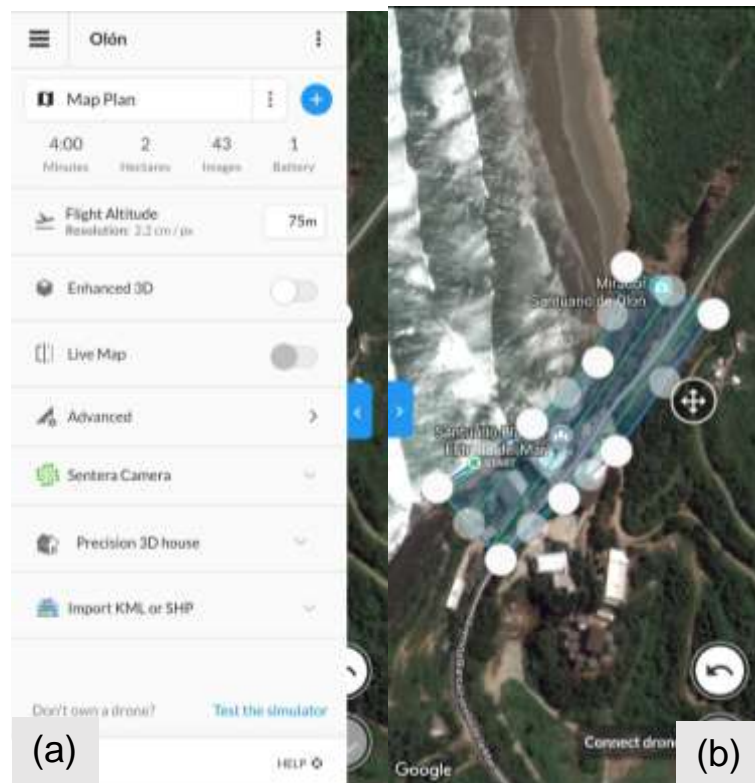


Figura 3.5 (a) Configuración del plan de vuelo. (b) Plan de vuelo programado para el dron.

3.2.3 Geología

En las salidas de campo realizadas hacia el cerro de Olón se identificaron algunos parámetros tales como: morfología del sector, potencia, dirección de estructuras, zonas con mayor susceptibilidad al desprendimiento, estado de las juntas, presencia de agua, siguiendo el esquema que se presenta en la Figura 3.6. mediante el uso de equipos y materiales previstos en la fase I.

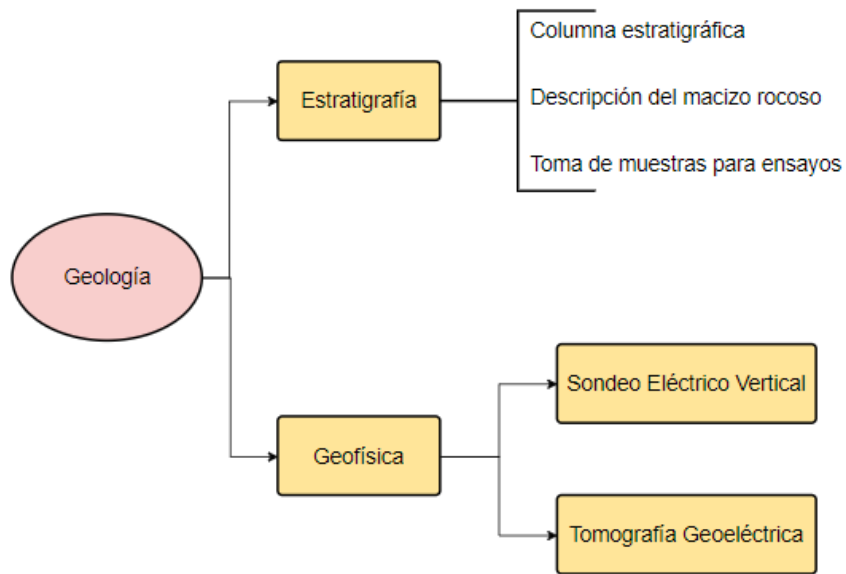


Figura 3.6 Flujograma de la metodología seguida en el levantamiento geológico

3.2.3.1 Estratigrafía del sector

Para la obtención de una columna estratigráfica del talud, fue necesario realizar una descripción a detalle de las diferentes unidades litológicas que afloran en el sector de interés (Figura 3.7), así como la dirección de buzamiento de las familias de discontinuidades. Adicionalmente se realizó la toma de muestras de diversos bloques del macizo rocoso para el análisis de las propiedades físico-mecánicas, de las cuales destacan: resistencia lineal a la compresión, resistencia a la tracción, cohesión y el ángulo de fricción interna, las cuales se detallarán en la valoración geomecánica.

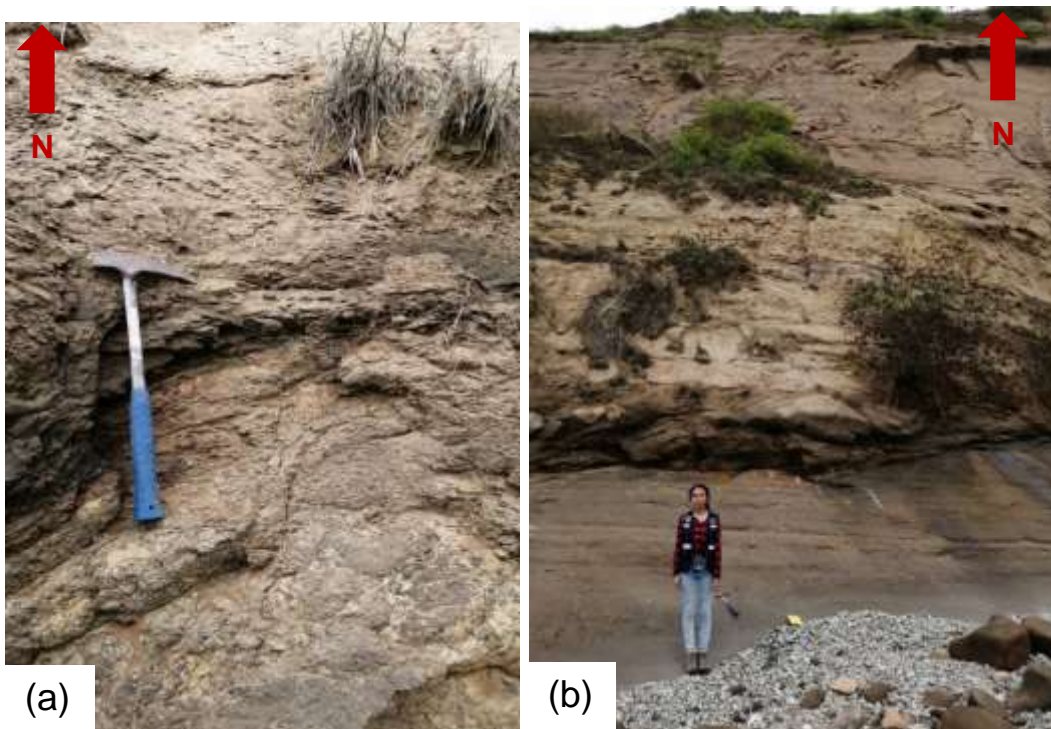


Figura 3.7 (a) Líticos de arenisca de grano fino a medio. (b) Segmento basal del talud.

3.2.3.2 Geofísica

Se establecieron los sitios estratégicos para realizar los ensayos geofísicos, determinando la parte superior e inferior del talud como zonas potenciales para realizar los mismos, los cuales son representados en la Figura 3.8.

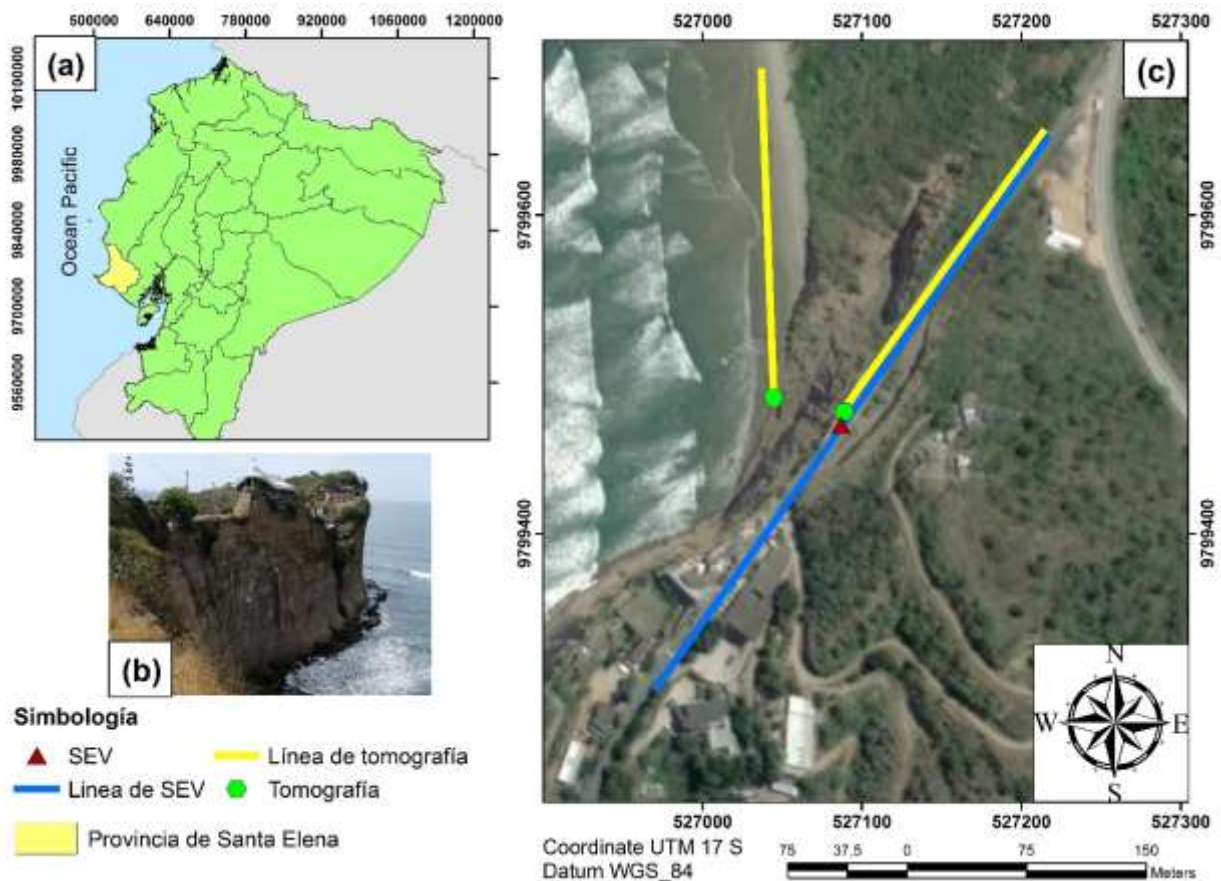


Figura 3.8 (a) Mapa de Ecuador. (b) Vista lateral del acantilado. (c) Mapa de ubicación de ensayos geofísicos (SEV y TG).

Tanto el SEV como las TGs se complementan y nos permiten obtener una mayor información acerca que posible litología y estructuras que presenta la zona de estudio.

3.2.3.2.1 Sondeo Eléctrico Vertical:

En el marco de nuestro proyecto, se realizó un sondeo eléctrico vertical (SEV), utilizando la configuración Schlumberger, debido a que la disposición horizontal es mayor respecto a la profundidad (Valetín, 2009). Para este ensayo se utilizó el equipo Terremeter SAS1000, dos carretes de cables, 40 electrodos y una batería de 12V, facilitados por el Centro de Investigación de Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT).

El SEV nos ayudará a identificar la litología que presenta la zona de estudio para una mejor comprensión del material que constituye el talud. Los datos obtenidos en campo fueron los valores de resistencia, alcanzando una distancia horizontal de 200 m respecto al centro. Éste valor se multiplicó por la constante y se obtuvo la resistividad aparente para cada uno de los puntos ubicados a lo largo de la línea de trabajo del sondeo.

3.2.3.2.2 Tomografía Geoeléctrica:

Para realizar las tomografías geoeléctricas (TG01 y TG02) se utilizó la configuración Wenner, la cual nos permite alcanzar una distancia horizontal mayor manteniendo fijo nuestro centro (Valetín, 2009). Se utilizó el equipo Terremeter SAS1000, un Tomógrafo, dos carretes de cables de 100 m cada uno, 42 electrodos y una batería de 12V.

Este ensayo se complementa con el SEV previamente realizado y nos permite tener más información que presenta la zona de estudio. Las tomografías realizadas alcanzan una distancia horizontal de 200 m y los datos obtenidos son obtenidos mediante el software "Terrameter ABEM100", y procesados con el software "Res2Inv", con el objetivo de obtener una sección de las resistividades que presentan los materiales que conforman el talud.

3.2.3 Caracterización geomecánica

La caracterización geomecánica se realizó mediante el análisis de las condiciones que presenta el talud, dirección de buzamiento y buzamiento como se presenta en la Tabla 3.2 ensayos geomecánicos realizados en el laboratorio y la obtención del índice RQD (%) considerando la valoración asignada para cada tipo, tal como se representa en la Figura 3.9.

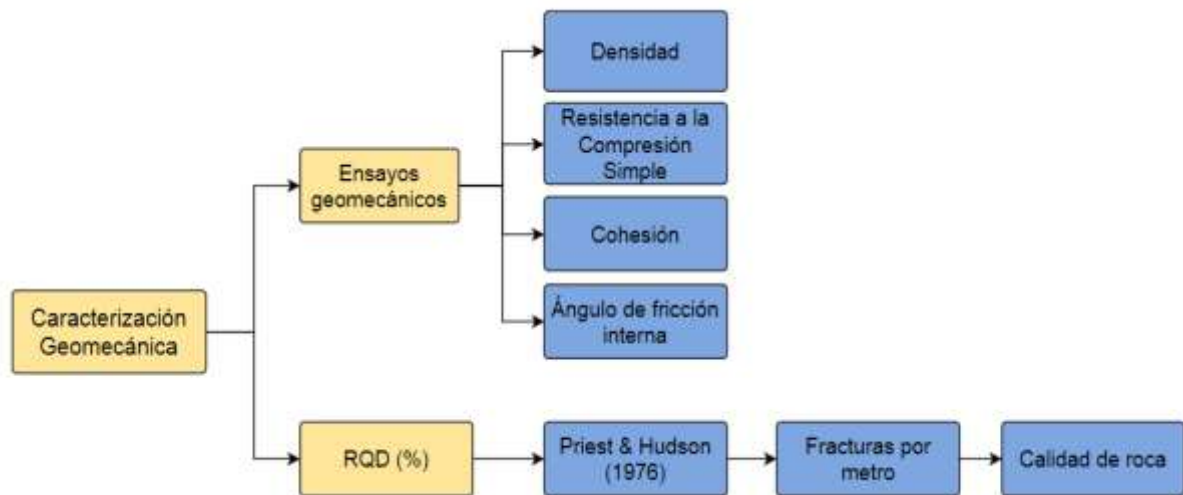


Figura 3.9 Flujograma de la metodología para la caracterización geomecánica.

Mediante las ortofotos obtenidas con el dron se generó un modelo tridimensional del talud. El talud fue dividido en seis sectores en base a las condiciones que presentan las cuales son:

- Presencia de agua
- Carga
- Erosión
- Desprendimiento de bloques
- Mayor fracturación

Tabla 3.2 Cambios de la dirección del talud por zonas.

Dirección	Zona 1	Zona 2
Dirección de buzamiento (Db)	145°	170°
Buzamiento (Bz)	88°	83°

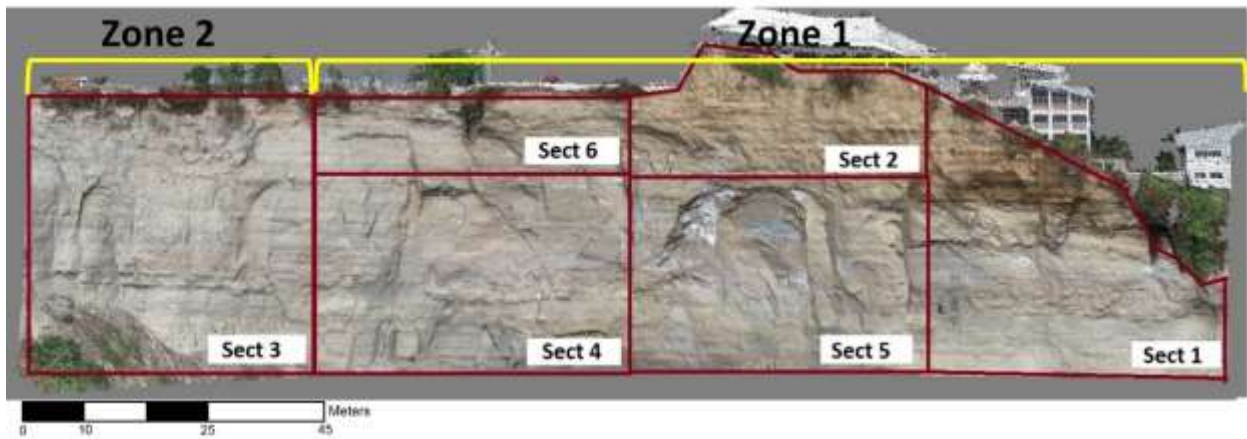


Figura 3.10 Subdivisión del talud.

El Talud presenta un cambio de dirección en el sector 3, (

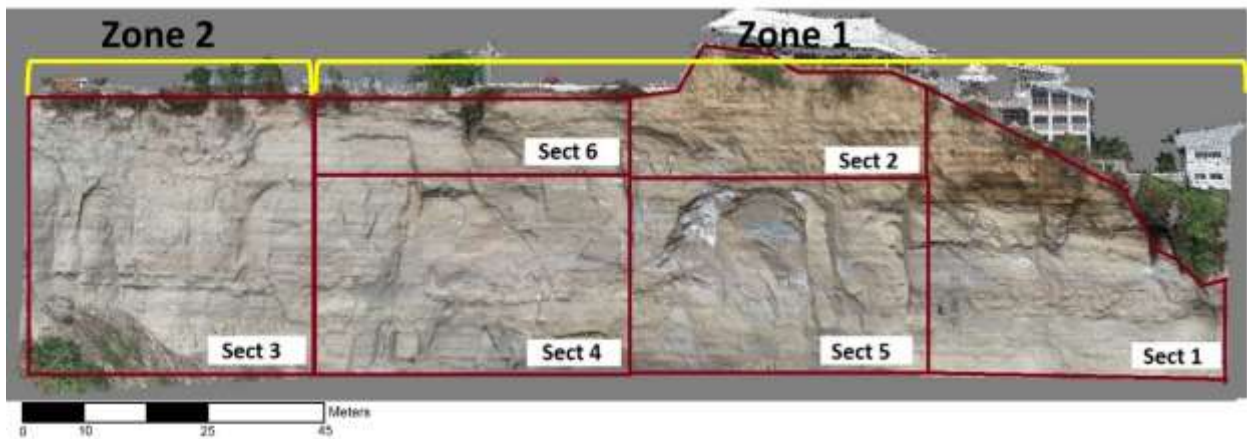


Figura 3.10), por tal motivo, se ha dividido en 2 zonas, las cuales se presentan detalladamente en la Tabla 3.3

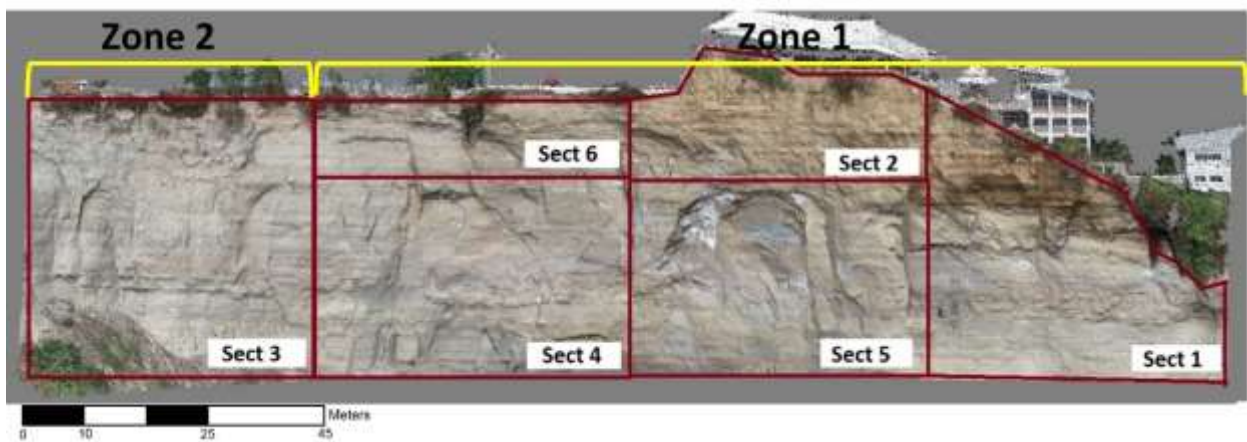


Tabla 3.3 Dirección de buzamiento y buzamientos de las zonas conforman el talud.

Medidas	Familia de Discontinuidades	Zona 1	Zona 2
		Sec. 1, 2, 4, 5 y 6	Sec. 3
Dirección de buzamiento	F1	148°	160°
	F2	189°	174°
	F3	151°	152°
Buzamiento	F1	90°	80°
	F2	31°	16°
	F3	61°	86°

3.2.3.1 Ensayos geomecánicos

Se obtuvieron muestras en el campo y posteriormente fueron enviadas al laboratorio, con el objetivo de determinar los siguientes valores:

- Resistencia a la compresión simple
- Cohesión
- Densidad
- Ángulo de fricción interna

En el laboratorio de suelos de la Escuela Superior Politécnica del Litoral se realizó el ensayo de Resistencia Lineal a la Compresión utilizando el Martillo de Schmidt para muestras in situ. La densidad fue determinada según el método de la parafina, el cual consiste en secar las muestras por intervalos de 24 horas y cubrirlas con parafina líquida para obtener su peso y mediante una ecuación de densidad aparente obtener los resultados. Para determinar el valor de cohesión se utilizó los círculos de tensiones de Mohr-Coulomb tomando los valores de resistencia obtenidos en los primeros ensayos. Y para calcular el del ángulo de fricción interna se utilizó el criterio de Hoek-Brown.

3.2.3.2 Rock Quality Designation

Definido por Deere (1988), fue utilizado como una clasificación para la estabilidad de macizos rocosos. El RQD nos permite obtener la calidad de un macizo rocoso y puede ser determinado a partir del muestreo de la línea de exploración, en

tramos intactos de más 10 cm. Este método considera el espaciamiento entre las fracturas; por este motivo Priest & Hudson (1976), propone la siguiente fórmula:

$$RQD = 100 \times e^{-0.1\lambda} \times (0.1\lambda + 1) \quad (3.1)$$

Donde:

λ : es el número de fracturas por metro

El valor del RQD obtenido será en porcentaje de 0 a 100, y será clasificado como se muestra en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Valoración de la clasificación RQD (%). Fuente: (NGI, 2015)

Rock Quality Designation (RQD)		
A	0-25	Muy pobre
B	25-50	Pobre
C	50-75	Medio
D	75-90	Bueno
E	90-100	Muy bueno

Con el objetivo de obtener la valoración RQD en el talud, se dividieron en subsectores, obteniéndose el promedio para cada sector, representados en la Tabla 3.5

Tabla 3.5 División por subsectores para la obtención el RQD.

Zona	Sector	Subsectores			
Zona 1	1	1	2	3	
	2	1	2	3	
	4	1	2	3	4
	5	1	2		3
	6	1			2
Zona 2	3	1	2	3	4

3.3 Fase III: Evaluación de estabilidad

Siguiendo la metodología aplicada por (Aguilar & Ramírez, 2018), se identificó las condiciones que presenta el talud y posteriormente se utilizó la clasificación

geomecánica propuesta por (Chen, 1995). Además, se realizó el análisis de la susceptibilidad al desprendimiento de bloques y finalmente, se calculó el Factor de Seguridad (FS) utilizando los perfiles de la topografía obtenida previamente. Para determinar el índice SMR, se debe sumar el RMR básico más el producto de estos tres factores (factor de ajuste, orientación de las juntas y factor de excavación) ($F1 \times F2 \times F3$)

3.3.1 Clasificación geomecánica

Las condiciones de estabilidad que presenta el talud fueron evaluadas mediante la clasificación CSMR propuesta por (Chen, 1995), sin embargo, para aplicar dicha clasificación, se realizó una evaluación previa utilizando la clasificación SMR propuesta por (Romana M. , 1985)

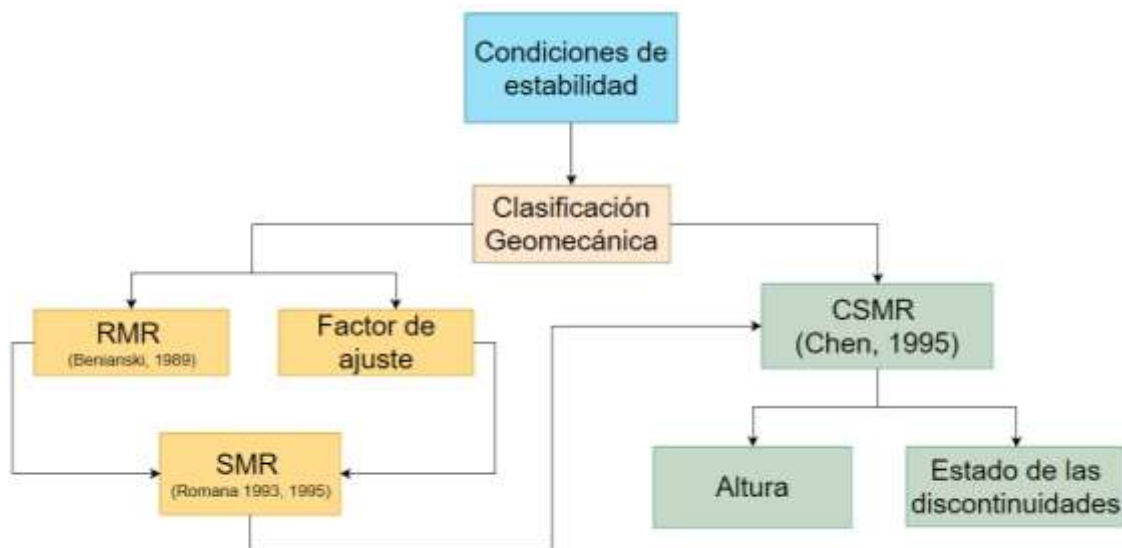


Figura 3.11 Flujograma del análisis de condiciones de estabilidad del talud.

3.3.1.1 SMR (Slope Mass Rating)

La clasificación propuesta por (Romana M. , 1993,1995), es una variación que presenta (Bieniawski Z. , 1989), en su clasificación para túneles, mediante la implementación de factores de corrección.

Para determinar el SMR, se debe sumar al RMR básico un factor de ajuste, orientación de las juntas, el producto de estos tres factores (F1xF2xF3) y un factor de excavación. (Romana, Serón, & Montalar, 2001)

$$\text{SMR} = \text{RMR} + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (3.2)$$

3.3.1.1.1 Cálculo del RMR

Los valores del RMR están entre 0 a 100 y se calcula para cada familia considerando el flujo del agua regular o irregular, grado de meteorización de la roca, para ambos casos se debe considerar los valores más desfavorables. Tabla 3.6 (Romana, Serón, & Montalar, 2001).

Tabla 3.6 Valoraciones para obtener el índice RMR. Fuente: (Bieniawski Z. , 1989)

RMR básico= Σ VALORACIONES							
PARÁMETRO	VALORACIONES						
Resistencia a la compresión simple (MPa)	> 250	250-100	100-50	50-25	< 25		
	15	12	7	4	25-5	5-1	<1
RQD (%)	100-90	90-75	75-50	50-25	<25		
	20	17	13	6	3		
Separación entre juntas (mm)	>2000	2000-600	600-200	200-60	<60		
	20	15	10	8	5		
Longitud de Disc. (m)	L<1 (m)	1<L<3 (m)	3<L<10 (m)	10<L<20 (m)	L>20 (m)		
	6	4	2	1	0		
Rugosidad	Muy rugosas	Rugosas	Algo rugosas	Ondulada	Suave		
	6	5	3	1	0		
Separación (mm)	Cerradas	Separación<1 mm	Separación 0.1-1 mm	Separación 1-5 mm	Separación > 5 mm		
	6	5	3	1	0		
Relleno (mm)	Ausente	Duro<5mm	Duro>5mm	Blando< 5 mm	Blando >5mm		
	6	5	3	1	0		
Estado de bordes	Sanos	Poco meteorizados	Medio meteorizados	Muy meteorizados	Descompuesta		
	6	5	3	1	0		
Valoración	30	24	14	5	0		
Presencia de flujo de agua en las juntas	Seco 0	Poco húmedo (0-0.1)	Húmedo (0.1-0.2)	Muy húmedo (0.2-0.5)	Fluye -0.5		
	15	10	7	4	0		

Según la valoración de los parámetros analizados anteriormente, se asigna un grado de calidad al macizo rocoso, de acuerdo con los valores de la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Calidad de macizos rocosos de acuerdo con el índice RMR obtenido. Fuente: (Bieniawski Z. , 1989)

Rock Mass Rating (RMR)		
A	100-81	Muy buena
B	80-61	Buena
C	60-41	Media
D	40-21	Mala
E	<20	Muy mala

3.3.1.1.2 Factor de ajuste

Es el producto de tres subfactores, los cuales son descritos a continuación:

F1: Este factor depende cuan paralelo sea la dirección las juntas y la cara del talud. Su valor oscila entre 1.00 (cuando los dos son paralelos) y 0.15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es $>30^\circ$). Estos valores son calculados según la ecuación 3.1:

$$F1 = (1 - \text{sen } |\alpha_j - \alpha_s|)^2 \quad (3.3)$$

En donde:

α_j y α_s : Dirección de buzamiento (DB) de la junta y talud respectivamente.

F2: Este factor depende del buzamiento que presente la junta en una rotura plana. Su valor varía entre 1.00 (juntas con buzamiento $>45^\circ$) y 0.15 (juntas con buzamiento $<20^\circ$). Se establece mediante la ecuación:

$$F2 = \text{tg}^2(\beta_j) \quad (3.4)$$

En donde:

β_j : Es el buzamiento de la junta.

F3: Representa la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Entre mayor sea el buzamiento de la junta, las condiciones que presenta serán más desfavorables.

F4: Este factor depende del método de excavación utilizado y según (Romana, Serón, & Montalar, 2001) se estableció para las siguientes condiciones:

- Los taludes naturales son más estables, debido a procesos previos de erosión y a mecanismos internos de protección, tales como: vegetación, desecación superficial, drenaje torrencial,). $F4 = + 15$.
- El precorte de un talud aumenta su estabilidad. $F4 = + 10$.
- Técnicas de voladura suave (recorte), aumentan la estabilidad de los taludes. $F4 = + 8$.
- Técnicas de voladuras normales, no modifican la estabilidad. $F4 = 0$.
- Técnicas de voladura defectuosas, pueden dañar seriamente a la estabilidad. $F4 = - 8$.

En la siguiente Tabla 3.8, se presenta las valoraciones para cada factor de ajuste según Romana (1985):

Tabla 3.8 Factores de ajuste de la clasificación SMR. Fuente: (Romana M. , 1985)

$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$					
Factores de ajuste (F1, F2, F3)	$\alpha_j =$ Dirección de buzamiento de la junta $\alpha_s =$ Dirección de buzamiento del talud			$\beta_j =$ Buzamiento de la junta $\beta_s =$ Buzamiento del talud	
	Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
Rotura Plana $ \alpha_j - \alpha_s $	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
Rotura Vuelco $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Rotura plana $ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
Vuelco	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
Rotura plana $\beta_j - \beta_s =$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
Vuelco $\beta_j + \beta_s =$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
Valoración	0	- 6	- 25	- 50	- 60
Factor de ajuste según el método de excavación	$F4 =$ valores empíricos establecidos para cada método de excavación				
	Talud Natural	Precorte	Voladura Suave	Voladura o Mecánico	Voladura Deficiente

	+ 15	+ 10	+ 8	0	- 8
--	------	------	-----	---	-----

3.3.1.1.3 Tipos de estabilidad

Según Romana, et al (2001), si los valores obtenidos del SMR son menores a 20, el talud se caerá rápidamente. Cabe mencionar que no se ha identificado un talud con valoración SMR menor a 10, lo que indica que no son factibles físicamente. En la Tabla 3.9 se representan el tipo de rotura asociado al valor del SMR obtenido:

Tabla 3.9 SMR asociado para cada tipo de rotura. Fuente: (Romana, Serón, & Montalar, 2001)

Tipo de rotura	Intervalos SMR	Frecuencia
Rotura plana	15 < SMR < 40	Mucha
	40 < SMR < 60	Significativa
Rotura en cuña	40 < SMR < 55	Mucha
	59 < SMR < 75	Poca
Rotura por vuelco	50 < SMR < 65	Significativa
	30 < SMR < 40	Poca

De acuerdo con el valor del índice SMR obtenido, se asigna un grado de calidad tal como se representan la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Tipos de estabilidad según el índice SMR. Fuente: (Romana, Serón, & Montalar, 2001)

CLASES DE SMR					
SMR	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0
Descripción	Muy Buena	Buena	Normal	Mala	Muy Mala
Grado de estabilidad	Muy Estable	Estable	Medio Inestable	Inestable	Muy Inestable

3.3.1.1 (CSMR) Chinese Slope Mass Rating

La clasificación propuesta por (Chen, 1995), es una variación al método SMR convencional. Y se agrega dos coeficientes (ζ y λ) a la Ecuación 3.1:

$$\text{CSMR} = (\zeta \times \text{RMR}) - (\lambda \times F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (3.5)$$

En donde:

ζ : Altura y según Hassan & Hani (2017), se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\zeta = 0.57 + ((0.43 \times 80) / H) \quad (3.6)$$

De acuerdo con Hassan & Hani (2017), la ecuación (3.6) es aplicable, cuando la altura de la pendiente es $H > 80$ m; y para una altura de pendiente $H \leq 80$ m, el parámetro es igual a 1.

λ : Es el factor que representa las condiciones que presentan las discontinuidades y varía entre 0.7 (planos de estratificación unidos) y 1.0 (juntas débiles), como se muestra en la Tabla 3.11:

Tabla 3.11 Valores de λ para las discontinuidades. Fuente: (Chen, 1995)

Condiciones de las discontinuidades	Valor (λ)
Juntas, planos de estratificación unidos estrechamente	0.7
Planos de estratificación, juntas de gran escala con presencia de agua.	0.9-0.8
Fallas, juntas largas y débiles rellenas de arcillas.	1.0

3.3.2 Análisis de susceptibilidad al desprendimiento

De acuerdo con la metodología planteada por expertos: Anbalagan (1992), Nicholson (1997), Suárez (1998), Blanco (2015) los cuales consideran los siguientes parámetros representados en la Figura 3.12

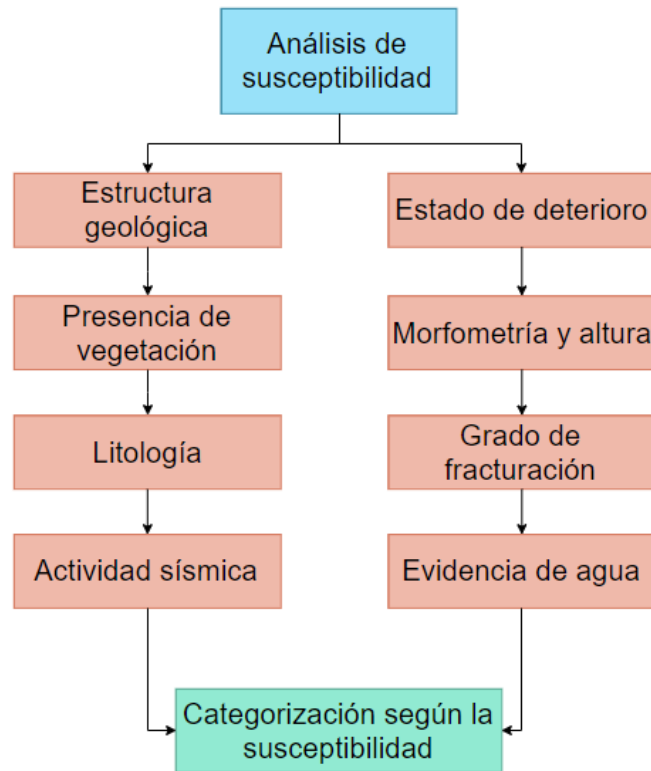


Figura 3.12 Flujograma para el análisis de susceptibilidad al desprendimiento.

Siguiendo la metodología propuesta por Aguilar & Ramírez (2018), los parámetros principales utilizados son detallados en la Tabla 3.12:

Tabla 3.12 Valoración asignada a cada parámetro principal. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Parámetro principal	Valoración máxima para el análisis de la susceptibilidad al desprendimiento (SD)
Estructura geológica	4.0
Presencia de vegetación	4.0
Litología	4.0
Actividad sísmica	4.0
Estado de deterioro	4.0
Morfometría y altura	6.0
Grado de fracturación y bloques claves	6.0
Evidencia de agua	6.0

Cada parámetro principal escogido fue evaluado y se les asignó las siguientes ponderaciones:

3.3.2.1 Estructura geológica

Tabla 3.13 Características y estado de la roca con su respectiva valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Características y estado de la roca	Categoría	Valoración
Planos del talud muy débiles que favorecen el desprendimiento de bloques	IV	4.0
Planos del talud débiles que favorecen el desprendimiento de bloques.	III	2.0 – 3.0
Planos del talud poco débiles que favorecen el desprendimiento de bloques.	II	1.0 – 2.0
Planos del talud que favorecen el desprendimiento de bloques.	I	0.0 – 1.0

3.3.2.2 Presencia de vegetación

Tabla 3.14 Condiciones existentes para la presencia de vegetación. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Condiciones existentes	Categoría	Valoración
Ladera o talud cubierto mayormente por presencia de vegetación	III	2.0
Ladera o talud cubierto parcialmente por presencia de vegetación	II	1.0
Ladera o talud cubierto mínimamente por presencia de vegetación	I	0.0

3.3.2.3 Litología

Tabla 3.15 Características litológicas y su valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Estado y características de la roca	Categoría	Valoración
Suelos mayor erosionables	V	4.0
Suelo mayor deteriorados	IV	3.0
Roca deteriorada que conserva características de la matriz	III	2.0
Roca con poca meteorización y poca fractura	II	1.0
Roca en óptimas condiciones (sana, competente)	I	0.0

3.3.2.4 Actividad sísmica

Tabla 3.16 Valoración asignada para cada característica sísmica. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Características existentes (<i>as</i>)	Categoría	Valoración
(<i>as</i> > 0.20 g) Muy alta sismicidad.	VI	4.0
(0.14 a 0.20) g, Alta sismicidad	V	3.5
(0.10 a 0.14) g, sismicidad mediana	IV	2.5
(0.05 a 0.10) g Baja sismicidad	III	2.0
(0.02 a 0.05) g Muy baja sismicidad.	II	1.0
No existe sismicidad	I	0.0

Siendo *as*: actividad sísmica.

3.3.2.5 Estado de deterioro

Tabla 3.17 Deterioro de la roca y valoración asignada para cada término. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Descripción	Término	Valoración
Material rocoso transformado en suelo en su totalidad. La estructura y textura del macizo se han destruido.	Suelo Residual	4.0
Material rocoso descompuesto y/o transformado en suelo en su totalidad. La estructura del macizo se conserva.	Completamente meteorizado	3.0
Material rocoso descompuesto poco menos de la mitad en suelo. La roca sana se encuentra como un entramado discontinuo.	Altamente meteorizado	2.5

Material rocoso descompuesto poco más de la mitad en suelo. La roca sana se encuentra como un entramado discontinuo.	Moderadamente meteorizado	2.0
La meteorización del material rocoso y de las discontinuidades se evidencia con la decoloración.	Ligeramente meteorizado	1.0
Material rocoso sin meteorización. Presenta pequeñas decoloraciones en las principales discontinuidades.	Sano	0.0

3.3.2.6 Morfometría y altura

Tabla 3.18 Características morfométrica y su respectiva valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Características existentes	Categoría	Valoración
Talud >35m de altura, pendiente suave.	VI	6.0
Talud 24<H<35 m de altura, pendiente suave	V	3.5 – 5.0
Talud =24m de altura y pendientes suaves.	IV	2.5 – 3.5
Talud =18m de altura y pendientes suaves.	III	1.5 – 2.5
Talud =10m de altura y pendientes suaves.	II	1.0
Talud <5m de altura y pendiente muy baja	I	0.0

3.3.2.7 Grado de fracturación y bloques claves

Tabla 3.19 Grado de fracturación y su valoración. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Características existentes	Categoría	Valoración
Discontinuidades con un espaciamiento <6 cm, abertura > 50mm, meteorizada. Presencia de algunos bloques claves en el sector.	V	4.5 – 6.0
Discontinuidades con un espaciamiento de 6-20 cm, con abertura de 1.0-5.0 mm, meteorizada. Presencia de al menos 1 bloque clave.	IV	3.0 – 4.5
Discontinuidades con un espaciamiento de 20-60 cm, con abertura de 0.5-1.0 mm, poco meteorizada. Presencia de al menos 1 bloque propenso a clave.	III	1.5 – 3.0

Discontinuidades con un espaciamiento de 60-20 cm, con abertura de 1.0-0.5 mm, poco meteorizada. No hay presencia de bloques claves.	II	1.5
Discontinuidades con un espaciamiento >20 cm, con abertura de <1.0 mm (casi cerradas). No presenta meteorización.	I	0.0

3.3.2.8 Evidencia de agua

Tabla 3.20 Valoración según la evidencia de agua. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Características	Categoría	Valoración
Mayor presencia de agua y de percolación al macizo. Se generan presiones intersticiales altas.	V	- 6.0
Presencia de agua y percolación al macizo. Puede existir agua subterránea y la generación de presión intersticial.	IV	4.0 – 5.0
Poca presencia de agua y percolación en el macizo, Posible presencia de agua subterránea.	III	2.0 – 3.0
Muy poca presencia de aguas superficiales. No se produce percolación al macizo. El agua subterránea poca influye.	II	1.0 – 2.0
No existe presencia de agua. (subterránea o superficial)	I	0.0

Una vez evaluada la susceptibilidad según la valoración para cada uno de los parámetros principales y de acuerdo a la clasificación propuesta por Mora (2004), modificada por Blanco (2015), y utilizada en el trabajo desarrollado por Aguilar & Ramírez (2018), la cual nos permite asignar una categoría al tipo de susceptibilidad desde muy alta hasta muy baja, tal como se muestra en la Tabla 3.21.

Tabla 3.21 Categorización según el grado de la susceptibilidad. Fuente: (Aguilar & Ramírez, 2018)

Grado de susceptibilidad	Descripciones	Categoría
Muy baja susceptibilidad: $SD < 8.0$	Condiciones estables.	I
Baja susceptibilidad: SD (8 y 15)	Condiciones estables, con monitoreo adecuado	II
Mediana susceptibilidad: SD (15 y 21)	Condiciones parcialmente estables, presencia de un monitoreo sistemático.	III
Alta susceptibilidad: SD (21 y 28)	Condiciones potencialmente inestables que favorecen al desprendimiento.	IV
Muy alta susceptibilidad: $SD > 28$	Condiciones muy inestables que favorecen al desprendimiento.	V

3.3.3 Factor de Seguridad (FS)

Utilizando la topografía generada por GPS diferencial y sobrevuelos con el dron se realizaron 5 perfiles del talud, como se muestra en la Figura 3.13 considerando las condiciones que presenta el talud.

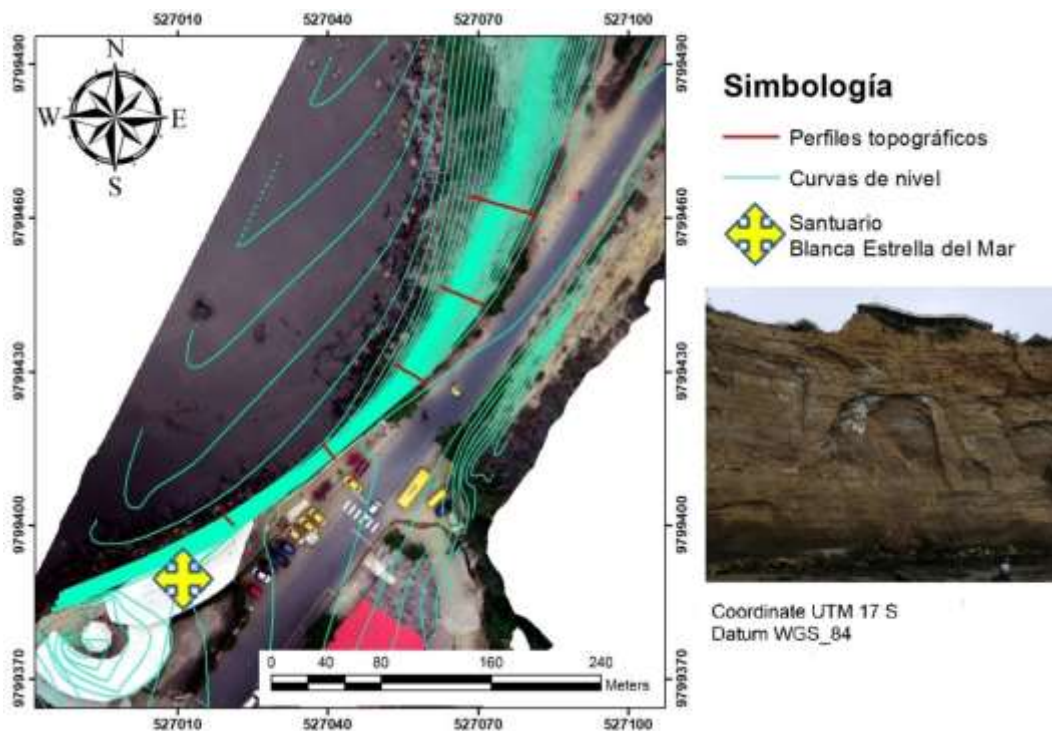


Figura 3.13 Perfiles topográficos obtenidos mediante el Software ArcGis.

Para el cálculo del Factor de Seguridad se utilizaron los valores del peso específico, cohesión, ángulo de fricción y litología previamente obtenidos en los ensayos geomecánicos, los cuales fueron ingresados al software "Slide 5.0" y utilizando el método propuesto por Morgenstern & Price (1965), se obtuvo dos factores de seguridad, que se describen a continuación:

- **FS** Hipotético: considera la superficie de falla para la altura total del talud.
- **FS** Real: indica la altura a la cual el talud se vuelve inestable considerándose un peligro para las personas.

De estos dos factores de seguridad, se escogió el menor factor de seguridad real para las consideraciones en el prediseño de estabilización del talud.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Caracterización geológica

Mediante la información levantada en campo se identificó la estratigrafía que presenta el talud en base a la descripción de líticos que van desde arenisca de grano de fino a medio con clastos de color marrón claro a oscuro, seguido de una unidad de lutita saturada de grano medio, con una meteorización esferoidal muy marcada que favorece el desprendimiento de los bloques ubicada en sector de mayor fracturación del talud, como se representa en la Figura 4.1. La estratificación presenta una dirección de buzamiento de N189° y una dirección de buzamiento de 31°. El talud está conformado por 5 unidades las cuales suman una potencia total de 39 m.

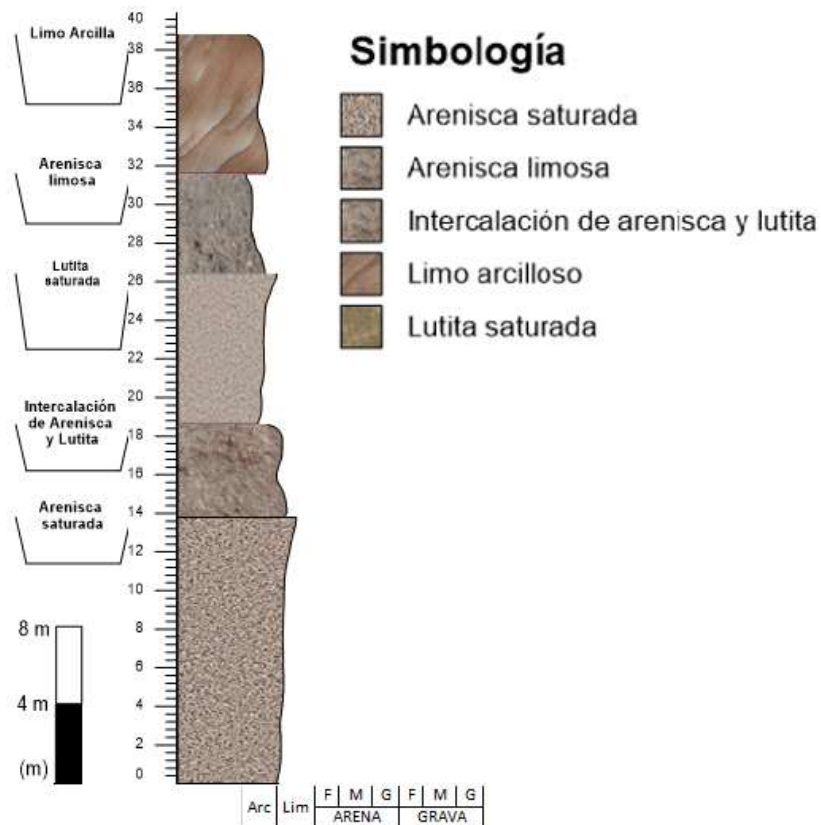


Figura 4.1 Columna estratigráfica del talud del cerro de Olón

Tabla 4.1 Descripción de las unidades litológicas que conforman el talud.

Unidad	Líticos	Descripción
A	Arenisca saturada	Arenisca con un alto grado de compactación, matriz arenosa de color marrón oscuro a claro. Mayor consolidación en su base, clastos muy redondeados, presencia de material calcáreo, potencia aproximada de 13.8 m. Dirección de buzamiento y buzamiento de N174°/16° respectivamente.
B	Intercalación de Arenisca-Lutita	Bloques de arenisca calcáreas en su base y lutitas saturadas en el techo, presenta una gradación normal con una coloración de marrón oscuro a grisáceo, con una potencia aproximada de 4.80 m.
C	Lutita saturada	Bloque de lutitas de color gris a marrón oscuro, alto de grado de fracturación y meteorización esferoidal, potencia aproximada 7.8 m.
D	Arenisca limosa	Material fino compactado de color marrón claro a oscuro, potencia de 5.2 m.
E	Limo arcilloso	Bloque de material fino de color marrón claro, con estratos centimétricos a decimétricos, dirección de buzamiento y buzamiento de N175°/35° respectivamente. Presencia de agua en un costado del talud, potencia de 7.2 m. Sedimentos de baja resistencia.

4.2 Geofísica

Mediante la campaña geofísica realizada, se pudo obtener los valores de resistividad que presenta cada estrato del macizo rocoso.

4.2.1 Sondeo Eléctrico Vertical:

Las resistividades obtenidas en campo se representan en la Tabla 4.2, alcanzando una distancia de 147 m en superficie.

Tabla 4.2 Valores de resistividad obtenidos en las campañas geofísicas.

CÓDIGO:				SEV_01	
FECHA:				28/03/2019	
COORDENADAS X:				529736.00	
COORDENADAS Y:				9799538.00	
COORDENADAS Z:				40	
Estación	Abertura	Abertura	Constante	Resistencia	Resistividad

Punto	AB/2	MN/2	K	(ohm)		(ohm.m)
1	1	0,2	7,54	9,4982	Ω	71,616428
2	1,47	0,2	16,66	2,7077	Ω	45,110282
3	2,15	0,2	35,99	807,96	mΩ	29,0784804
4	3,16	0,2	78,11	217,99	mΩ	17,0271989
5	4,64	0,2	168,78	92,182	mΩ	15,55847796
6	4,64	0,5	66,85	171,92	mΩ	11,492852
7	6,81	0,2	363,92	40,177	mΩ	14,62121384
8	6,81	0,5	144,91	73,169	mΩ	10,60291979
9	10	0,5	313,37	30,82	mΩ	9,6580634
10	14,7	0,5	678,08	16,366	mΩ	11,09745728
11	14,7	2	166,58	54,893	mΩ	9,14407594
12	21,5	0,5	1451,42	7,1626	mΩ	10,39594089
13	21,5	2	359,91	21,384	mΩ	7,69631544
14	31,6	2	781,13	9,4583	mΩ	7,388161879
15	46,4	2	1687,79	3,8363	mΩ	6,474868777
16	46,4	5	668,52	9,2967	mΩ	6,215029884
17	68,1	2	3639,24	2,6311	mΩ	9,575204364
18	68,1	5	1449,1	4,9829	mΩ	7,22072039
19	100	5	3133,75	1,2953	mΩ	4,059146375
20	100	10	1555,09	5,2282	mΩ	8,130321538
21	147	5	6780,83	0,8123	mΩ	5,508068209
22	147	10	3378,63	2,6014	mΩ	8,789168082

A continuación, utilizando el Software “Ipi2win” se procesó la data con el objetivo de obtener la curva de resistividad para su respectiva interpretación.

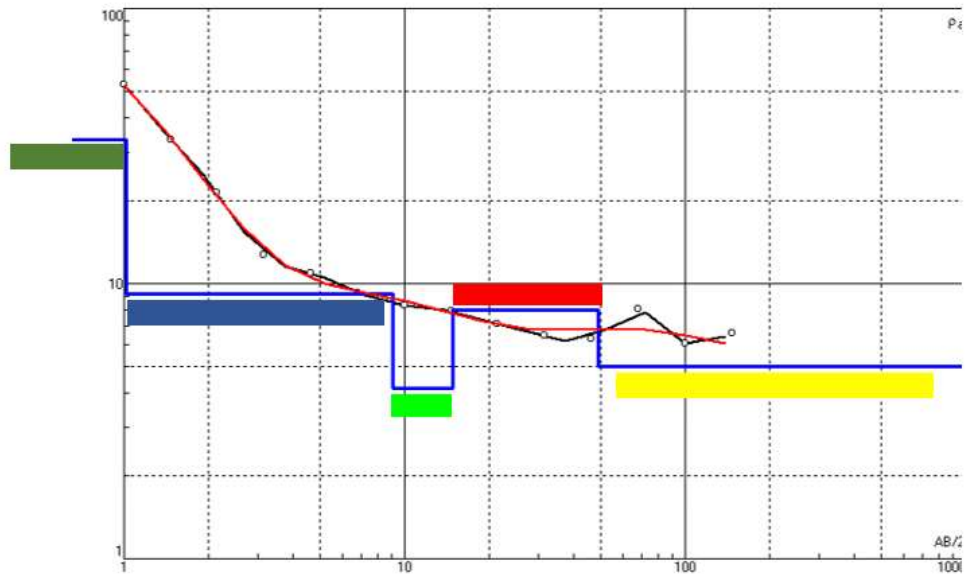


Figura 4.2 Curva de resistividad del SEV_01

Error = 5.36%

N	ρ	h	d	Alt
1	103	0.379	0.379	-0.3786
2	33.2	0.64	1.02	-1.019
3	9.19	8.02	9.04	-9.043
4	4.17	5.75	14.8	-14.8
5	8.01	34.2	49	-49.02
6	5			

Figura 4.3 Parámetros obtenidos del SEV_01.

Tabla 4.3 Descripción de las unidades obtenidas en SEV.

N°	Resistividad	Espesor	Profundidad	Descripción
1	103	0.379	0.37	Suelo limo-arcilloso
2	33.2	0.64	1.02	Arcilla
3	9.19	8.02	9.04	Lutita saturada
4	4.17	5.75	14.8	Arenisca saturada
5	8.01	34.2	49	Arenas y gravas saturadas

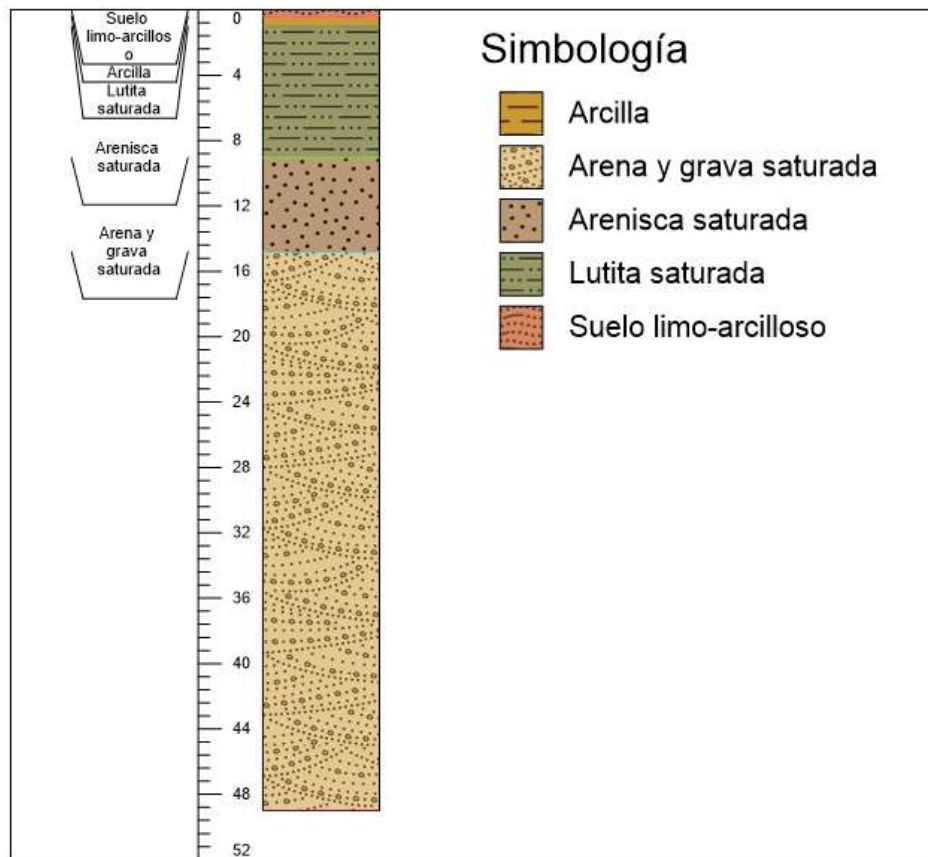


Figura 4.4 Representación de la columna litológica obtenida del SEV01.

4.2.1.1 Interpretación:

En la Figura 4.2 se representa la curva de resistividad obtenida en el software “Ipi2win” obteniendo un ajuste de error al 5.36% tal como se muestra en la Figura 4.3, este error es asociado a irregularidades en el terreno que van desde la topografía del sector hasta la disponibilidad de la superficie para llegar alcanzar un mayor abertura de los electrodos impidiendo alcanzar una mayor profundidad.

En la Tabla 4.3 se describen las unidades que presenta el subsuelo mediante el análisis de la curva de resistividades. Obteniendo que la primera capa posee una resistividad de 103 Ω .m alcanzando una profundidad de 0.37 m. Este valor es característico de suelo limo-arcilloso.

La segunda capa registra una resistividad de 33.2 Ω .m llegando a una profundidad aproximada de 1.02 m. Valor característico de la arcilla. La tercera capa llega

hasta los 9.04 m de profundidad con una resistividad de 9.19 Ω .m. interpretando como una capa de lutita saturada por flujo salino.

Según la curva de resistividad la cuarta capa alcanza una profundidad de 14.8 m con una resistividad de 4.17 Ω .m, la cual es interpretada como una arenisca saturada por flujo salino. Finalmente, la quinta capa muestra una resistividad 8.01 Ω .m y una profundidad de 49 metros, cuyo valor es asociado a una arenisca con intercalación de grava saturada.

4.2.2 Tomografía Geoeléctrica

La Tomografía Geoeléctrica es un estudio complementario de la geofísica, que nos permite obtener una mayor información acerca de las capas que conforman el subsuelo.

En las Figura 4.5 y Figura 4.6, se representa la exterminación de puntos previo a la obtención de la sección Geoeléctrica, seleccionando los puntos que presenten una mayor desviación estándar y que pueden afectar con el resultado final.

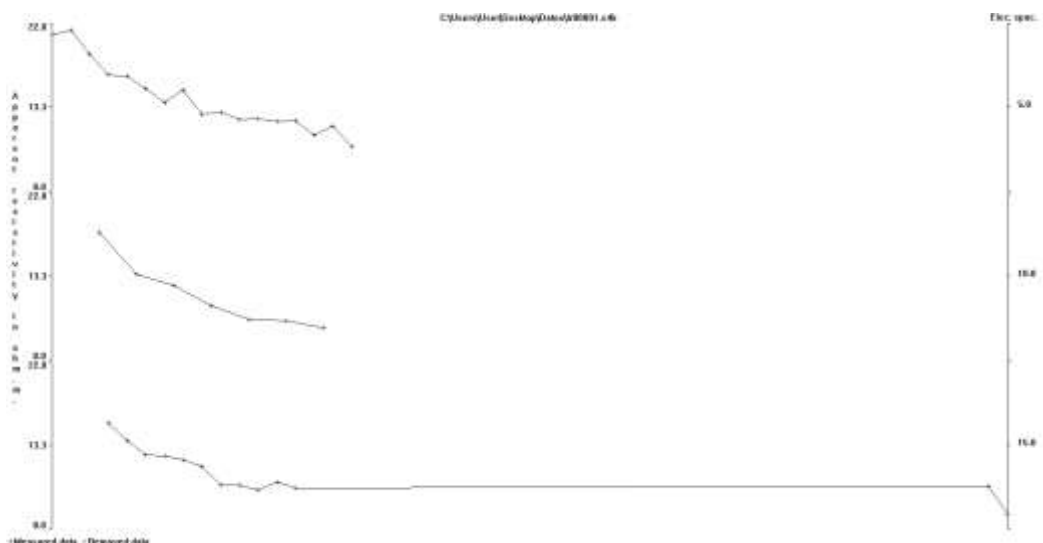


Figura 4.5 Exterminación de puntos de la curva de resistividad para la TG01 utilizando el software “Res2Inv”.

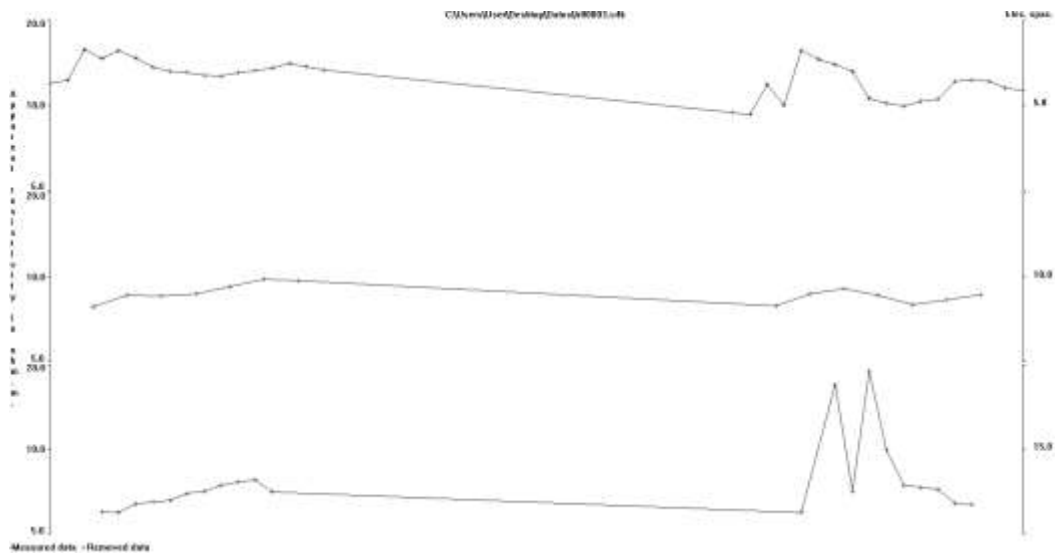


Figura 4.6 Exterminación de puntos de la curva de resistividad para la TG02 utilizando el software “Res2Inv”.

4.2.2.1 Interpretación:

4.2.2.1.1 Tomografía Geoeléctrica 01:

Para la (TG01) se alcanzó una profundidad de 14.3 m, con un error mínimo de 0.2% debido a las facilidades que presenta el sector. En la parte inicial de la tomografía se obtuvo valores de resistividad muy bajas asociadas a rocas sedimentarias saturadas por flujo salino. En la parte central se observan rocas con una resistividad que oscila entre 9 a 15 $\Omega.m$ interpretadas como material lutítico saturado. Además, la tomografía revela un aumento de resistividad conforme avanza la línea de trabajo de esta, alcanzando valores de hasta 31 $\Omega.m$ relacionados a material limo-arcilloso.

En la parte central de la TG01, se presenta una anomalía asociada a una meteorización esferoidal muy marcada que influye en la continuidad de las capas, lo cual altera la disposición subhorizontal de las capas, respecto a los lados derecho e izquierdo de la tomografía.

4.2.2.1.2 Tomografía Geoeléctrica 02:

En la (TG02) se llegó a una profundidad de 13.4 m, con un error del 2.2% debido a la topografía que presenta el sector. Se obtuvo como resultado valores bajos de resistividad 5 Ω .m, asociados a material sedimentario fino saturado por flujo salino. En el centro de la tomografía se registraron valores de 10 a 18 Ω .m, que se interpreta como material lutítico arcilloso saturado y en la parte final de la tomografía se obtuvieron valores de 30 Ω .m pertenecientes a material fino consolidado.

En la Tabla 4.4, se representa los colores utilizados para representar las unidades identificadas en la tomografía geoeléctricas.

Tabla 4.4 Intervalo de resistividad asignado para cada unidad litológica

Intervalo de resistividad	Color	Unidad
(0-5) Ω .m		Arenisca saturada
(5-9) Ω .m		Arenisca-lutita
(9-15) Ω .m		Lutita saturada
(15-20) Ω .m		Arenisca-limosa
(20-90) Ω .m		Limo-arcillosa

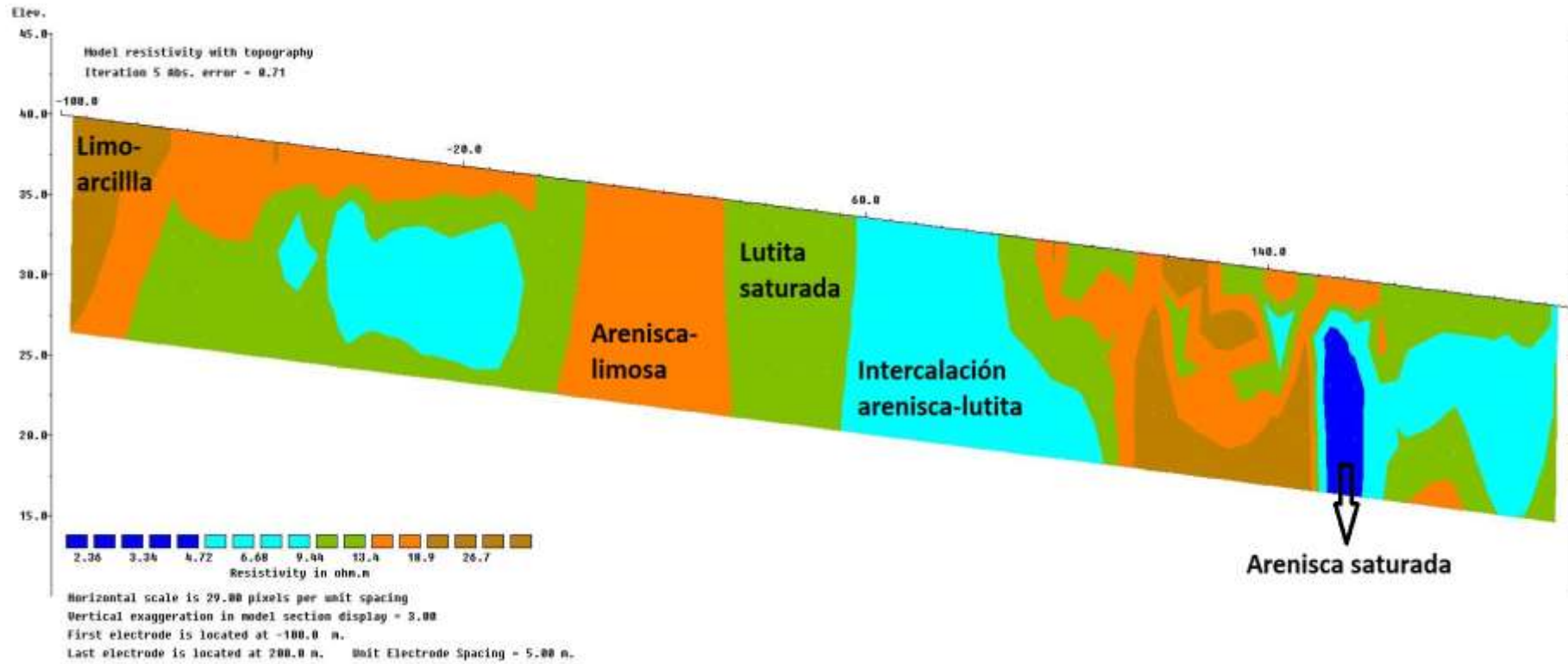


Figura 4.7 Tomografía Geoeléctrica (TG01) de la zona de estudio

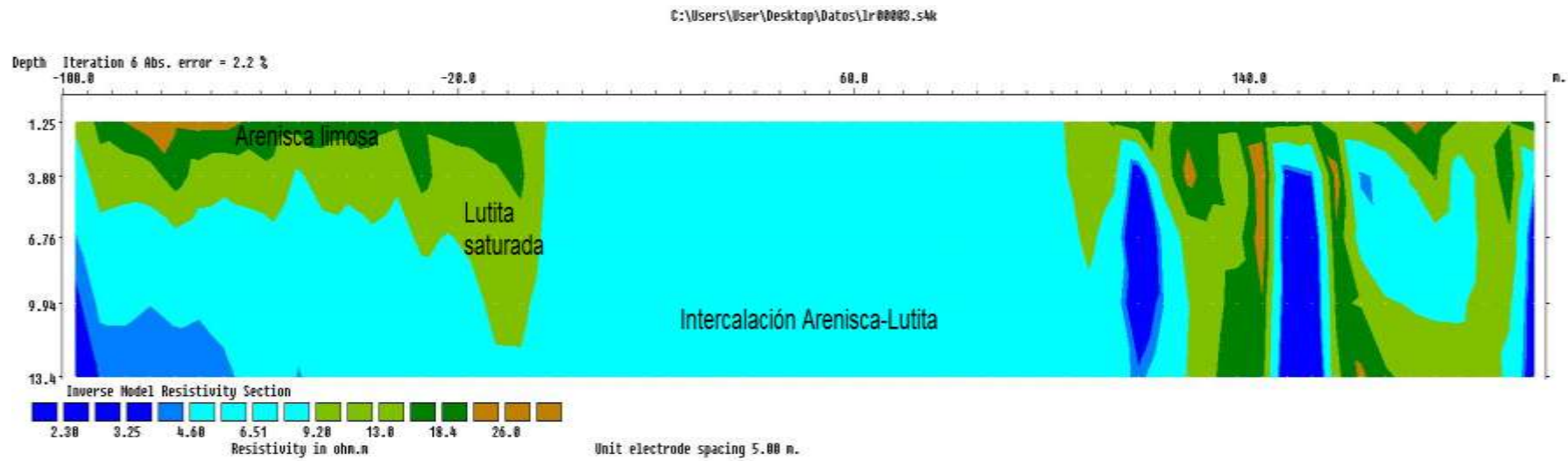


Figura 4.8 Tomografía Geoeléctrica (TG02) de la zona de estudio

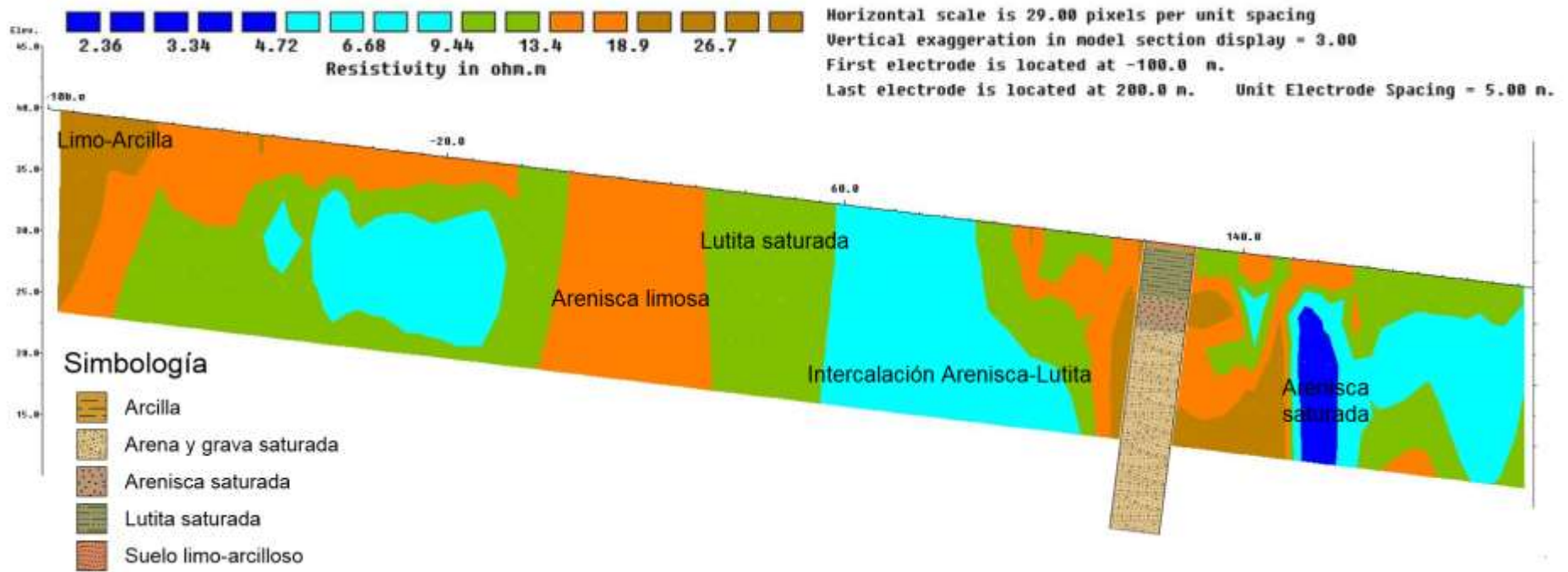


Figura 4.9 Correlación entre el SEV01 y la TG01.

4.2.2.1.3 Correlación:

En la Figura 4.9 se presenta la tomografía geoelectrica en conjunto con el sondeo eléctrico vertical, los valores de resistividad obtenidos en ambos ensayos revelan presencia de material arcilloso seguido de material lutítico y su parte basal conformada por arenisca.

Los espesores varían debido a la composición de los materiales lo cual dificulta el paso del flujo de corriente, sumado a la presencia de meteorización esferoidal ubicada en la parte inferior del escarpe, que influye directamente en el flujo de agua, la cual busca circular por la zona de fracturación formando la sección subvertical en esta parte del perfil tomográfico, de igual forma ocurre en el sector 1, ya que se presentan sedimentos saturados debido a la ubicación de un sistema de drenaje de aguas lluvias.

4.3 Propiedades geomecánicas

Los resultados obtenidos en el Laboratorio de Suelos de la ESPOL son detallados en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Propiedades geomecánicas de las muestras obtenidas en campo.

N°	Muestra	Peso específico (KN/m ³)	Resistencia a la compresión simple (MPa)	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
1	Arenisca	18.22	13.2	5.2	37.1
2	Lutita	2.17	10	3.65	30.5
3	Limo-arcillosa	18.03	12.3	6.05	39
4	Arenisca-limosa	18	13	5.52	37.9

4.4 Rock Quality Designation (RQD)

Para realizar una mejor valoración geomecánica se estableció subsectores de cada zona identificada y detallada en la Tabla 3.4. A continuación, se presenta el análisis realizado para cada uno de los sectores que conforman el talud.

4.4.1 Zona 1

4.4.1.1 Sector 1

Para la obtención del RQD (%) se estableció 3 subsectores, debido a la morfología que presenta el talud seccionado (Figura 4.10), obteniendo como resultado los valores presentados en la Tabla 4.6, asignándole un RQD de calidad **media** para ese sector.

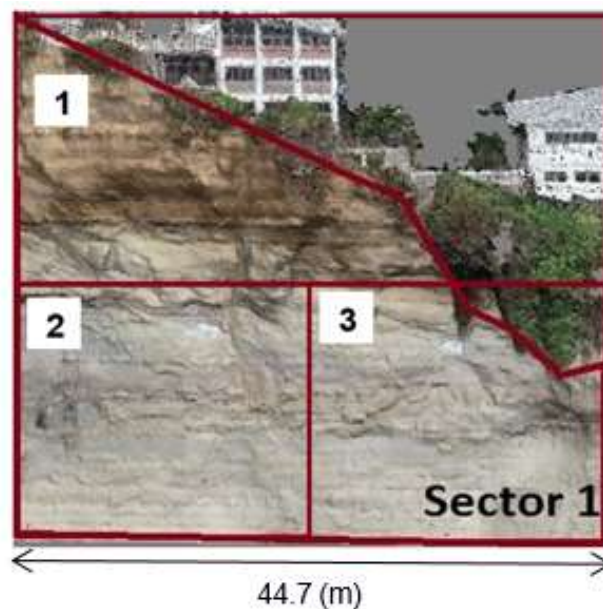


Figura 4.10 Subdivisión del sector 1.

Tabla 4.6 Cálculo del RQD (%) para el sector 1.

Parámetros	Subsectores		
	1	2	3
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	15.98	19.5	22.29
Fracturas por metro	9	22	13
RQD (%)	46.28	46.28	62.68
Promedio RQD (%)	51.75		
Categoría	Medio		

4.4.1.2 Sector 2

En el sector 2 se dividió en tres subsectores (Figura 4.11), los cuales poseen los valores presentados en la Tabla 4.7 con una calidad **media** de RQD.

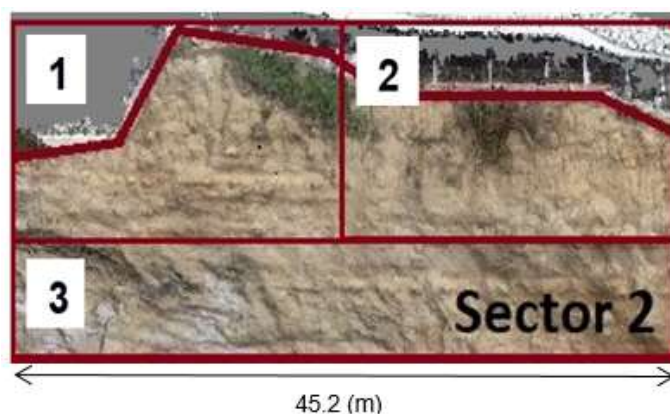


Figura 4.11 Subdivisión del sector 2.

Tabla 4.7 Cálculo del RQD (%) para el sector 2.

Parámetros	Subsectores		
	1	2	3
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	22.43	14.49	15.93
Fracturas por metros	10	11	11
RQD (%)	69.90	69.90	35.46
Promedio RQD (%)	58.42		
Categoría	Medio		

4.4.1.3 Sector 4

Para una mayor facilidad del análisis del RQD, se subdividió el sector en cuatro subsectores (Figura 4.12), obteniéndose una valoración de RQD (%) **medio** para el sector 4 (Tabla 4.8).

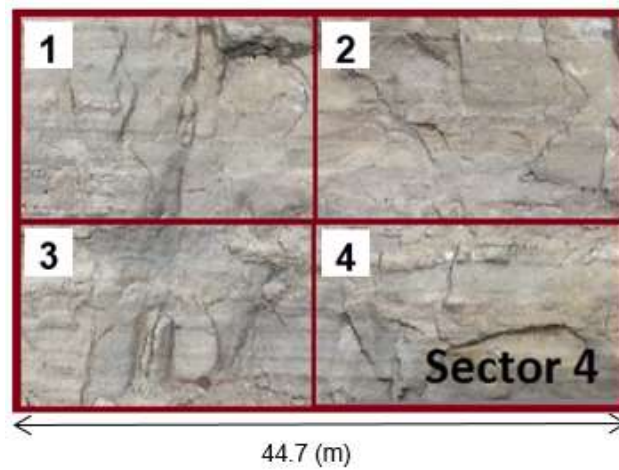


Figura 4.12 Subdivisión del sector 4

Tabla 4.8 Cálculo del RQD (%) para el sector 4.

Parámetros	Subsectores			
	1	2	3	4
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	29.70	58.93	23.65	24,85
Fracturas por metro	12	14	10	15
RQD (%)	66,26	55,78	73,58	55,78
Promedio RQD (%)	62,85			
Categoría	Medio			

4.4.1.4 Sector 5

El sector 5 fue dividido en 3 sectores (Figura 4.13), obteniendo valores que se representan en la Tabla 4.9 consiguiendo una calidad **media** de RQD.

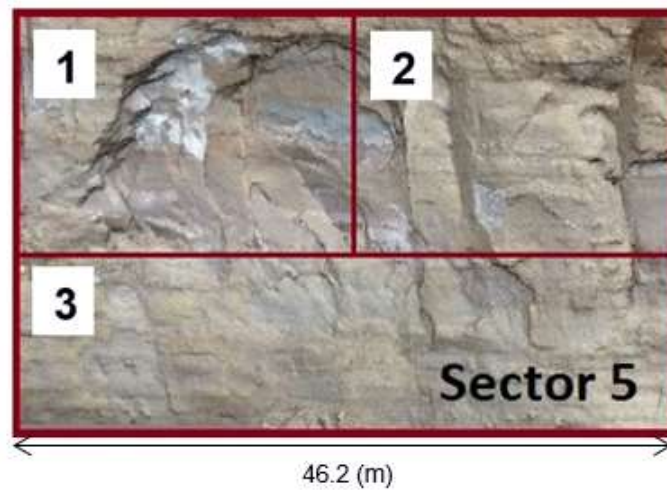


Figura 4.13 Subdivisión del sector 5.

Tabla 4.9 Cálculo del RQD (%) para el sector 5.

Parámetros	Subsectores		
	1	2	3
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	24,37	24,37	35,46
Fracturas por metro	17	18	15
RQD (%)	49,32	46,28	55,78
Promedio RQD (%)	53,63		
Categoría	Medio		

4.4.1.5 Sector 6

El sector 6 presenta una división de subsectores debido a la ubicación y morfología que presenta el talud en ese sector en específico (Figura 4.14), alcanzando un RQD de calidad **media** (Tabla 4.10).

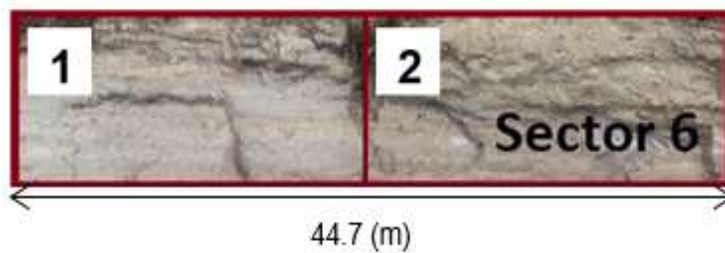


Figura 4.14 Subdivisión del sector 6.

Tabla 4.10 Cálculo del RQD (%) para el sector 6.

Parámetros	Subsectores	
	1	2
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	25.28	19.93
Fracturas por metro	14	13
RQD (%)	59,18	69,68
RQD (%) Promedio	60,93	
Categoría	Medio	

4.4.2 Zona 2

4.4.2.1 Sector 3

El sector presenta una subdivisión de 4 sectores (Figura 4.15), obteniendo los valores representados en la

Tabla 4.11 y un RQD de **buena** calidad.

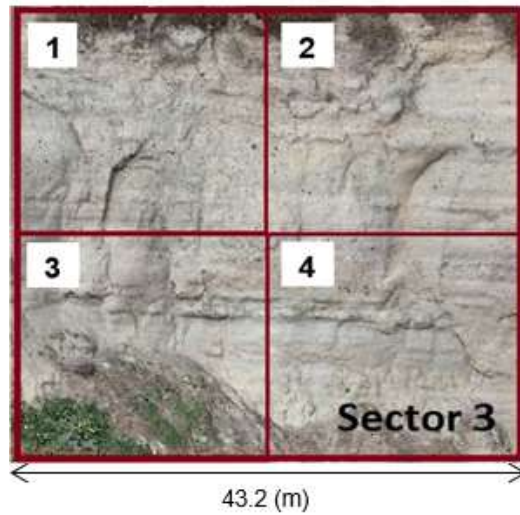


Figura 4.15 Subdivisión de la zona conformada por el sector 3.

Tabla 4.11 Cálculo del RQD (%) para el sector 3.

Parámetros	Subsectores			
	1	2	3	4
Promedio de la distancia entre las fracturas (cm)	27,73	27,45	21,93	33,34
Fracturas por metro	14	19	7	8
RQD (%)	59,18	43,17	84,42	80,88
Promedio RQD (%)	74,83			
Categoría	Bueno			

A continuación, en la Tabla 4.12 se presenta de forma resumida el valor de RQD (%) obtenido para cada sector.

Tabla 4.12 Calidad de los sectores del talud según el porcentaje de RQD obtenido.

Zona	Sector	RQD (%)	Calidad
Zona 1	1	51,75	Baja
	2	58,42	Media
	4	62,85	Media
	5	53,63	Media
	6	60,93	Media
Zona 2	3	74,83	Buena

4.5 Clasificación Geomecánica

4.5.1 RMR (Rock Mass Rating)

Se consideró el RQD previamente obtenido, separación entre las juntas, condiciones que presentan las discontinuidades y el flujo de agua, recibiendo una valoración detallada en la Tabla 3.7.

4.5.1.1 Zona 1:

En la

Tabla 4.13 se presentan los valores del RMR obtenidos para cada uno de los sectores que conforman la zona 1 del talud.

Tabla 4.13 RMR obtenido para los sectores 1, 2, 4, 5 y 6 de la zona 1.

Parámetros/ Valoraciones	Zona 1				
	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6
Resistencia a la compresión simple (MPa) / Valoración:	2	2	2	2	2
RQD (%) / Valoración:	13	13	13	13	13
Separación entre juntas (mm) / Valoración:	8	8	10	10	10
Longitud (m) / Valoración:	2	1	0	0	1
Rugosidad / Valoración:	3	5	6	6	5
Separación (mm) / Valoración:	1	0	0	5	5
Relleno (mm) / Valoración:	2	1	3	4	4
Meteorización / Valoración:	3	3	1	1	3
Valoración Total:	11	11	10	10	18
Flujo de agua en las juntas / Valoración:	4	7	10	7	10
RMR= \sum Valoraciones	38	41	45	42	63
Clasificación	Baja	Media	Media	Media	Buena

4.5.1.2 Zona 2:

A continuación, se presenta el valor del RMR obtenido para el sector que conforma la zona 2, el cual se detalla en la Tabla 4.14

Tabla 4.14 RMR obtenido para el sector 3 de la zona 2.

Parámetros / Valoración:	Zona 2
	Sector 3
Resistencia a la compresión simple (MPa) / Valoración:	2
RQD (%) / Valoración:	13
Separación entre juntas (mm) / Valoración:	10
Longitud (m) / Valoración:	1
Rugosidad / Valoración:	3
Separación (mm) / Valoración:	3
Relleno (mm) / Valoración:	2
Meteorización / Valoración:	2
Valoración total:	11
Flujo de agua en las juntas / Valoración:	7
RMR= \sum Valoraciones	43
Clasificación	Media

En la Tabla 4.15 se presenta un resumen de los valores del RMR obtenidos para cada zona del talud.

Tabla 4.15 Resumen de los valores del índice RMR obtenido para cada zona.

RMR						
Zonas	Zona 1					Zona 2
Sectores	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 3
RMR	38	41	45	42	62	43
Calidad	Baja	Media	Media	Media	Buena	Media

4.5.2 SMR (Slope Mass Rating)

Según la valoración detallada en la Tabla 3.8 se obtuvieron los siguientes valores para cada factor de ajuste de la clasificación SMR, (Tabla 4.16).

Tabla 4.16 Valores obtenidos para los factores de corrección de cada sector.

Zona	Familia de discontinuidad	Factor de ajuste			
		F1	F2	F3	F4
Zona 1	FAM. 1	0.15	1	-25	+15
	FAM. 2	0.15	1	-25	+15
	FAM. 3	0.15	1	-25	+15
Zona 2	FAM. 1	0.15	1	-25	+15
	FAM. 2	0.15	1	0	+15
	FAM. 3	0.15	1	-6	+15

Se obtuvo el SMR según la ecuación (3.2) dando como resultados los valores que se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Cálculo del SMR de las zonas del macizo rocoso.

SMR						
Zona	Sectores	Familia de discontinuidad			Promedio	Calidad
		FAM. 1	FAM. 2	FAM. 3		
Zona 1	Sector 1	49.25	52.1	49.25	50.2	Media
	Sector 2	52.25	55.1	52.25	53.2	Media
	Sector 4	56.25	59.1	56.25	57.2	Media
	Sector 5	53.25	56.1	53.25	54.2	Media
	Sector 6	73.25	76.1	73.25	74.2	Buena
Zona 2	Sector 3	54.25	58	57.1	56.45	Media

En la Tabla 4.18 se resumen los valores del SMR para las zonas del talud.

Tabla 4.18 Resumen de los valores del SMR obtenido para cada zona.

SMR						
Zonas	Zona 1					Zona 2
Sectores	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 3
SMR	50.2	53.2	57.2	54.2	74.2	56.45
Calidad	Baja	Media	Media	Media	Buena	Media

4.4.1.3 CSMR (Chinese Slope Mass Rating)

Para el CSMR se presentan los valores obtenidos en la Tabla 4.19 para la zona 1 y la Tabla 4.20 para la zona 2 respectivamente.

Tabla 4.19 CSMR calculado para los sectores que conforman la zona 1 del talud

CSMR							
Zona	Sectores	$\zeta = 0,57 + 0,43*(80+H)$	λ	CSMR Familia 1	CSMR Familia 2	CSMR Familia 3	Promedio
Zona 1	Sector 1	1.0	0.90	56.38	53.81	56.38	55.25
	Sector 2		0.90	52.63	55.19	55.19	54.34
	Sector 4		1.0	33.25	36.10	33.25	34.20
	Sector 5		1.0	30.25	33.10	30.25	31.20
	Sector 6		1.0	50.25	53.10	50.255	51.20

Tabla 4.20 CSMR calculado para los sectores que conforman la zona 2 del talud

CSMR							
Zona	Sectores	$\zeta = 0,57 + 0,43*(80+H)$	λ	CSMR Familia 1	CSMR Familia 2	CSMR Familia 3	Promedio
Zona 2	Sector 3	1.0	1.00	31.25	34.10	31.25	31.25

En la Tabla 4.21 se resume la calidad de CSMR obtenido para cada sector del macizo rocoso.

Tabla 4.21 Resumen de los valores del CSMR obtenido para cada zona

CSMR						
Zonas	Zona 1					Zona 2
Sectores	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 3
SMR	55.2	54.34	34.20	31.20	51.10	32.20
Calidad	Media	Media	Baja	Baja	Media	Baja

En la Tabla 4.22, se presenta los resultados obtenidos de la evaluación de estabilidad para las clasificaciones: RMR, SMR y CSMR.

Tabla 4.22 Resultados obtenidos de la evaluación de estabilidad.

Zona	Sector	RMR	SMR	CSMR	Calidad		
					RMR	SMR	CSMR
Zona 1	1	38	50.2	55.52	Baja	Baja	Media
	2	41	53.2	54.34	Media	Media	Media
	4	45	57.2	34.20	Media	Media	Baja
	5	42	54.2	31.20	Media	Media	Baja
	6	62	74.2	51.20	Buena	Buena	Media
Zona 2	3	43	56.45	32.20	Media	Media	Baja

4.6 Evaluación de susceptibilidad al desprendimiento:

4.6.1 Condiciones actuales

Para la evaluación de susceptibilidad al desprendimiento (SD), se consideró las condiciones actuales que presentan el escarpe, obteniendo una valoración presentada en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23 Susceptibilidad obtenida en condiciones actuales para cada sector del macizo rocoso.

Parámetro principal	Valoración máxima para el análisis de la Susceptibilidad al Desprendimiento (SD)					
	Zona 1					Zona 2
	Sec.1	Sec. 2	Sec. 4	Sec. 5	Sec. 6	Sec. 3
Estructura geológica	3	3	4	4	3	4
Presencia de vegetación	1	0	0	0	1	1
Litología	2	2	3	3	3	4
Actividad sísmica	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Estado de deterioro	2	2.5	2.5	2.5	2	3
Morfometría y altura	6	6	6	6	6	6
Grado de fracturación y bloques claves	4	3	5	6	3	4.5
Evidencia de agua	4.5	3	3	4	2	4
Total	26	23	27	29	23.5	30

Tabla 4.24 Resumen de susceptibilidad en condiciones actuales obtenida para cada zona del talud.

Susceptibilidad al desprendimiento de bloques						
Zonas	Zona 1					Zona 2
Sectores	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 3
Promedio	26	23	27	29	23.5	30
Grado de susceptibilidad	Alta	Alta	Alta	Muy alta	Alta	Muy alta

En la Figura 4.16 y Figura 4.17, se representan las zonas con alta (naranja) y muy alta (rojo) susceptibilidad al desprendimiento, tal como se detalla en la Tabla 4.24.

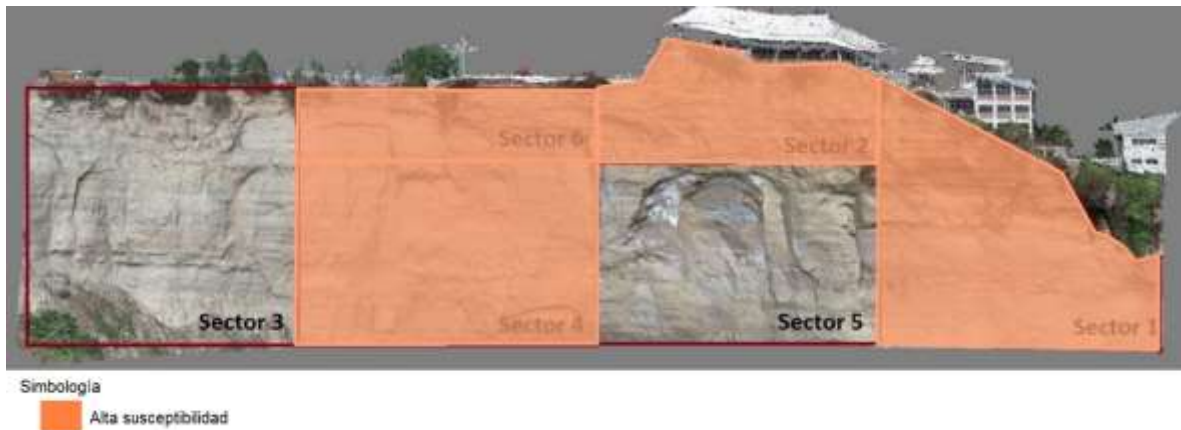


Figura 4.16 Sectores con alta susceptibilidad en condiciones actuales.

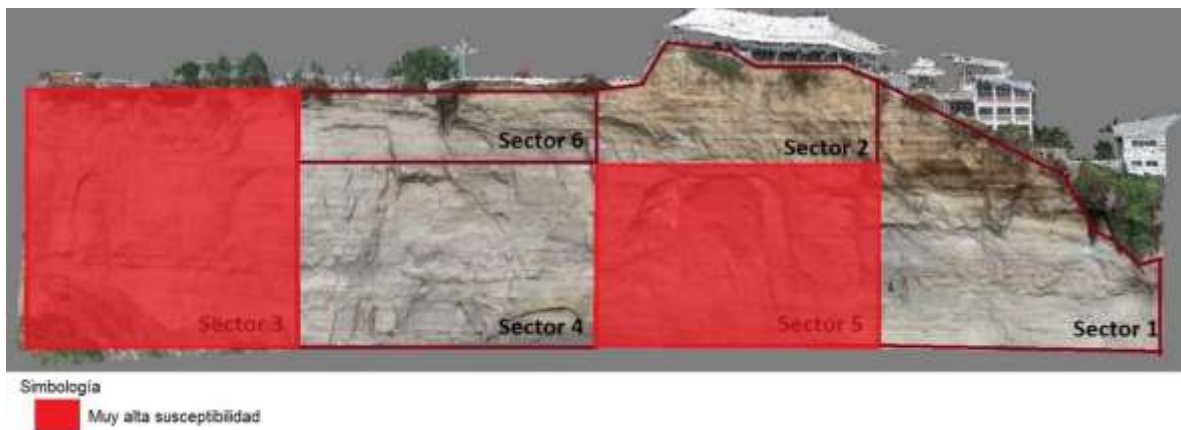


Figura 4.17 Sectores con muy alta susceptibilidad en condiciones actuales.

4.6.2 Condiciones extremas

Se realizó la evaluación de susceptibilidad al desprendimiento, considerando la actividad sísmica que se produce en la zona costera y la presencia de agua que pueden afectar a los bloques del macizo. Los resultados son representados en la Figura 4.18 con una alta susceptibilidad en el sector 2 y en la Figura 4.19 con muy alta susceptibilidad al desprendimiento de bloques en los sectores 1,3,4,5 y 6.

Tabla 4.25 Susceptibilidad obtenida en condiciones extremas para cada sector del macizo rocoso.

Parámetro principal	Valoración máxima para el análisis de la susceptibilidad al desprendimiento (SD)					
	Zona 1					Zona 2
	Sec.1	Sec. 2	Sec. 4	Sec. 5	Sec. 6	Sec. 3
Estructura geológica	3	3	4	4	3	4
Presencia de vegetación	1	0	0	0	1	1
Litología	2	2	3	3	3	4
Actividad sísmica	4	4	4	4	4	4
Estado de deterioro	2	2.5	2.5	2.5	2	3
Morfometría y altura	6	6	6	6	6	6
Grado de fracturación y bloques claves	4	3	5	6	3	4.5
Evidencia de agua	6	6	6	6	6	6
Total	28	26.5	30.5	31.5	28	32.5

Tabla 4.26 Resumen de susceptibilidad en condiciones extremas obtenida para cada sector del talud.

Susceptibilidad al desprendimiento de bloques						
Zonas	Zona 1					Zona 2
Sectores	Sector 1	Sector 2	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Sector 3
Promedio	28	26.5	30.5	31.5	28	32.5
Grado de susceptibilidad	Muy Alta	Alta	Muy Alta	Muy alta	Muy Alta	Muy alta

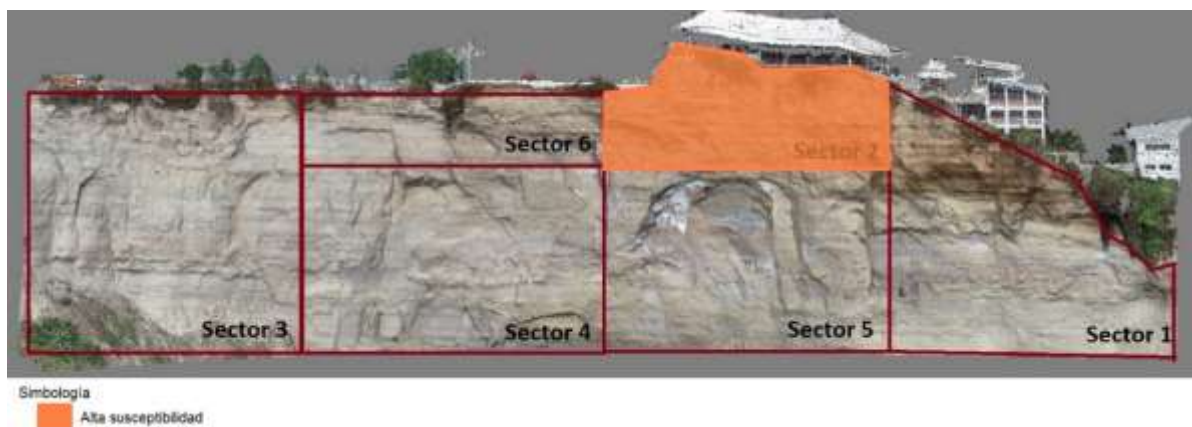


Figura 4.18 Sectores con alta susceptibilidad en condiciones extremas.

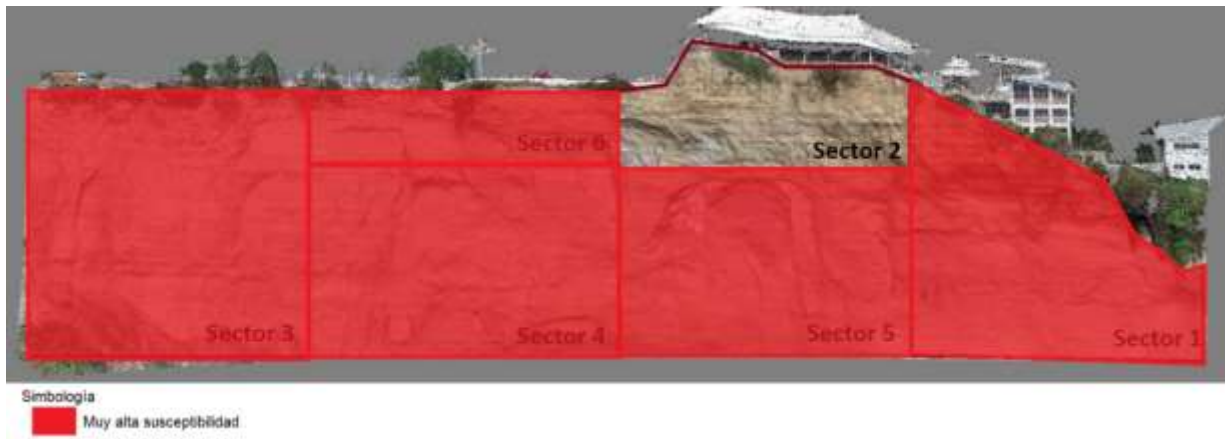


Figura 4.19 Sectores con muy alta susceptibilidad en condiciones extremas.

4.7 Factor de seguridad

Se calculó el factor de seguridad para los 5 perfiles topográficos generados con ayuda de las curvas de nivel, utilizando el método propuesto por Morgenstern & Price (1965), consiguiendo los siguientes resultados:

4.7.1 Perfil 1

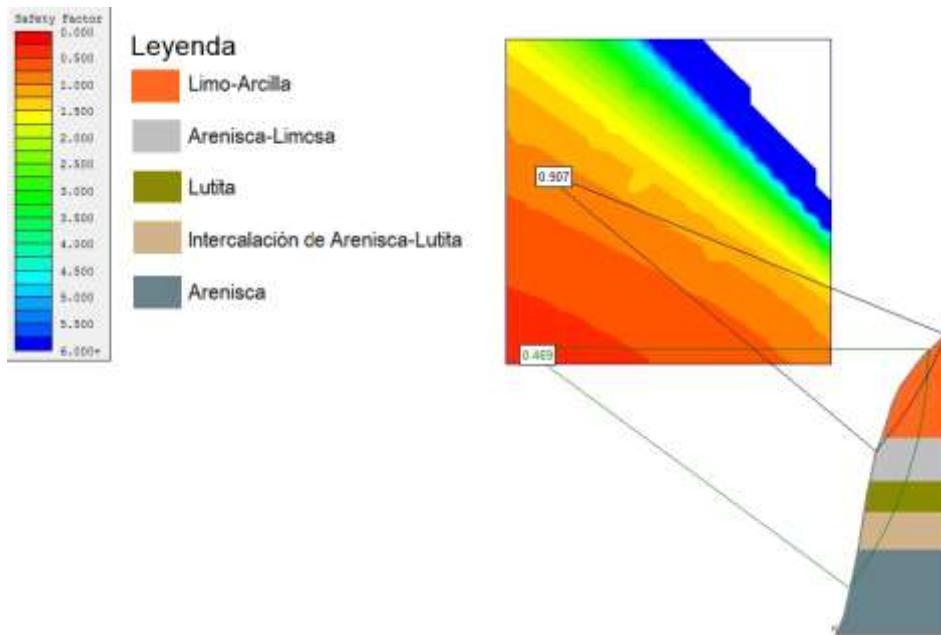


Figura 4.20 Factor de seguridad del perfil 1 en la zona 2.

4.7.2 Perfil 2

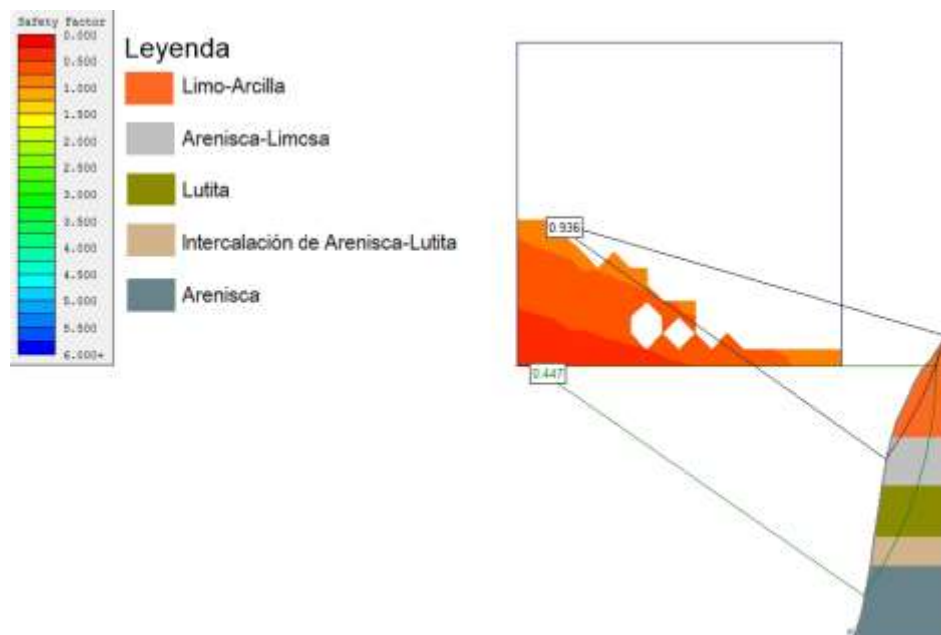


Figura 4.21 Factor de seguridad del perfil 2 en la zona 2.

4.7.3 Perfil 3

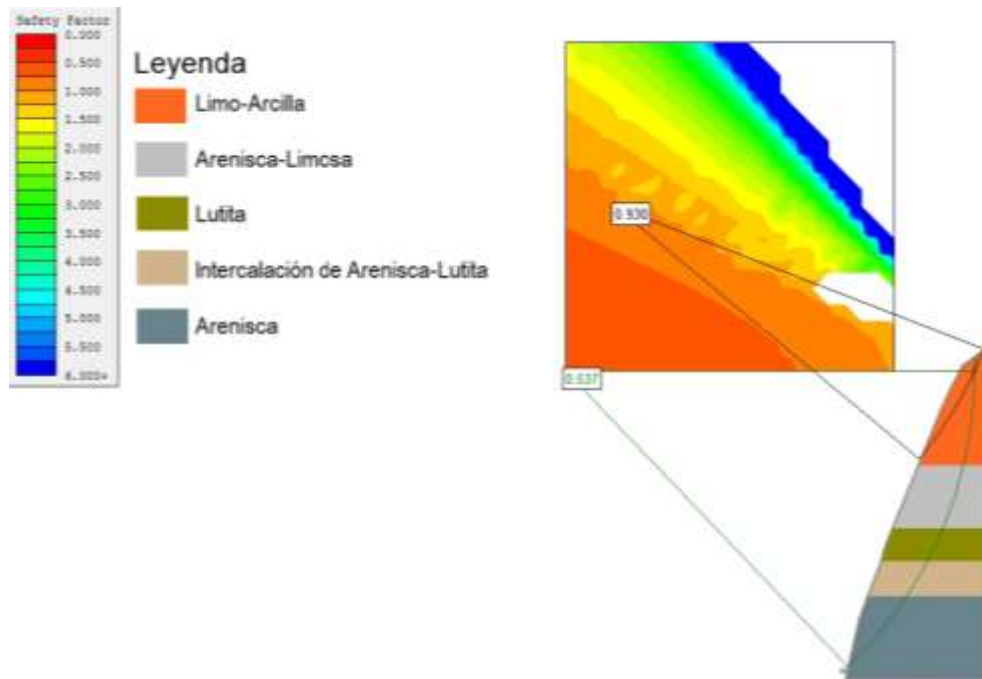


Figura 4.22 Factor de seguridad del perfil 3 en la zona 1.

4.7.4 Perfil 4

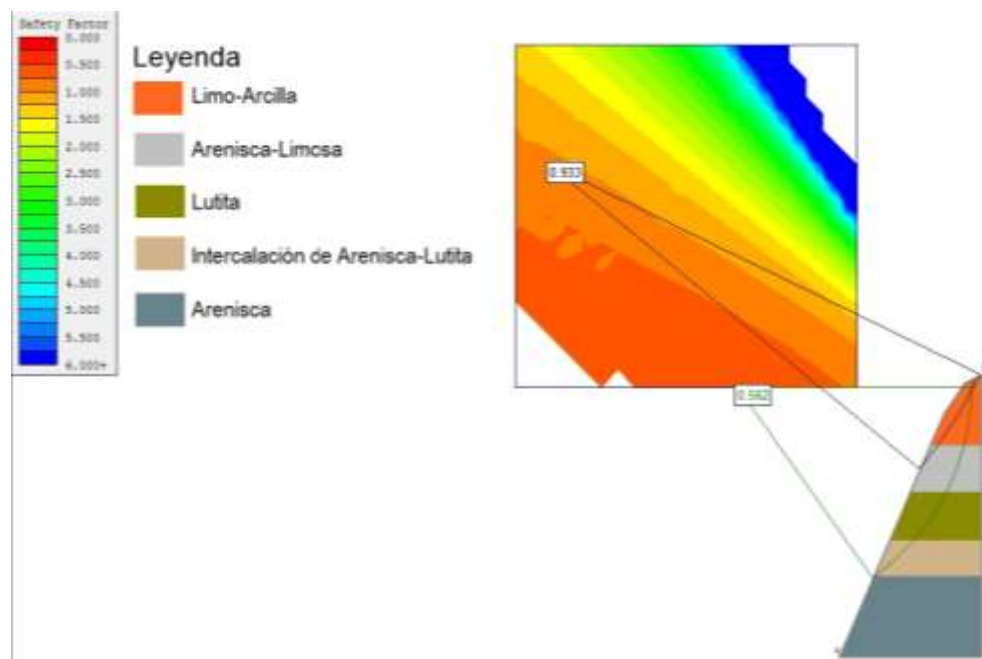


Figura 4.23 Factor de seguridad del perfil 4 en la zona 1.

4.7.5 Perfil 5

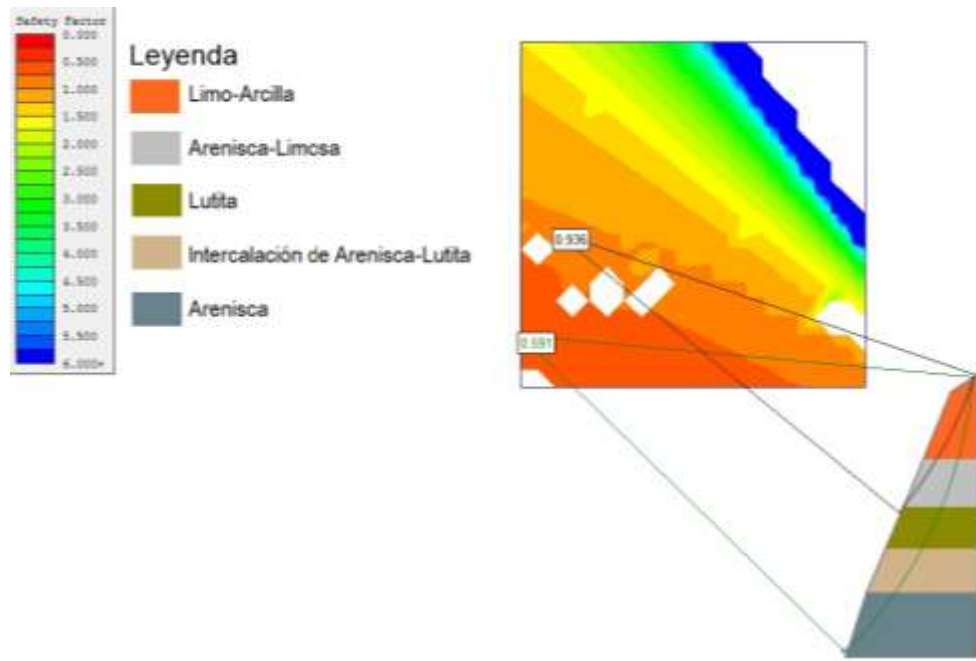


Figura 4.24 Factor de seguridad del perfil 6 en la zona 1.

Tabla 4.27 Resumen de factores de seguridad y susceptibilidad según la zona del talud.

Zona	Sector	Perfil	(F.S) Hipotético	(F.S) Real	Susceptibilidad: Condiciones actuales	Susceptibilidad: Condiciones extremas
Zona1	1	5	0.591	0.936	Alta	Muy alta
	2				Alta	Alta
	4				Alta	Muy alta
	5				Muy alta	Muy alta
	6				Alta	Muy alta
Zona 2	3	1	0.469	<u>0.907</u>	Muy alta	Muy alta
		2	0.447	0.936		

4.8 Análisis de resultados

- Los resultados obtenidos tanto de la caracterización geológica y de la geofísica empleada, nos permiten asociar los líticos al Grupo Ancón, constituido por areniscas, lutitas calcáreas, limos y arcillas, de acuerdo con, DINAGE (1974), Bristow & Hoffstetter (1977) y Núñez del Arco (2003).
- Los resultados obtenidos de la caracterización geomecánica RQD (%) y clasificación geomecánica RMR, SMR, guardan un grado de relación similar. Los sectores 2,4 y 5 presentan calidad media en relación con los sectores 1 y 3, los cuáles presentan una calidad baja, asociada a la presencia de agua debido al sistema de drenaje de aguas lluvias ubicado al costado derecho del Santuario, sumado a la baja resistencia que presentan los materiales que conforman el macizo, favoreciendo la inestabilidad del escarpe. Por otro lado, el CSMR nos indica que los sectores 3, 4 y 5 presentan una calidad baja, considerando la altura del escarpe y el estado de las discontinuidades.
- Los resultados obtenidos de la evaluación de la susceptibilidad al desprendimiento de bloques indican que los sectores 1,2,4 y 6 y una muy alta susceptibilidad para los sectores restantes, en condiciones actuales. Mientras que, para las condiciones extremas, solo el sector 2 presenta una alta susceptibilidad en contraste con los demás sectores que poseen un grado muy alto de susceptibilidad.
- Se calculó un Factor de Seguridad real e hipotético. El primero fue obtenido considerando las superficies que tienden a sufrir un desprendimiento de bloques y, el segundo no es aplicable en la práctica ya que el desprendimiento ocurrirá antes. Para el cálculo del Factor de Seguridad se debe considerar las propiedades geomecánicas de las rocas ya que una variación en sus valores cambiará la superficie a la cual el talud se vuelve inestable.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Mediante la evaluación geológica y geomecánica realizada al talud del Santuario Blanco Estrella del Mar, utilizando la clasificación propuesta por (Chen, 1995), el análisis de susceptibilidad al desprendimiento y el cálculo del factor de seguridad, obteniendo como resultados zonas potenciales con una alta susceptibilidad, en las que se necesita implementar medidas de estabilización urgente:

- La caracterización geológica realizada mediante la correlación de datos levantados en campo y los ensayos geofísicos indica presencia de materiales asociados a resistividades de líticos sedimentarios con granos finos a medios, posiblemente saturados y alto grado de meteorización y compactación. El talud está conformado por 5 unidades: en la base arenisca de grano medio con evidencia de erosión, seguido de una intercalación de arenisca calcárea y lutita con una granulometría fina a media, seguido de una unidad de lutita de grano medio muy fracturada con presencia de meteorización esferoidal. A continuación, un bloque de arenisca limosa de granulometría fina y finalmente la unidad de limo arcilla en el techo del escarpe.
- El índice RMR varía entre valores de 38 a 45 con una calidad que va desde baja a media, en donde el sector 1 presenta calidad baja y los sectores 2,3,4 y 5 calidad media. Estos valores son corroborados con los resultados del SMR, el cual posee un rango de 50.2 y 57.2 de categoría media, en donde el sector 1 posee una calidad baja y los sectores 2,3,4 y 5 calidad media. Para la clasificación CSMR se obtuvo valores entre 31.2 y 55.5 que representan condiciones bajas a medianas, los sectores 3, 4 y 5 presentan una calidad baja y los sectores restantes calidad media.
- Debido a la verticalidad del acantilado y a la disposición subhorizontal de los estratos, las condiciones actuales que presenta el escarpe se determinaron que

los sectores 1, 2, 4 y 6 tienen una alta susceptibilidad, mientras que los sectores 5 y 3 tienen un grado muy alto de susceptibilidad. Mientras que para las condiciones extremas se consideró la actividad sísmica que ocurre en la zona costera y las precipitaciones que actúan como facilitadores para el desgaste del macizo, alcanzando una alta susceptibilidad para el sector 2 y muy alta susceptibilidad para los sectores 1,3,4,5 y 6.

- De los factores de seguridad obtenidos para los 5 perfiles topográficos, se encontró que el valor más crítico fue de 0.907, estos valores guardan relación con el grado de susceptibilidad obtenido, corroborando la información previamente obtenida.
- Uno de los principales factores que desencadena el proceso de inestabilidad es la infiltración de agua activando el mecanismo de erosión y promoviendo el desgaste del macizo.
- Es importante indicar que el proceso de desestabilización no se inicia en la base del acantilado, por lo tanto, la estructura electrosoldada conformada por rocas e implementada en la base (Figura 6.4), no constituye una solución frente al problema de inestabilidad del talud.

5.2 Recomendaciones

- El talud debe ser estabilizado de tal manera de protegerlo del deterioro, asegurando al mismo tiempo mediante anclajes, los volúmenes de roca que se están desprendiendo. Estos anclajes deben tener una longitud de 3 m, ubicados a 30° respecto de la horizontal, colocados en filas para cubrir toda la extensión del talud. La operación debe realizarse con minuciosas normas de seguridad, por los peligros que existen debido a la verticalidad del talud en parte por la presencia de contrapendiente (Figura 5.1).

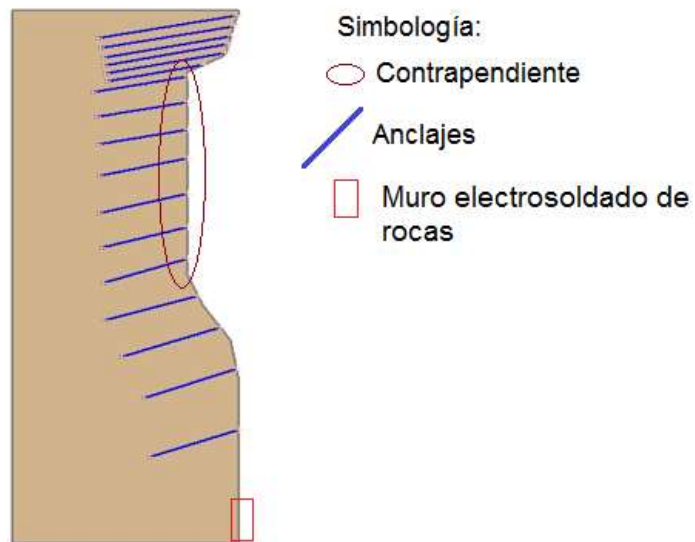


Figura 5.1 Implementación de anclajes en el escarpe.

- Debido a que se están generando problemas de erosión por el descontrol de aguas servidas y riego, se debe realizar un sistema de drenaje (Figura 5.2), que descargue los caudales al lado opuesto del acantilado.

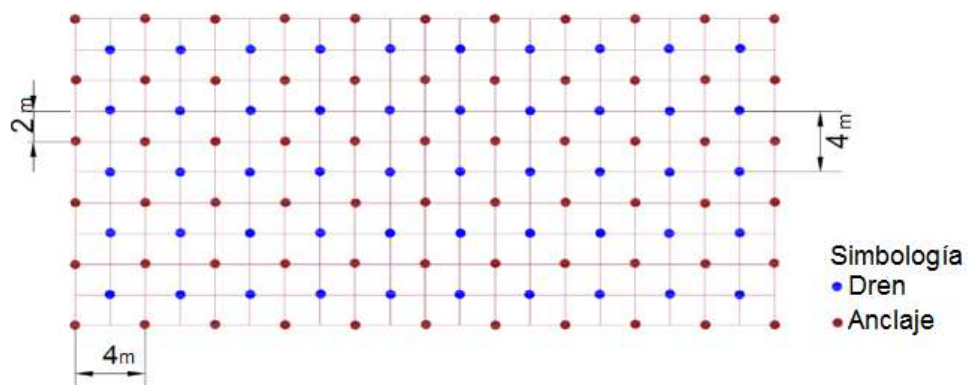


Figura 5.2 Sistema de distribución de anclajes y drenes.

- Es recomendable que, como protección final del talud, se lance una capa de hormigón proyectado que actúe como un acabado del frente estabilizado.
- Implementar un sistema de canalización y control de infiltraciones que evite que las precipitaciones se filtren desde la parte alta del talud perjudicando la estabilidad de este.

- Se recomienda implementar un plan de estabilización urgente ya que los resultados obtenidos en el presente estudio reflejan un peligro inminente tanto para el Santuario como para las edificaciones cercanas (Monasterio, Capillas, Vía).

BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- Adrián Riquelme, A. A. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *ELSEVIER*, 1-15. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019
- Aguilar, M., & Ramírez, G. (2018). *studio Geológico, geomecánico y su incidencia en la evaluación de la estabilidad del talud del Cementerio Patrimonial General (Puerta 1) Cerro del Carmen, Guayaquil*. Guayaquil: ESPOL-CIPAT. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019
- Amores, F. (09 de Diciembre de 2014). *Mediciones de resistividad y resistencia a tierra*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de https://www.monografias.com/usuario/perfiles/frank_amores_sa_nchez
- Anbalagan, R. (1992). Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Elsevier Science Publishers*, 269-277. Recuperado el 29 de 11 de Noviembre
- Arango, C. (2005). *Estudio magnetoteléurico de la zona de Lluçmajor (Mallorca): avances en el proceso de datos y modelo 3D*. Barcelona: Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona).
- Arquidiócesis de Guayaquil. (2017). El Santuario está en riesgo. Olón, Santa Elena, Ecuador. Recuperado el 29 de Noviembre de 2019, de <https://www.eluniverso.com/noticias/2017/12/26/nota/6540538/olon-piden-ayuda-santuario-emblema>
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 27 de Octubre de 2019
- Benítez, S. (1995). *Évolution géodynamique de la province côtière sud-équatorienne au Crétacésupérieur-tertiare*. Recuperado el 26 de Octubre de 2019

- Bieniawski, Z. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp. 97-106. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Bieniawski, Z. (1989). Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. *New York: John Wiley and Sons*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019
- Blanco, R. (2015). *Estudios y Propuestas de Estabilización del Cerro Las Cabras*. Guayaquil: CIPAT-ESPOL. Recuperado el 29 de Noviembre de 2019
- Bristow & Hoffstetter, C. R. (1977). *Lexique Stratigraphique International*. París: Centre National de la Recherche Scientifique. Recuperado el 10 de Noviembre de 2019
- Calderón, M. (2010). *Modelo Conceptual del Acuífero del Río de Olón*. Guayaquil: ESPOL. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019
- Chávez & García, Á. M. (2007). Propuestas de Soluciones Técnicas para la Estabilización de Taludes de Roca Blanda en la Vía Guayaquil-Progreso. *ESPOL Ciencia*, 4-7. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019
- Chen, Z. (1995). Recent Developments in Slope Stability Analysis. *Tokyo: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering ., 8th ISRM Congress*, 1041-1048. Recuperado el 15 de Noviembre de 2019
- Claudio Di Celma, G. C. (2010). Stratigraphic evolution from shoreface to shelf-indenting channel depositional systems during transgression: Insights from the lower Pliocene Súa Member of the basal Upper Onzole Formation, Borbón Basin, northwest Ecuador. *Elsevier: Sedimentary Geology*, 162-179. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019
- Córdova, J. (29 de Octubre de 2019). Estado actual del Santuario Blanca Estrella del Mar. (R. Pineda, Entrevistador)
- Deere, D. &. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice. *Classification Systems for Engineering Purposes, ASTM STP 984*, 91-101.
- DINAGE. (1974). *Carta Geológica "Manglaralto" Ministerio de Recursos y Energéticos*. Ecuador: Dirección General de Energía y Minas. Recuperado el 09 de Noviembre de 2019

- Dinngo, L. d. (24 de Mayo de 2018). *Design Thinking en Español*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2019, de ¿Cuáles son las tecnicas?: <http://www.designthinking.es/inicio/>
- DJI. (2016). *Phaton 4Pro*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019, de <https://www.dji.com/>
- Duque, X. (2015). *Revisión de las Estrategias de Promoción de los Atractivos y Servicios Turísticos de la Comuna Olón de la Provincia de Santa Elena con el Fin de preparar un Plan de Promoción Turística Local 2015*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Universidad de Guayaquil. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019
- EDP Proyectos, S. (2012). *Mediciones de resistividad en el terreno*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de <http://www.edpproyectos.com/mediciones-de-resistividad-del-terreno>
- El Universo. (31 de Agosto de 2017). El 9 de septiembre, en Olón, nueva procesión de antorchas. Guayaquil, Guayas, Ecuador. Recuperado el 14 de Noviembre de 2019, de <https://www.eluniverso.com/noticias/2017/08/31/nota/6356944/9-septiembre-olon-nueva-procesion-antorchas>
- F. Morante, M. A. (2018). Evaluation of Slope Stability Considering the Preservation of the General Patrimonial Cemetery of Guayaquil, Ecuador. *Geoscience*, 1-18. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019
- Geología Web. (19 de marzo de 2019). *Configuración de electrodos*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de <https://geologiaweb.com/geofisica/resistividad/configuracion-electrodos/>
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson. Recuperado el 8 de Noviembre de 2019
- Hack, H. (1998). Slope Stability Probability Classification. *ITC Delf Publication, Enschede*,, 273. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Haines, A. T. (1991). Preliminary estimation of rock slope stability using rock mass classification system. *7th Congress on Rock Mechanics, ISRM.*, (págs. 887-892). Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Hassan, B. &. (2017). Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 993-1009. Recuperado el 29 de Noviembre de 2019

- Hogar de la Madre. (15 de Diciembre de 2015). *Blanca Estrella del Mar*. Recuperado el 14 de Noviembre de 2019, de <https://www.hogardelamadre.org/es/noticias/2015/1157-noviembre/7055-la-blanca-estrella-del-mar>
- INAMHI. (2015). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. Quito. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/HIDROGEOLOGIA_2%20EDICION_2014.pdf
- Laubscher, D. (1990). A geomechanical classification system for the rating of rock mass in mine design. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*,, 257-273. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Lindsay, P. C. (2001). Slope stability probability classification. *International Journal of Coal Geology*, 127-145. Recuperado el 18 de Nvoeimbres de 2019
- MIDUVI. (1997). *Informe técnico de los Estudios de Propsección Geofísica, efectuado en el valle de Olón, perteneciente al cantón Santa Elena*. Santa Elena. Recuperado el 27 de Octubre de 2019
- Montalván, J. (2008). *Caracterización Geoeléctrica del Acuífero de la CUenca del Río Olón para Propuesta de Plan de Explotación*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado el 26 de Octubre de 2019
- Mora, R. (2004). Aplicación de la metodología MVM para determinar la susceptibilidad a deslizamientos. *Escuela Centroamericana de Geología*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019
- Morgenstern, N., & Price, V. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *The Institution of Civil Engineers*. London. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019
- N. Bartón, R. L. (1974). Engineering Clasification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Springer-Verlag, Rocks Mechanics*, 6, 186-236. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/226039636_Engineering_Classification_of_Rock_Masses_for_the_Design_of_Tunnel_Support
- NGI. (2015). *Using Q-System*. Oslo: Norway. Recuperado el 27 de Noviembre de 2019

- Nicholson, D. &. (1997). Assessing the potential for deterioration of engineered rock slopes. *Engineering Geology and the Environment*, Marinos, Koukis, Tsiambaos & Stournaras, 911-917. Recuperado el 29. de Noviembre de 2019
- Núñez del Arco, E. (2003). *Geología del Ecuador*. Guayaquil: profesor de la Facultad de Ingenierías en Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Ordoñez, M., Jiménez, N., & Suárez, J. (2006). *Micropaleontología Ecuatoriana. Datos Bioestratigráficos y Paleoecológicos de las Cuencas: Graben de Jambelí, Progreso, Manabí, Esmeraldas y Oriente; del Levantamiento de la Península de Santa Elena, y de las Cordilleras Chongón Colonche, Costera y Occide* (Vol. Cap 3 y 4). Guayaquil, Ecuador: Centro de Investigaciones Geológicas Guayaquil (CIGG). Petroproducción-Petroecuador. Recuperado el 08 de Noviembre de 2019
- Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Conínua*. (Paraninfo, Ed.) Recuperado el 27 de Octubre de 2019
- Palacky, G. J. (1988). Resistivity Characteristics of Geologic Targets. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists.*, 52-129.
- Paruelo, J. (08 de Septiembre de 2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas: Revista científica de ecología y medio ambiente*, 4-22. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019, de <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/83>
- Peralta, S., Freire, M., & Fortis., J. (2018). Estrategias de desarrollo sostenible, basadas en el ecoturismo; caso Comuna Olón, Cantón Santa Elena. En M. Días, C. Belezaca, A. Moreno, & M. Carranza, *DOSSIER ACADÉMICO: Bosques, Recursos Naturales y Turismo Sostenible* (pág. 167). Guayaquil, Guayas, Ecuador: CIDE.
- Priest, S. D. (1976). Discontinuity spacings in rock . *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 135-148.
- Quiñónez, X. (2019). *MODELO GEOMÉTRICO DEL ACUÍFERO COSTERO DE MANGLARALTO Y SU INCIDENCIA EN EL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL AGUA, SANTA ELENA-ECUADOR*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: ESPOL. Recuperado el 19 de Noviembre de 2019
- R. Tomas, J. D. (2009). *PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA APLICACIÓN DEL SLOPE MASS RATING SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. VII*

Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables (pág. 12). CIMNE, Barcelona, 2009: E.Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.). Recuperado el 18 de Noviembre de 2019, de https://www.academia.edu/20718761/PROPUESTA_METODOL%C3%93GICA_PARA_LA_APLICACI%C3%93N_DEL_SLOPE_MASS_RATING_CONTINUO_SMR-C_MEDIANTE_UN_SISTEMA_DE_INFORMACI%C3%93N_GEOGR%C3%81FICA?email_work_card=interaction_paper

- Robertson, A. (1988). Estimating rock weak strength. SME Annual meeting. *Society of Mining Engineers*, 1-5. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of BIENIAWSKI classification to slopes. *Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM.*, 49-53. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Romana, M. (1993). A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating: Principles, Practice and Projects. *Elsevier. Rock Testing and Site Characterization*, 575-600. Recuperado el 30 de Noviembre de 2019
- Romana, M., Serón, J., & Montalar, E. (2001). La clasificación geomecánica SMR: Aplicación, Experiencias y validación. *V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas*, (págs. 393-404). Madrid. Recuperado el 28 de Noviembre de 2019
- Roperch, P. M. (1987). *Rotated oceanic blocks in western Ecuador, Geophys. Res. Lett.*, (Vol. 14). Recuperado el 25 de Octubre de 2019
- Selby, M. (1980). A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with test from Antarctica and New Zealand. *Z. Geomorphologic N.F.*, 31-51. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Shuk, T. (1994). Key elements and applications of the natural slope methodology (NSM) with some emphasis on slope stability aspects. *4th South American Congress on Rock Mechanics, ISRM.*, (págs. 955-960). Santiago de Chile. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Suarez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. *Publicaciones UIS*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2019

- Ünal, E. (1996). Modified Rock Mass Classification: M-RMR system. En: Bieniawski, Z.T., editor. *Milestones in rock engineering, the Bieniawski jubilee collection*, 203-223. Recuperado el 18 de Noviembre de 2019
- Valencia, J. (2017). *“ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO MANGLARALTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUS SISTEMAS ACUÍFEROS*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Recuperado el 27 de Octubre de 2019
- Valetín, A. (2009). *Práctica de un Sondeo Eléctrico Vertical y su interpretación*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2019, de Monografías.com: <https://www.monografias.com/trabajos71/practica-sondeo-electrico-vertical/practica-sondeo-electrico-vertical2.shtml>

ANEXOS

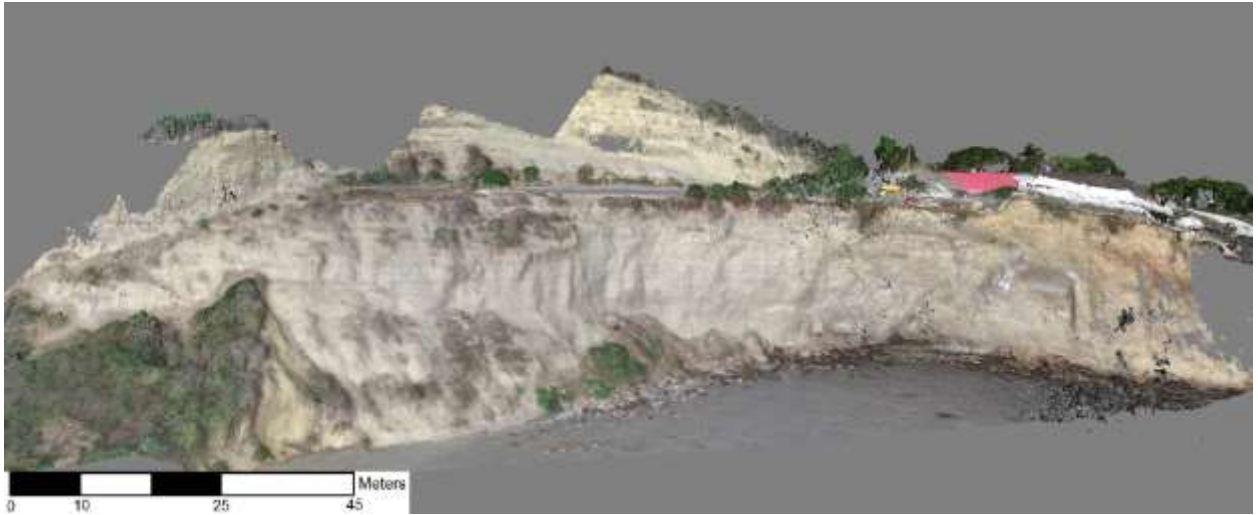


Figura 6.1 Modelo tridimensional del talud del cerro Olón.

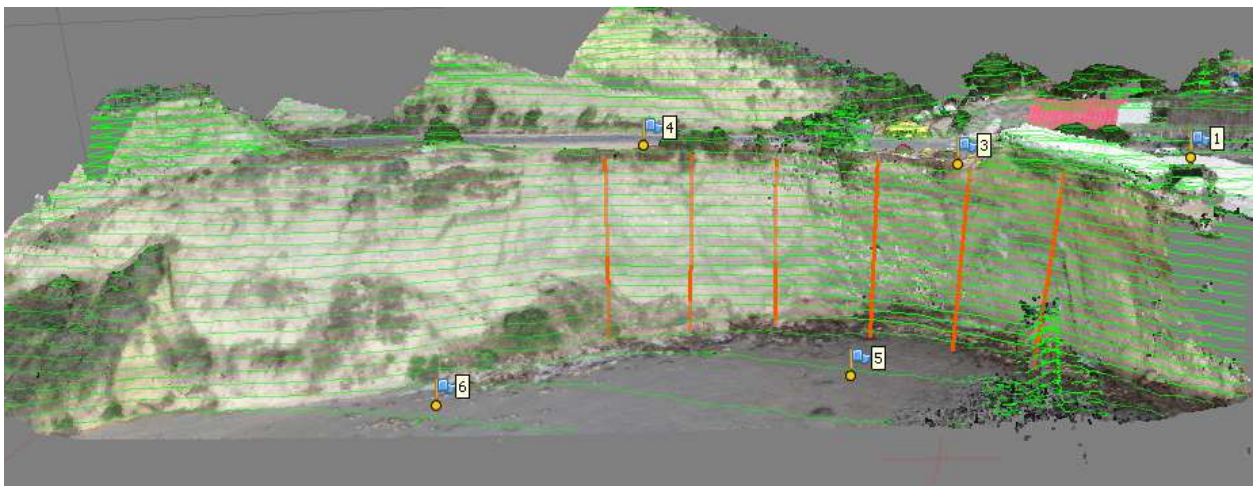


Figura 6.2 Curvas de nivel en el modelo tridimensional

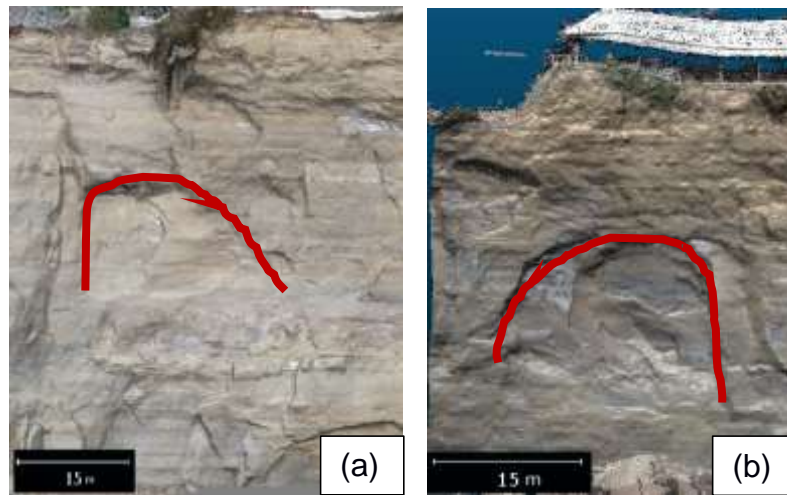


Figura 6.3 Fracturamiento en forma de cuña (a). Meteorización esférica en el sector5 (b).



Figura 6.4 Muro electrosoldado de rocas implementado para evitar el desgaste de la base del acantilado por acción del fuerte oleaje.

APÉNDICE A

6.1 Costos de ejecución del proyecto

El proyecto realizado es científico, sin embargo, ejecutar su aplicación implicaría el análisis de costos que van desde personal hasta costos de recursos.

6.2 Coste de personal

En esta sección se debe tomar en cuenta el costo por hora que ganaría el personal implicado en el desarrollo del proyecto, así como el tiempo invertido para obtener un costo total.

En la Tabla 6.1, se detalla el costo por hora que se requeriría para desarrollar el proyecto, de igual forma se indica el personal implicado en el marco de nuestro proyecto.

Tabla 6.1 Costos de personal.

Personal	Coste(\$/hora)	Tiempo(horas)	Coste total (\$)
Ingeniero/a superior sénior	70.00	100.00	7,000.00
Ingeniero/a superior junior	12.00	500.00	6000.00
Administrativo	8.00	5.00	40.00
		Subtotal	13,040.00

6.3 Coste de recursos materiales

En este apartado se analiza los equipos y materiales a usarse y para ello se explicará en la Tabla 6.2 los recursos utilizados. Este coste incluye una amortización, el cual va a depender de la vida útil del equipo.

Tabla 6.2 Costos recursos materiales.

	Precio (\$)	Amortización(\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
Ordenador	1.200,00	0,20	200,00	40,00
Dron	1.000,00	0,17	70,00	11,67
Portátil	1.500,00	0,25	700,00	175,00
			Subtotal	226,67

Además, se debe considerar los softwares utilizados, los cuales en su mayoría poseen licencias comerciales y de igual forma su vida útil.

- Agisoft
- Res2INV
- Microsoft Office 2010
- Slide V. 5.0

En la Tabla 6.3 se presenta los costos de las licencias de cada software utilizado.

Tabla 6.3 Costos de licencias.

Softwares	Precio (\$)	Amortización (\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
Microsoft office 2010	166.50	0.03	130.00	3.61
Agisoft "Estándar"	179.00	0.03	80.00	2.39
Slide 5.0	750.00	0.13	30.00	3.75
Res2Inv	5,000.00	0.83	30.00	25.00
			Subtotal	34.74

Resumiendo, los costos de equipos y licencias tenemos:

Tabla 6.4 Resumen de costos por equipos informáticos y licencia de software.

Parámetros	Coste (\$)
Equipos Informáticos	226,67
Licencias software	34,74
Subtotal	261,41

6.3.1 Materiales fungibles

Para el desarrollo de nuestro proyecto se utilizó material conocido como fungible, el cual está conformado por:

- Papelería
- Baterías de 12V

Tabla 6.5 Costos de material fungible.

Material fungible	Coste (\$)
Papelería	120
Baterías de 12V	6
Subtotal	126

6.3.2 Gastos varios

En gastos varios se incluyen el dinero usado para salidas de campo, provisiones para el campo, comida y gastos sin justificar.

Tabla 6.6 Costos de gastos varios.

Gastos	Coste (\$)
Viajes	300.00
Gastos sin justificar	70.00
Subtotal	370.00

En la Tabla 6.7 se presenta el subtotal de los costos de recursos de materiales

Tabla 6.7 Resumen de costo de materiales.

Materiales y gastos	Coste (\$)
Material informático	261
Material Fungible	126
Gastos varios	370
Subtotal	757

6.4 Costos parciales

En costos parciales se considera los valores obtenidos en los cálculos previos y así obtener un solo subtotal, tal como se muestra en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8 Costos parciales.

Costos parciales	Coste (\$)
Personal	21.440
Recursos materiales	757
Subtotal	22.197

6.5 Gastos generales y gastos totales

Los gastos por mantenimiento, reparaciones, suministros o gastos financieros son incluidos en esta sección. El proyecto usó una estimación del 25% de los costos evaluados.

Tabla 6.9 Gastos generales y gastos totales.

Gastos	Coste (\$)
Costes generales y gastos totales	5,549
Subtotal	5,549

6.6 Costos totales del proyecto

En la Tabla 6.10 se resumen el costo total del proyecto:

Tabla 6.10 Resumen de costos.

Gastos totales	Coste (\$)
Costos Parciales	22.197
Costes generales y gastos totales	5.549
Subtotal	27.747