

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Consideraciones para el pre-diseño de las condiciones geotécnicas de seguridad mediante la evaluación geomecánica y estabilidad de taludes en el sector del Hospital Humberto Molina, Zaruma-Ecuador.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería en Geología

Presentado por:

Joselyne Bárbara Solórzano Chauca

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a Dios por darme fortaleza todos los días para seguir adelante, a mis padres José Vicente y Flor María porque siempre me han apoyado sin importar nada a cambio, se han sacrificado por darnos a mis hermanos y a mí todo lo que hemos necesitado, nos han formado con buenos valores y principios para cumplir con nuestros propósitos en la vida.

A mis hermanos Lissette y Jean Piero por su apoyo constante y motivación. A mis amigos Dayanna, Emily e Israel por siempre darme el apoyo que necesito para seguir adelante y nunca dejarme sola. A mi familia, a mis compañeros de clase, profesores y a todo el personal de CIPAT por haberme enseñado tanto durante mi vida universitaria.

Joselyne Solórzano

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Carrión porque me ha enseñado que no solo es importante aprender en un salón de clase, sino que me ha dado la oportunidad de experimentar el trabajo en la vida real, porque siempre me ha apoyado y me ha motivado a superarme con su ejemplo y experiencia. Al Dr. Morante y al Dr. Montalván por sus consejos y motivación. A Gaby, Don Carlos, Lady, Roberth, Josué, Maribel, Boris y todos los que forman parte de la familia CIPAT, porque gracias a su apoyo en este camino he podido obtener los resultados esperados. A mis padres, hermanos y amigos por su apoyo incondicional. A mis profesores por su enseñanza y formación, a la empresa Bira S.A y el municipio de Zaruma por la disposición y ayuda durante todo el proceso.

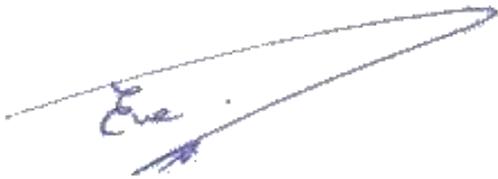
DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joselyne Bárbara Solórzano Chauca* y 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"

Joselyne Solórzano Ch.

Joselyne Bárbara
Solórzano Chauca

EVALUADORES

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

Ing. Eva Rivas, 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

Zaruma es una ciudad de tradición minera, ubicada a 1200 m.s.n.m., en condiciones naturales de elevadas pendientes. La existencia de galerías bajo el casco urbano, originadas por antiguas labores mineras y minería ilegal, ha generado subsidencias y hundimientos en las cimentaciones. Las áreas del Hospital Humberto Molina y su entorno, han sido afectadas por sismos, deslizamientos y asentamientos, dañando las infraestructuras de estas obras. El objetivo de este trabajo es evaluar geotécnicamente la zona de estudio, mediante el levantamiento y procesamiento de la información geotécnica, de laboratorio, y observación directa de campo, para el planteamiento de las propuestas de pre-diseño. La metodología empleada consistió en: i) Procesamiento de información y levantamiento de campo, ii) Trabajos de geofísica, perforación y calicatas, iii) Interpretación de los resultados, iv) Análisis de susceptibilidad al deslizamiento y, v) Propuesta de pre-diseño. El estudio verificó que no existen huecos cercanos a la superficie, que puedan afectar la estabilidad del Hospital. Sin embargo, estas fisuras que presenta el Hospital son producto de la mala calidad del relleno que deja sin soporte las baldosas. Los factores de seguridad indican que el terreno es estable, mientras que, el análisis de susceptibilidad comprueba mediante el levantamiento de campo, que el material es de buena calidad. Sin embargo, en condiciones extremas de saturación de agua, podrían generarse pequeños deslizamientos superficiales alejados del Hospital. Para prevenir esto, se sugiere realizar un control del drenaje de aguas lluvias y servidas, mantención de la vegetación y cambio del tipo de relleno actual.

Palabras Clave: estabilidad de taludes, Hospital de Zaruma, geofísica, susceptibilidad, pre-diseño.

ABSTRACT

Zaruma is a city of mining tradition, located at 1200 meters above sea level, with natural conditions of high slopes, which. The existence of galleries under the city center, originated by old and illegal mining works, has created subsidences and sinking in the cementations. The areas of the “Humberto Molina” Hospital and its surroundings have been affected by earthquakes, landslides and, settlements, which has brought damage to the infrastructure of these works. The aim of this research is to assess the study area, through geotechnical surveying and processing laboratory information, and direct field observation, for the approach of pre-design proposals. The methodology used consisted of: i) Information processing and field survey, ii) Geophysics, drilling and soil pits, iii) Interpretation of the results, iv) Analysis of slippage susceptibility and, v) Proposal of the pre-design. The study verified that there are no gaps near the surface, that can affect Hospital stability. However, these fissures presented by the Hospital are the product of the poor quality of the filling that leaves the tiles unsupported. Safety factors indicate that the terrain is stable, while, susceptibility analysis checks by field lifting that the material is of good quality. Nevertheless, in extreme water saturation conditions, small surface landslides could be generated away from the Hospital. To prevent this, it is suggested to make control of the drainage of rainwater and wastewater, appropriate use of vegetation and change of current fill type.

Keywords: slope stability, geophysics, susceptibility, “Humberto Molina” Hospital, pre-design.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Preámbulo.....	1
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema	3
1.4 Zona de estudio	4
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo General.....	5
1.5.2 Objetivos Específicos.....	5
1.6 Restricciones en el desarrollo del proyecto	6
1.7 Diseño metodológico.....	6
1.7.1 Recursos	6
1.7.2 Cronograma.....	6
1.7.3 Estudios previos en la zona de interés.....	6
CAPÍTULO 2.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Definiciones conceptuales.....	11
2.1.1 Talud	11

2.1.2	Estabilidad de talud	12
2.1.3	Inestabilidad	12
2.1.4	Factores que provocan inestabilidades	12
2.1.5	Propiedades geomecánicas de los materiales	13
2.1.6	Tipos de rotura.....	13
2.1.7	Factor de seguridad	14
2.1.8	Análisis de estabilidad	15
2.1.9	Susceptibilidad.....	15
2.1.10	Mapa de susceptibilidad a deslizamientos	15
2.1.11	Subsidencia	15
2.1.12	Prospección geofísica	16
2.1.13	Estudios geotécnicos	19
2.1.14	Material de la zona de estudio	20
2.2	Marco Geológico	23
2.2.1	Geología regional	23
2.2.2	Distrito Zaruma-Portovelo	24
2.2.3	Geología del distrito Zaruma-Portovelo.....	25
2.2.4	Estructuras del distrito Zaruma-Portovelo	26
2.2.5	Geología local.....	27
2.3	Estado del arte	28
2.3.1	Metodología de estabilidad de taludes	28
2.3.2	Alcance de las Tomografías eléctricas.....	29
2.3.3	Tomografías eléctricas aplicadas a deslizamientos	30
2.3.4	Inestabilidad de terreno en Zaruma	31
CAPÍTULO 3		34
3.	Metodología.....	34

3.1	Fase I: Búsqueda de información	35
3.2	Fase II: Trabajo de campo.....	36
3.2.1	Prospección geofísica	36
3.2.2	Estudios geotécnicos	42
3.3	Fase III: Cálculo de factor de seguridad	44
3.4	Fase IV: Susceptibilidad al deslizamiento.	45
CAPÍTULO 4		51
4	Resultados Y ANÁLISIS	51
4.1	Identificación de estructuras y levantamiento de túneles existentes	51
4.2	SEV's	52
4.2.1	SEV-01-ZC	52
4.2.2	SEV-02-ZC	52
4.2.3	SEV-03-ZC	53
4.2.4	SEV-04-ZC	54
4.2.5	SEV-05-ZC	54
4.3	TGE's.....	56
4.3.1	Tomografía Geoeléctrica 1.....	56
4.3.2	Tomografía Geoeléctrica 2.....	56
4.3.3	Tomografía Geoeléctrica 3.....	56
4.3.4	Tomografía Geoeléctrica 4.....	56
4.4	Resultado de las perforaciones	59
4.5	Correlación entre tomografías con perforaciones	61
4.6	Caracterización de calicatas.....	63
4.7	Estabilidad del talud	64
4.8	Susceptibilidad al deslizamiento.....	67
4.8.1	Estaciones geomecánicas	67

4.8.2	Resultado de la susceptibilidad al deslizamiento en el terreno.....	68
4.8.3	Análisis para el caso de que la saturación de agua sea máxima	69
CAPÍTULO 5.....		71
5	Conclusiones y recomendaciones	71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones.....	72
BIBLIOGRAFÍA		73
APÉNDICES		79

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SGR	Secretaría de Gestión de Riesgos
CIPAT	Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra
COE	Comité de Operaciones de Emergencia
HB	Hospital Básico
IESS	Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social
TGE's	Tomografías Geoeléctricas
SEV's	Sondeos Eléctricos Verticales
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
ARCOM	Agencia de Regulación y Control Minero
INIGEMM	Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico
DNIS	Dirección Nacional de Infraestructura Sanitaria
BIRA S.A.	Bienes raíces (sociedad anónima)
NEC	Normas ecuatorianas de la construcción

SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetros
Ω	Resistividad
σ	Conductividad eléctrica
ρ	Resistividad eléctrica
ONO	Oeste-Noroeste
ESE	Este-Sureste
N	Norte
S	Sur
SE	Sureste
SW	Suroeste
NEC	Norma ecuatoriana de la construcción
SD	Susceptibilidad al deslizamiento

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema de las problemáticas, consecuencias y resultados del proyecto. ...	4
Figura 1.2 Ubicación de la zona de estudio.	5
Figura 2.1 Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. Fuente: (Gonzalez DeVallejo et al., 2002)	11
Figura 2.2 Tipos de superficies de rotura en suelos.	14
Figura 2.3 Esquema de estabilidad de talud. Fuente: (Ricardo et al., 2015).....	14
Figura 2.4 Valores de resistividad y conductividad en diferentes tipos de rocas. Fuente: (Miensopust, 2010)	16
Figura 2.5 Esquema de equipo utilizado en la prospección geofísica (Serrano, 2003). ..	17
Figura 2.6 Configuración geométrica Schlumberger. Fuente: (Fernandez, 2017).....	18
Figura 2.7 Esquema del método de Wenner. Fuente (Villa & Furlan, 2011)	19
Figura 2.8 Esquema de perfil en materiales residuales. Fuente: (Suárez, 1998)	22
Figura 2.9 Falla en un perfil de granito meteorizado con pendiente alta.	22
Figura 2.10 Mapa de las subdivisiones metalotectónicas del Distrito Azuay, el subdistrito El Oro y el subdistrito Pucará-Alausí. Modificado de: (Prodeminca, 2000)	24
Figura 2.11 Mapa geológico del distrito minero Zaruma-Portovelo. Modificado de: (Berrezueta et al., 2016).....	26
Figura 2.12 Mapa Geológico del Área de Estudio, obtenido de la información de informes anteriores. Fuente: (CIPAT-ESPOL, 2019), Proyecto de consultoría, Zaruma, provincia de El Oro”.....	28
Figura 3.1 Flujograma de metodología aplicada al proyecto.....	35
Figura 3.2 Metodologías existentes para la determinación de la litología en la zona de estudio.	36
Figura 3.3 Equipo utilizado en la prospección geofísica.	37
Figura 3.4 Superficie a la misma cota para TGE's.....	37
Figura 3.5 Ubicación de los estudios realizado en los alrededores del Hospital Humberto Molina	38
Figura 3.6 Procedimiento en el software IPI2win.....	39
Figura 3.7 Curva obtenida en el software IPI2win correspondiente al SEV-01-ZC, con un error de 3.66%.	39
Figura 3.8 Arreglo del equipo ABEM para las TGE's.....	40

Figura 3.9 Descarga de datos de las TGE's en el software SAS4000/SAS1000 utilities.	40
Figura 3.10 Exterminio de datos erróneos o malo que aumentar el error en la data de las TGE's.	41
Figura 3.11 Flujograma del proceso realizado en el software RES2DINV.	41
Figura 3.12 Tabla de referencia entre resistividades y grado de meteorización del suelo en base a las perforaciones realizadas y estudios anteriores en el área de estudio.	42
Figura 3.13 Ubicación de las calicatas dentro del hospital.	43
Figura 3.14 Mapa conceptual de las metodologías existentes para la estabilidad de taludes. Modificado de (Suárez Díaz, 2009)	43
Figura 3.15 Proceso aplicado en el software Slide 5.0.	45
Figura 3.16 Procesamiento aplicado en la susceptibilidad a deslizamientos.	46
Figura 3.17 Ubicación de las estaciones geomecánicas en la zona de estudio.	47
Figura 4.1 Mapa de estructuras medidas en campo.	51
Figura 4.2 Columnas litológicas a partir de los resultados de SEV's.	55
Figura 4.3 Correlación de tomografía (TGE-01-ZC), sondeo (SEV-02-ZC) y perforación PZ7 de la zona de estudio.	57
Figura 4.4 Correlación de tomografía (TGE-02-ZC) y sondeo (SEV-05-ZC) de la zona de estudio.	57
Figura 4.5 Correlación de tomografía (TGE-03-ZC), sondeo (SEV-03-ZC), (SEV-04-ZC) y perforación PZ8 de la zona de estudio.	58
Figura 4.6 Correlación de tomografía (TGE-04-ZC) y sondeo (SEV-02-ZC) de la zona de estudio.	58
Figura 4.7 Correlación del perfil geológico con las perforaciones PZ7 y PZ8. Fuente: CIPAT-ESPOL	62
Figura 4.8 Muestra obtenida de la calicata # 1.	63
Figura 4.9 Muestra obtenida de la calicata # 2.	63
Figura 4.10 Muestra obtenida de la calicata # 3.	64
Figura 4.11 Correlación entre los perfiles de calicatas en zona de estudio.....	64
Figura 4.12 Mapa de ubicación de los perfiles seleccionados para el cálculo del factor de seguridad.	65

Figura 4.13 Factores de seguridad calculados en el software Slide, método de Spencer y aceleración sísmica.	66
Figura 4.14 Estación geomecánica #1, gran cobertura vegetal, suelo saprolito.	67
Figura 4.15 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento del Hospital Humberto Molina. .	69
Figura 4.16 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento del Hospital Humberto Molina tomando en cuenta el máximo valor de saturación de agua.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Equipo utilizados y su funcionalidad en el proyecto.	7
Tabla 1.2 Cronograma de actividades.	8
Tabla 1.3 Estudios anteriores realizados en la zona de estudio. Fuente: (Enriquez, 2018)	9
Tabla 2.1 Factores que provocan inestabilidad.	13
Tabla 2.2 Sistema de clasificación de suelos residuales. Fuente: (Wesley & Irfan, 1997), (Suárez, 1998)	21
Tabla 3.1 Herramientas de design thinking utilizadas en el proyecto.....	34
Tabla 3.2 Coordenadas de los SEV's.....	38
Tabla 3.3 Coordenadas de Tomografías Geoeléctricas de la primera fase.	40
Tabla 3.4 Comparación de metodologías usadas en la estabilidad de taludes. Fuente:	44
Tabla 3.5 Tabla de resumen de las metodologías generales usadas para la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento. Fuente: (Ramírez Navas, 2006)	45
Tabla 3.6 Puntuación asignada a cada parámetro del suelo.	47
Tabla 3.7 Puntuación asignada al parámetro estructura geológica.....	48
Tabla 3.8 Puntuación asignada al parámetro calidad de suelo.....	48
Tabla 3.9 Valor asignado al parámetro presencia del agua.....	48
Tabla 3.10 Valor asignado al parámetro grado de erosionabilidad (suelo).	49
Tabla 3.11 Valor asignado al parámetro morfometría.....	49
Tabla 3.12 Valor asignado al parámetro cobertura vegetal.	49
Tabla 3.13 Valor asignado al parámetro sismicidad.	50
Tabla 3.14 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento para suelos.	50
Tabla 4.1 Capas de resistividades SEV-01-ZC, obtenidas en el software IPI2win.....	52
Tabla 4.2 Capas de resistividades SEV-01-ZC, obtenidas en el software IPI2win.....	53
Tabla 4.3 Capas de resistividades SEV-03-ZC, obtenidas en el software IPI2win.....	53
Tabla 4.4 Capas de resistividades SEV-04-ZC, obtenidas en el software IPI2win.....	54
Tabla 4.5 Capas de resistividades SEV-05-ZC, obtenidas en el software IPI2win.....	54
Tabla 4.6 Registro geológico-geotécnico de la perforación PZ7.....	59
Tabla 4.7 Registro geológico-geotécnico de la perforación PZ8.....	60

Tabla 4.8 Interpretación de la litología en el subsuelo en base a los sondeos y tomografías.	62
Tabla 4.9 Caracterización Calicata #1.	63
Tabla 4.10. Caracterización Calicata #2.	63
Tabla 4.11. Caracterización Calicata #3.	64
Tabla 4.12 Parámetros principales y puntuación asignada en la Estación 1.	67
Tabla 4.13 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento de las estaciones para suelos.	68
Tabla 4.14 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento con un parámetro de saturación de agua al máximo.	69

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

Existen muchas ciudades que se han desarrollado en conjunto con la minería (Campoverde et al., 2019), desempeñando un papel importante en el crecimiento económico a nivel mundial (Zha & Xu, 2017), como en el caso del estado de Hidalgo en México, que cuenta con 500 años de experiencia y es una entidad minera muy importante en el país (SGM, 2014).

De la misma manera, existen casos en donde la minería ha generado problemas a nivel mundial. Cuando esta actividad se realiza de manera subterránea, genera huecos o vacíos que podrían provocar colapsos, estos casos ocurren en condiciones específicas y pueden ser de manera instantánea, mientras se extrae el material, o después de 100 o más años realizada la extracción (Illinois Department of natural resources, 2016). Las subsidencias mineras producto de las explotaciones, son una de las principales causas de las deformaciones inducidas en el terreno (Campoverde et al., 2019). Uno de los ejemplos más controversiales de subsidencia minera, es el ubicado en la ciudad de Kiruna, al norte de Suecia, construida por la empresa minera estatal LKAB, en donde se han registrado grietas y problemas de subsidencia por la extracción excesiva de hierro (Ayuso, 2016).

En el Ecuador, el caso de subsidencia lo registra la ciudad de Zaruma. Enmarcada dentro de la provincia de El Oro, la ciudad se encuentra ubicada al Suroeste del Ecuador, a una altitud de 1200 metros sobre el nivel del mar. Debido a su historia minera, fue declarada patrimonio cultural del Estado Ecuatoriano en el año 1990, ya que conforma el distrito minero (Zaruma-Portovelo) más importante en el país (Novoa, 2017). Zaruma se encuentra localizada sobre un gran depósito epitermal, con estructuras preferentemente Norte-Sur rellenas por fluidos hidrotermales, formando importantes vetas de cuarzo con ocurrencias principales de oro, plata y cobre. Estas vetas recorren largas distancias (extendiéndose por 12 km desde Minas-Nuevas en el norte, a El Tablón en el sur), enmarcadas entre dos fallas regionales ubicadas al Norte (Falla Busa-Palestina) y al Sur

(Falla Piñas-Portovelo) con dirección ONO – ESE. Así también, las vetas se emplazan a varios cientos de metros de profundidad y muchas de ellas afloran en la superficie, de tal manera que, la explotación realizada por mineros informales en busca del preciado metal ha provocado que sus labores se encuentren cerca de la superficie, generando zonas propensas a subsidencia en varios lugares de la ciudad. Se han descubierto cerca de 60 kilómetros de galerías mineras que han depredado las entrañas de la ciudad a causa de la extracción mineral informal. Todo esto ha provocado que las edificaciones pierdan estabilidad en sus cimentaciones, como el caso del socavón producido en la Escuela “La inmaculada”, el cual hasta el momento ha sido la consecuencia más grave y epicentro del decreto 158, que declaró el estado de excepción para combatir la minería ilegal (Paucar, 2017).

Al Suroeste de Zaruma se encuentra ubicado el hospital “Humberto Molina”, el cual fue evacuado por una declaratoria de emergencia que el COE (Comité de operaciones de emergencia) provincial emitió el 18 de octubre del 2017, tras comprobar que las dimensiones de las grietas registradas en la infraestructura años anteriores, habían incrementado su tamaño después de ocurrido un sismo el 17 de octubre del 2017, con epicentro en la población Balao a 137 km al Noroeste De Zaruma. En este lugar se desarrolla el presente estudio, con la finalidad de evaluar las características geomecánicas del material encontrado en el subsuelo del Hospital, determinando los factores antrópicos o naturales que perjudican la estabilidad del talud sobre la que se encuentra asentada esta institución hospitalaria, ya que más de 45000 personas están siendo afectadas por la falta de atención médica en la ciudad.

1.2 Descripción del problema

A continuación, se presentan las problemáticas existentes en el área de estudio:

- La minería ilegal, la presencia de agua, tipo de suelo o roca, y la erosión, son factores que han provocado un cambio sustancial en las propiedades geomecánicas del macizo rocoso en el cantón Zaruma, perteneciente a la provincia de El Oro (Hermenejildo, 2017).
- La Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR) ha realizado tomografías geoeléctricas (TGE's) y perforaciones por varias decenas de metros en la ciudad, determinando la

presencia de al menos 13 galerías debajo de la Escuela, el estadio y calles principales (Paucar, 2017). Estas galerías llegan verticalmente muy cerca de la superficie (entre 3 a 7m) y se encuentran emplazadas en roca meteorizada o inestable, lo que ha generado un alto riesgo a la subsidencia.

- La Escuela San Juan Bosco está colindando con el Hospital, el cual también presenta fisuras de origen desconocido en las paredes y pisos, estas se aperturaron aún más tras el sismo de 5. 8º registrado el 17 de noviembre del 2017.
- El 18 de noviembre del 2017, el COE de la provincia de El Oro ordenó la evacuación inmediata del hospital, sin una inspección técnica previa, afectando a más de 45000 habitantes de los cantones Zaruma, Portovelo y Atahualpa.

¿Inciden la evaluación geomecánica y la estabilidad de taludes en las condiciones de seguridad en el terreno donde se asienta el Hospital Humberto Molina?

1.3 Justificación del problema

Zaruma es una ciudad patrimonial que debe ser conservada, pero actualmente presenta muchos problemas geotécnicos que generan un gran impacto social, cultural y económico en la vida de sus ciudadanos. En la ciudad se han registrado deslizamientos y hundimientos de terreno, producidos por la inestabilidad que genera la actividad minera ilegal realizada en la zona.

La ciudad de Zaruma cuenta con dos instalaciones hospitalarias, el hospital del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) y el hospital "Humberto Molina". Éste último fue la segunda institución hospitalaria creada en la provincia de El Oro y ha atendido a más de 45000 ciudadanos por más de 70 años. El centro médico presenta fisuras de origen desconocido en su infraestructura, y sólo mantiene abierta el área de rayos X, bodega, cocina y farmacias, el resto de las áreas se encuentran cerradas, provocando molestias que afectan a los ciudadanos que han tenido que trasladarse a otros cantones para recibir atención médica.

Identificar la causa natural o antrópica que origina estas afectaciones en el hospital, permitirá realizar una propuesta de prediseño para estabilizar el talud sobre el que se encuentra construido esta entidad pública, y al conocer la susceptibilidad del terreno, determinar zonas estables e inestables con la finalidad de precautelar la seguridad y

salud de los habitantes. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ilustran los problemas, las consecuencias y los resultados obtenidos en el proyecto.

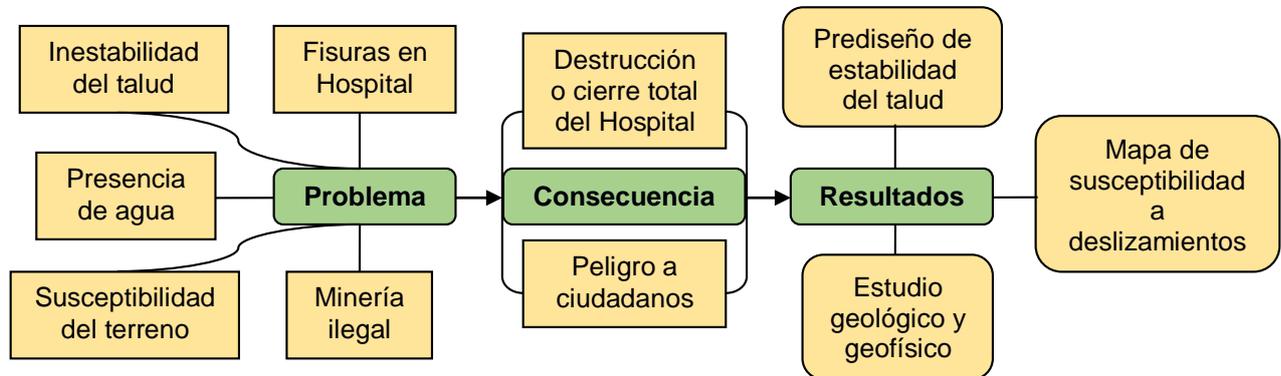


Figura 1.1 Esquema de las problemáticas, consecuencias y resultados del proyecto.

1.4 Zona de estudio

El Hospital Humberto Molina Astudillo, se encuentra ubicado al Sur del cantón Zaruma, provincia de El Oro, en la latitud 3°41'30" S y longitud 79°36'36" O, en el barrio Don Bosco de dominio estatal (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Era un centro de referencia para los cantones Zaruma, Portovelo y Atahualpa, las cuales registran cerca de 45000 habitantes. La población estimada del cantón Zaruma, según el Censo de la Población y Vivienda 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), era de 24.100 habitantes. La población estimada al año 2020, es de 25.654 habitantes, según las proyecciones del INEC (Montalvan, 2019).



Figura 1.2 Ubicación de la zona de estudio.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar geotécnicamente la zona de estudio, mediante el levantamiento y procesamiento de la información geotécnica, de laboratorio, y observación directa de campo, para el planteamiento de las propuestas de pre-diseño que contengan las soluciones técnicas que garanticen la seguridad de las edificaciones.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Realizar campañas geoelectricas mediante sondeos eléctricos verticales y tomografías geoelectricas, para la determinación de las diferentes características litológicas de la zona de estudio.
2. Calcular los factores de seguridad mediante el software Slide aplicando el método de Spencer, para el planteamiento de las condiciones de prediseño en la estabilidad de taludes.

3. Determinar la susceptibilidad al deslizamiento, mediante la valorización de campo para la zonificación del sector.

1.6 Restricciones en el desarrollo del proyecto

Se realizó una serie de preguntas a los ingenieros que forman parte del equipo de trabajo de la consultoría, estableciendo lo siguiente:

- Área de estudio solo abarca el Hospital “Humberto Molina” y sus alrededores.
- Realización de estudios que se ajusten al presupuesto.
- Tiempo de vida del proyecto aproximadamente 3 meses y medio.
- Realización de TGE’s y sondeos eléctricos verticales (SEV’s) con el equipo facilitado por Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT).
- Entre las soluciones planteadas no debe constar derrumbar el Hospital.

1.7 Diseño metodológico

1.7.1 Recursos

Para la realización del presente proyecto, se utilizarán los siguientes equipos y softwares) facilitados por CIPAT-ESPOL (véase Tabla 1.1).

1.7.2 Cronograma

En Tabla 1.2 se establecen las fechas en las que se llevó a cabo cada una de las fases que tuvo este proyecto y su digitalización.

1.7.3 Estudios previos en la zona de interés

En la Tabla 1.3 se encuentran detallados los aspectos más importantes de los trabajos y estudios anteriores realizados en el área de estudio, por diferentes entidades públicas.

Tabla 1.1 Equipo utilizados y su funcionalidad en el proyecto.

Equipos y su funcionalidad			
#	Equipo	Ilustración	Funcionalidad
1	Terrameter SAS 1000		<ul style="list-style-type: none"> • Tomografías geoeléctricas • Sondeos eléctricos verticales
2	Equipamiento de campo		<ul style="list-style-type: none"> • Protección del geólogo • Resguardar el equipo de campo
3	<ul style="list-style-type: none"> • Brújula Brunton • Lupa • Martillo geológico 		Toma de datos y coordenadas en campo
4	Software SAS 1000/4000 (Licencia CIPAT-ESPOL)		Descargar los datos del equipo a la computadora
	Slide 5.0 (CIPAT-ESPOL)		Determinar factor de seguridad para la estabilidad del talud
	Software RES2DINV (licencia CIPAT-ESPOL)		Interpretar los datos de las tomografías
	Strater (licencia: ST-017777-1649)		Realizar las columnas estratigráficas y la correlación
	Software ArcGIS (ESPOL)		Realizar el mapa de susceptibilidad y de ubicación
	Autocad (licencia: 900-96435996)		Realizar plano de pre-diseño
5	Computadora de escritorio, Windows 7 ultimate, memoria RAM 4GB, sistema operativo 64 bits		Procesamiento de datos, realización del documento final.

Tabla 1.3 Estudios anteriores realizados en la zona de estudio. Fuente: (Enriquez, 2018)

Estudios anteriores					
#	No.	Tipo de documento	Empresa	Fecha	Conclusiones/Recomendaciones
1	SGR-029-2015	Resolución	SGR	2015.03.30	Declara zona de riesgo el área urbana de la cabecera cantonal de Zaruma.
2	INIGEMM- INIGEMM-2017- 0130-OF	Informe	INIGEMM	2017.03.11	<ul style="list-style-type: none"> - En la infraestructura del Hospital se presentan entre 25 a 30 fisuras con direcciones preferenciales N-S y aberturas entre 1 a 5 mm. - Se identificaron fisuras tanto en paredes, piso y cimentaciones que se distribuyen en todas las áreas internas del Hospital. - El personal que labora en el Hospital ratifica que la formación de fisuras y fracturas se han incrementado a partir del 2015.
3		Informe de inspección	INIGEMM	2017.03.21	Es importante realizar la actualización del catastro minero por parte de ARCOM, para identificar posibles labores mineras cercanas al Hospital.
4	158	Decreto ejecutivo	Gobierno del Ecuador	2017.09.15	El presidente del Ecuador declara estado de excepción en el área minera de Portovelo-Zaruma, provincia de El Oro.
5	SGR-IASR-07- 0713-004	Informe	SGR	2017.09.29	<ul style="list-style-type: none"> - En diferentes áreas del Hospital Básico Dr. Humberto Molina, se presentan fisuras y grietas que oscilan entre 1 a 10 cm de espesor, evidenciando problemas de cimentación, asentamientos y subsidencia del suelo, mismos que podrían originar inestabilidad de los suelos característicos de la zona o la existencia de posibles galerías en el subsuelo. - Los pilares del cerramiento ubicados al interior del Hospital y en la vía de ingreso al mismo, presentan una ligera inclinación. - Considerando la topografía del lugar, el sitio de estudio se encuentra asentado en zonas susceptibles ante movimientos en masa con un nivel de bajo a medio e inundaciones con un nivel bajo.
6	SGR-I-ASR-08- 0155	Informe	SGR	2017.11.15	<ul style="list-style-type: none"> - No se han observado fisuras en columnas y vigas principales. - La evidencia de grietas superiores a 10 mm en mamposterías y losas de contra piso y 10 cm en muros, indican que podrían estar afectados por esfuerzos externos actuantes en la cimentación. - De manera preventiva, se sugiere realizar la evacuación del Hospital Dr. Humberto Molina hacia un sitio seguro, hasta que se realicen estudios estructurales a la infraestructura.

A continuación de la tabla de estudios anteriores realizados en la zona de estudio. Fuente: (Enriquez, 2018)

7	SGR-IASR-08-0166	Informe	SGR	2017.11.27	<ul style="list-style-type: none"> - Los elementos estructurales (columnas y vigas) del área administrativa no cumplen con los parámetros básicos de construcción de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) para este tipo de edificación. - En el área médica del Hospital se pudo evidenciar que existe un asentamiento, lo cual provocó que los elementos estructurales no trabajen al 100% de su capacidad estructural provocando fisuras en paredes y pisos. - En el área del hospital se pudo evidenciar la existencia de nuevas construcciones, las cuales no constaban en el diseño original.
8	DNIS-20170-797	Informe técnico	DNIS	2017.12.04	La estructura se asentó producto de la licuefacción de los sub-estratos bajo la cimentación y contrapiso por la filtración de agua lluvia, produciéndose la ondulación, hundimientos y levantamientos del contrapiso (desplazamiento vertical) de la edificación, causados por la inestabilidad de los suelos característicos de la zona.
9	ARCOM-P-OT-2017-1047-ME	Memorando	ARCOM	2018.11.29	El colegio San Juan Bosco y el Hospital, presentan fisuras y fracturas de 2 a 7 mm de separación. El origen del incremento de las fisuras y agrietamientos se deben a los últimos sismos registrados en el Ecuador, afectando directamente a las infraestructuras.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones conceptuales

En la ingeniería geológica uno de los temas más importantes es el diseño de taludes, porque está inmerso en casi todas las construcciones como: carreteras, canales, o túneles en el caso extracciones mineras (Gonzalez DeVallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002). A continuación, se describen algunas definiciones que ayudaran a entender de mejor manera el desarrollo del proyecto.

2.1.1 Talud

Se denomina talud a una superficie inclinada con respecto a la horizontal (véase Figura 2.1), que se produce de manera permanente o temporal en la cubierta terrestre, construido con la pendiente más elevada y conservando las condiciones de estabilidad (Ricardo, Sanz, Martí, & Orrego, 2015). Un talud puede ser de origen artificial, es decir construido en obras civiles por la mano del hombre, o de origen natural como producto de la erosión y depositación del material (Ricardo et al., 2015).

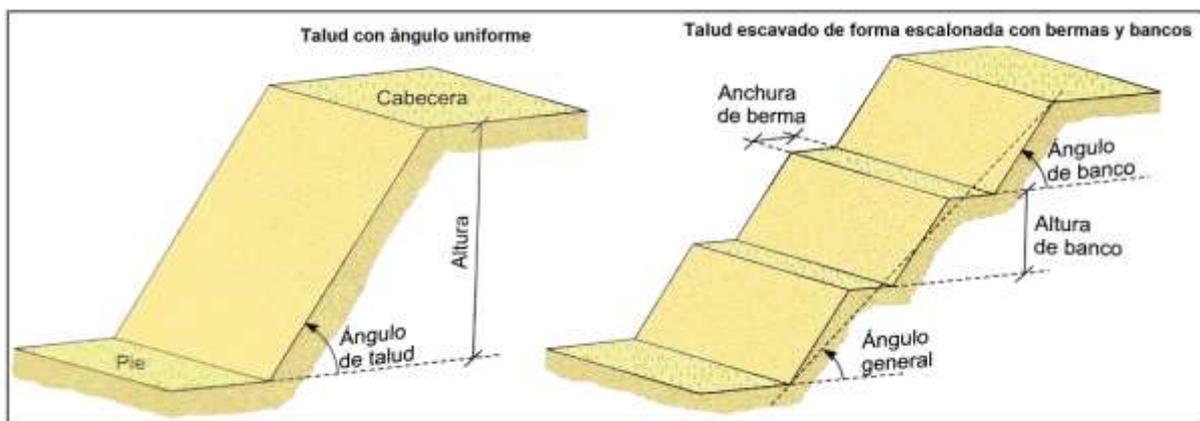


Figura 2.1 Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. Fuente: (Gonzalez DeVallejo et al., 2002)

2.1.2 Estabilidad de talud

El análisis de estabilidad permite realizar el diseño de taludes, mediante el cálculo del factor de seguridad, definiendo las medidas estabilizadoras que se deben implementar en el caso de roturas (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

Según (Gonzalez DeVallejo et al., 2002) la selección del método para el análisis de estabilidad de taludes dependerá de factores como:

- Características geológicas y geomecánicas de los suelos o macizos rocosos.
- Disponibilidad de datos del talud y su entorno como: geometría, geología, características geomecánicas, hidrogeología, etc.
- Objetivos, alcance, detalles y resultados esperados del estudio o proyecto

2.1.3 Inestabilidad

La inestabilidad de un talud se produce a partir del movimiento del suelo o macizo rocoso, con respecto a otro que permanece estable (Melentijevic, 2005). Los principales signos de que se está produciendo inestabilidad, es la aparición de fracturas y hundimientos en la superficie o en la parte lateral del talud, viéndose reflejado en las edificaciones presentes en la zona.

2.1.4 Factores que provocan inestabilidades

Los suelos, la litología, estratigrafía y condiciones hidrogeológicas son las que determinan las propiedades y el comportamiento del talud (Gonzalez DeVallejo et al., 2002). Los factores que provocan inestabilidades son capaces de cambiar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (Gómez, 2013), éstos son considerados condicionantes cuando dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que cuando dependen de los factores externos se consideran desencadenantes. Entre los factores que provocan y desencadenan a que se produzca inestabilidad de taludes (véase Tabla 2.1), suelen estar las excavaciones, la saturación del suelo por vertido de agua y las sobrecargas (Jesús Gallardo Amaya et al., 2013). Una de las actividades antrópicas que forma parte de estos factores y que está en auge es la actividad minera.

Tabla 2.1 Factores que provocan inestabilidad.

Fuente: (Gonzalez DeVallejo et al., 2002)

Factores que influyen en la inestabilidad de taludes	
Factores condicionantes	Factores desencadenantes.
<ul style="list-style-type: none">• Estratigrafía y litología.• Estructura geológica.• Condiciones y comportamiento hidrogeológicos de los materiales.• Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.• Tensiones naturales y estado tenso-deformacional.	<ul style="list-style-type: none">• Sobrecargas estáticas.• Cargas dinámicas.• Cambios en las condiciones hidrogeológicas.• Factores climáticos• Variaciones en la geometría• Reducción de parámetros resistentes.

2.1.5 Propiedades geomecánicas de los materiales

La posible rotura de un talud depende de la resistencia al corte de una determinada superficie. A su vez, ésta valor depende de parámetros resistentes del material como cohesión y rozamiento interno (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

- **Cohesión.** - medida de adherencia entre las partículas del suelo, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua (Delgado, 2018).
- **Ángulo de fricción interna.** - representa el coeficiente de rozamiento interno de un material, depende de factores como: tamaño de grano, forma de los granos, distribución de los granos y densidad (Delgado, 2018).
- **Peso específico.** - es la relación que existe entre la masa de un material (sólida y líquida) con respecto al volumen total (Delgado, 2018).

2.1.6 Tipos de rotura

Los taludes en suelo generalmente se rompen en diversas formas de superficies circulares (véase Figura 2.2), afectada por la morfología y la estratigrafía del talud:

- La rotura puede ser aproximadamente circular con su extremo inferior al pie del talud, cuando éste está formado por terreno homogéneo o por varios estratos que presentan propiedades geomecánicas homogéneas.
- La rotura puede ser casi circular pasando por debajo del pie del talud.

Si se tienen condiciones como la existencia de estratos o capas de diferente competencia, se puede generar una rotura en dirección de una superficie plana o una superficie poligonal. Las roturas a favor de un único plano paralelo al talud, son casi inexistentes, aunque válido en el caso de laderas naturales con recubrimientos de suelos sobre rocas (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

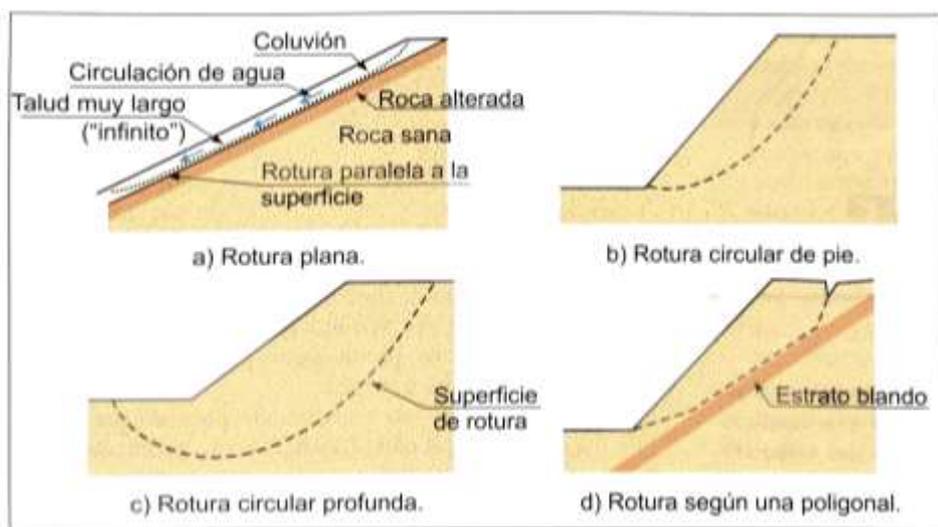


Figura 2.2 Tipos de superficies de rotura en suelos.

2.1.7 Factor de seguridad

Representa un número que cuantifica la relación existente entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerzas que provocan la rotura del talud (véase Figura 2.3). Un talud se considera inestable con un valor menor a 1.0, lo que significa un posible deslizamiento, mientras que un valor entre 1.1 a 1.5 garantiza la estabilidad a deslizamientos (Melentijevic, 2005).



Figura 2.3 Esquema de estabilidad de talud. Fuente: (Ricardo et al., 2015)

2.1.8 Análisis de estabilidad

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño del talud o cuando se presentan problemas de inestabilidad. El coeficiente de seguridad se elige dependiendo de la finalidad de la excavación del talud, el tiempo de duración, aspectos relacionados a la seguridad, costes, consecuencias o riesgos que se podrían generar la rotura del talud. Para el caso de taludes permanentes, el factor de seguridad deber ser igual o superior a 1.5 e incluso 2.0, esto dependerá de la confianza de los datos geotécnicos para el cálculo y de la seguridad exigida. Mientras, para el caso de taludes temporales, el factor de seguridad debe ser aproximadamente 1.3, aunque puede ser inferior (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

2.1.9 Susceptibilidad

Se define como la posibilidad que una zona resulte afectada por algún proceso o factor que puede ser intrínseco o externo al material. Esta se puede expresar en diferentes grados cualitativos y relativos (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

2.1.10 Mapa de susceptibilidad a deslizamientos

Mapa que zonifica el terreno evaluado, mostrando la actividad de deslizamientos o potencial de inestabilidad, obtenido mediante un análisis entre los factores que pueden producir deslizamientos y el mapa de inventario de deslizamientos. No está establecido un procedimiento para realizar mapas de susceptibilidad a los deslizamientos (Suárez, 1998).

2.1.11 Subsistencia

Hundimiento o asentamiento de la superficie terrestre por movimientos verticales descendentes. No se consideran subsidencias a los desprendimientos de tierra y los asentamientos de material de relleno que impliquen desplazamientos horizontales (Poland, Lofgren, Riley, & Mckelvey, 1972). Las subsidencias afectan a todo tipo del terreno, generalmente suelos, debido a esfuerzos inducidos en el terreno, por causas como: descenso del nivel freático, minería subterránea, explotación excesiva de acuíferos y demás.

2.1.12 Prospección geofísica

Existen diferentes métodos de prospección geofísica (magnética, eléctrica, sísmica, entre otros) que permiten obtener información detallada de las condiciones y composición del subsuelo. La aplicación de estos métodos de prospección se basan en el conocimiento de las propiedades presentes en las rocas y minerales, como la conductividad eléctrica (σ) o su inverso, la resistividad eléctrica (ρ), permitiendo identificar las estructuras presentes en el subsuelo (Geoseismic, 2017) (véase Figura 2.4). La configuración geométrica del equipo para la adquisición de los datos, el número y separación de los electrodos, son factores que influyen directamente en la profundidad alcanzada por el método geofísico (Geoseismic, 2017).

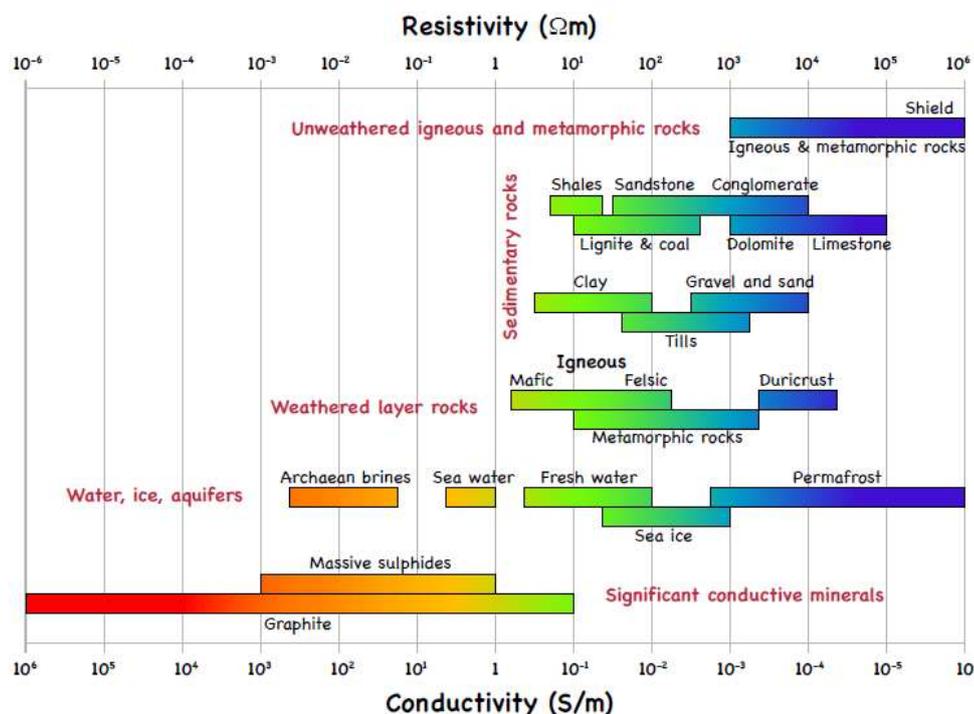


Figura 2.4 Valores de resistividad y conductividad en diferentes tipos de rocas. Fuente: (Miensopust, 2010)

2.1.12.1 Equipo de prospección geofísica

El equipo que se emplea para la prospección (véase Figura 2.5) está formado por:

- **Electrodos:** barras metálicas, cuyo número varía dependiendo de la profundidad requerida en el estudio.
- **Cable:** gran longitud, con conexiones cada cierto intervalo a fin de poder conectar los electrodos.
- **Conectores:** cables cortos de cobre con pinzas en los extremos, usados para conectar los electrodos.
- **Unidad central (resistivímetro):** ejecuta de manera automática la medición, verifica el estado de las conexiones y almacena todos los resultados tomados en campo.
- **Batería:** fuente de alimentación del equipo (Serrano, 2003).

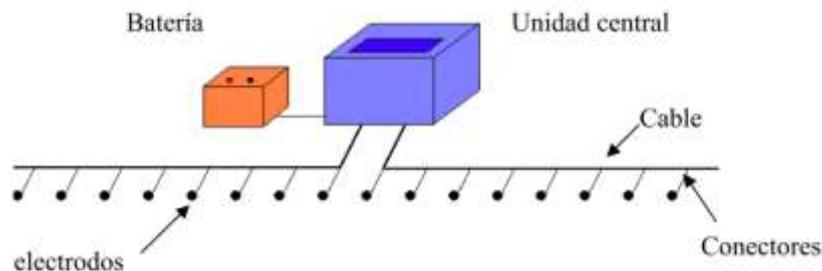


Figura 2.5 Esquema de equipo utilizado en la prospección geofísica (Serrano, 2003).

2.1.12.2 Tomografías geoeléctricas (TGE's)

Método de resistividad multielectrónico con el que se obtienen modelos 2D y 3D sobre la resistividad del terreno. Este método es muy usado en geología, geotecnia, hidrogeología y medio ambiente. Consiste en inyectar corriente en el subsuelo y medir la diferencia de potencial entre dos puntos. Para obtener el modelo real del subsuelo (material heterogéneo), se deben realizar iteraciones del proceso de medición (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

2.1.12.3 TGE's: Método de Schlumberger

En este tipo de configuración geométrica, la distancia de los electrodos de medida MN es pequeña en relación con AB y, se sitúan simétricamente desde el punto central (véase Figura 2.6), quedando alineados los cuatro electrodos sobre el terreno (Teixidó & Quintana, 2013).

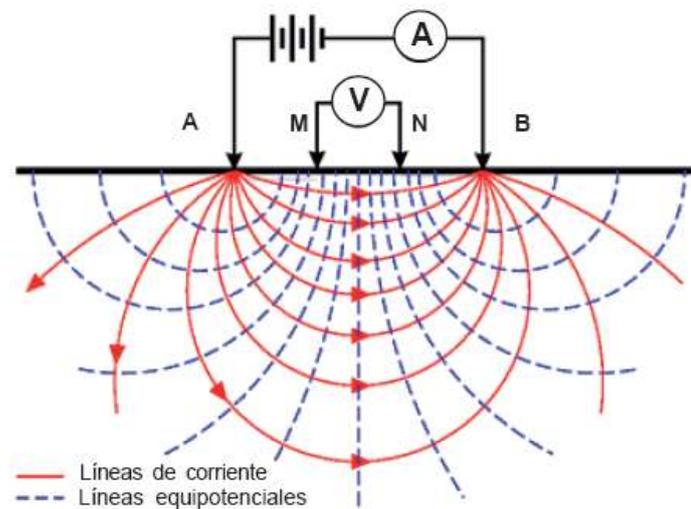


Figura 2.6 Configuración geométrica Schlumberger. Fuente: (Fernandez, 2017).

2.1.12.4 Sondeos eléctricos verticales (SEV's)

Técnica que consiste en separar sucesivamente los electrodos de corriente A y B del punto central (véase Figura 2.7), siguiendo una línea recta para la medición de la resistividad en cada posición. Se emplea generalmente la configuración Schlumberger, teniendo como resultado la variación de la resistividad con la profundidad (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

2.1.12.5 SEV's: Método de Wenner

El método más preciso y utilizado es el de cuatro electrodos tipo Wenner, el cual consiste en medir la resistividad del suelo alcanzando grandes profundidades. La presencia de huecos creados para enterrar los electrodos y la resistencia de los electrodos auxiliares no afectan los resultados obtenidos (Geoseismic, 2017). La configuración de los electrodos es simétrica: $AM=MN=NB$.

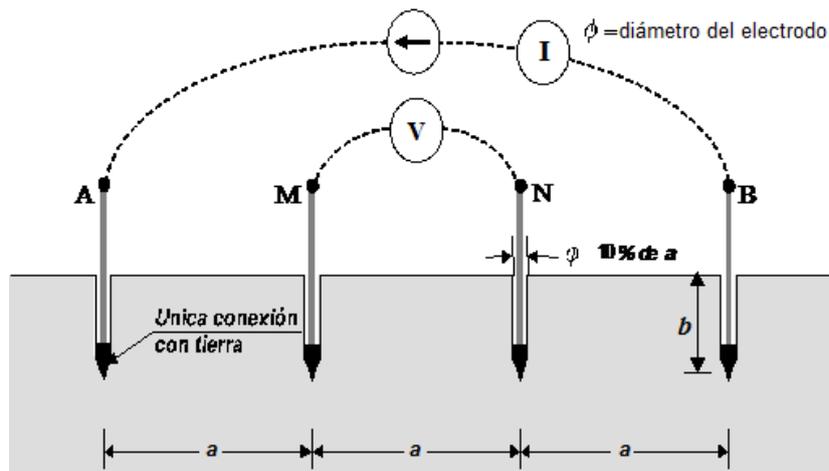


Figura 2.7 Esquema del método de Wenner. Fuente (Villa & Furlan, 2011)

2.1.12.6 Factores que varían la resistividad.

El parámetro de la resistividad eléctrica varía por las características que presenta el terreno, entre las que se encuentran: el grado de saturación del terreno, temperatura, porosidad y la forma de los poros, salinidad del fluido, tipo de roca y procesos geológicos. La relación existente entre la resistividad y la saturación del terreno permite utilizar este método para determinar puntos de filtración de agua en el subsuelo, provocando la disminución en la resistividad medida (Serrano, 2003) .

2.1.13 Estudios geotécnicos

2.1.13.1 Calicatas

Las calicatas, zanjas o pozos son excavaciones realizadas usando medios mecánicos convencionales, observando directamente el terreno a cierta profundidad, con la toma de muestras y ensayos in situ. Las calicatas son uno de los métodos más empleados en el reconocimiento superficial del terreno, dado su bajo coste y rapidez de realización, constituyen un elemento habitual en cualquier tipo de investigación in situ. Sin embargo, cuentan con limitaciones como:

- La profundidad no suele exceder de 4 m.
- La presencia de agua limita su utilidad.
- El terreno debe poderse excavar con medios mecánicos.

2.1.13.2 *Sondeos geotécnicos*

Se caracterizan por su pequeño diámetro, ligereza, versatilidad y fácil desplazamiento de las máquinas, alcanzando una profundidad de 150 metros, a partir de la cual los equipos son más pesados. Este método puede atravesar cualquier tipo de material, extraer testigos y efectuar ensayos en su interior (Gonzalez DeVallejo et al., 2002).

2.1.14 Material de la zona de estudio

2.1.14.1 *Saprolito*

Los saprolitos son generalmente, no saturados, muy débilmente cementados y muy heterogéneos, con varios sistemas de juntas heredadas (Suárez, 1998). Material limo arcilloso, compacto, plástico, de distintas tonalidades que varían de: café, café rojizo a naranja.

2.1.14.2 *Sistema de clasificación de suelos residuales de Wesley*

Los suelos residuales poseen características específicas, Wesley (1988) propuso un sistema de clasificación de suelos residuales (véase Tabla 2.2) el cual está basado en tres factores básicos:

- **Composición.** - material de que está constituido el suelo, incluye tamaño, forma y especialmente la composición mineralógica.
- **Macroestructura.** - datos que se pueden observar visualmente, como: discontinuidades, capas, fisuras, poros, presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y estructuras heredadas.
- **Microestructura.** - Fábrica, cementación entre partículas, forma y tamaño de los poros, etc.

Además, en el sistema de clasificación de Wesley deben considerarse factores como: estado o nivel de meteorización, propiedades mecánicas, cambios al profundizarse en el perfil, etc. (Suárez, 1998)

Tabla 2.2 Sistema de clasificación de suelos residuales. Fuente: (Wesley & Irfan, 1997), (Suárez, 1998)

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Observaciones
Suelos sin fuerte influencia mineralógica	Influencia fuerte de macroestructura	Suelos de rocas ígneas ácidas o intermedias y rocas sedimentarias muy meteorizadas.	Inspección visual	Grupo muy grande de suelos, incluyendo saprolitos. Comportamiento en las laderas denominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	Influencia fuerte de la microestructura	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias completamente meteorizadas.	Inspección visual y evaluación e índice de liquidez.	Suelos homogéneos
	Poca influencia de la estructura	Suelos derivados de rocas muy homogéneas.	Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme.	Comportamiento similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.
Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes	Grupo de la smectita y montmorillonita.	Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas.	Colores gris a negro y alta plasticidad.	Suelos encontrados en zonas planas, baja resistencia y alta compresibilidad.
	Otros minerales comunes			Subgrupo relativamente pequeño.
suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos	Grupo de los alófonos	Suelos derivados de ceniza volcánica.	Alto contenido de agua y cambios irreversibles al secarse.	Altos límites líquidos y plásticos.
	Grupo de la Aloysita	Suelos derivados de rocas antiguas.	Color rojo, topografía bien drenada.	Suelos finos de baja a media plasticidad.
	Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular.	Grupo amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas.

2.1.14.3 Caracterización del perfil de suelos residuales

En la estabilidad de taludes de suelos residuales, es importante conocer el perfil de meteorización, ya que generalmente controla la superficie de falla potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión

de poros. El perfil del suelo residual se compone de diferentes zonas de meteorización que van desde el suelo hasta roca sana (véase Figura 2.8) (Suárez, 1998).

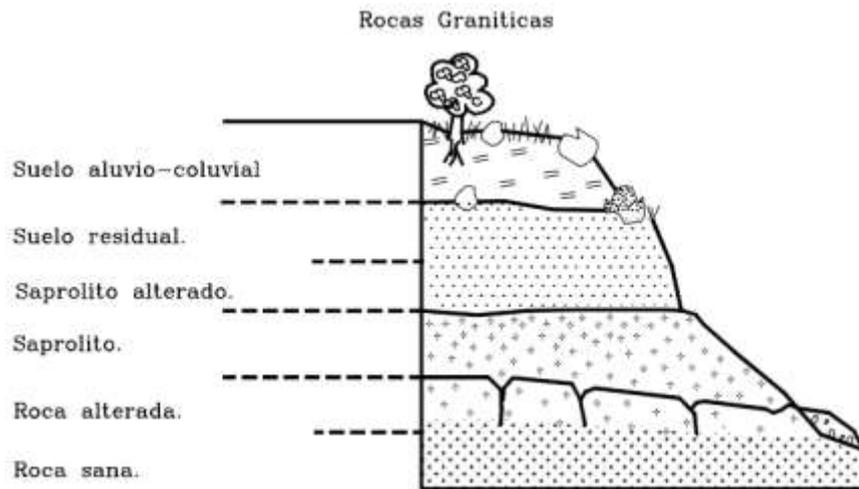


Figura 2.8 Esquema de perfil en materiales residuales. Fuente: (Suárez, 1998)

La profundidad del perfil de meteorización no solo depende de las características de la roca y del medio ambiente sino también de la pendiente del terreno. En zonas de alta pendiente, los perfiles son poco profundos y los materiales tienden a ser granulares, lo cual puede controlar el tipo de deslizamiento superficial que se genera (véase Figura 2.9).

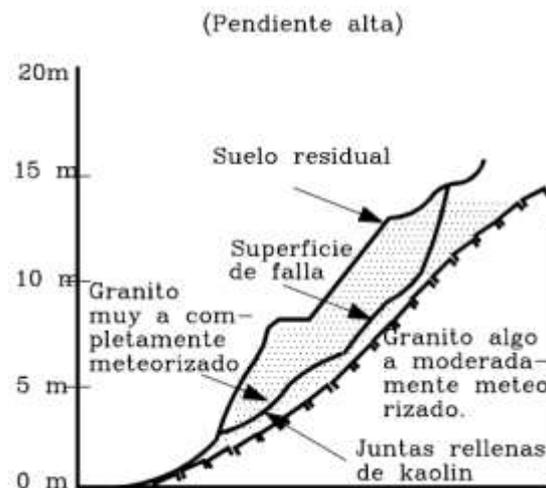


Figura 2.9 Falla en un perfil de granito meteorizado con pendiente alta. Fuente: (Suárez, 1998)

2.2 Marco Geológico

2.2.1 Geología regional

La faja de mineralización aurífera-polimetálica Zaruma-Portovelo. Se encuentra ubicada al Suroeste de los Andes Ecuatorianos y al Sur de la Cordillera Occidental. El distrito Zaruma-Portovelo al Suroeste y el distrito Pucará-Alausí al Noroeste (véase Figura 2.10 **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los cuales han sido reagrupados como subdistritos del distrito Azuay con los nombres de El Oro y Pucará-Alausí, respectivamente (Bonilla, 2009).

El núcleo de la Cordillera Occidental está formado por rocas metamórficas del Paleozoico, sobre las que se encuentran paquetes volcánicos de origen oceánico. Existen evidencias de la actividad tectónica regional producida en la cordillera, las cuales tienen un alto significado metalogénico y sismológico, manifestándose en las direcciones NNE y NNO. Algunas de las formaciones que se evidencian son:

- El **Complejo Metamórfico El Oro** del Paleozoico, sobre las que yacen capas de sedimentos metamorfizados, como pizarras y conglomerados con clivaje.
- **Formación Célica**, sobreyace discordantemente al Complejo Metamórfico El Oro. Conformada por andesitas y tobas andesíticas a dacíticas.
- **Formación Sacapalca**, formada por lavas andesíticas, brechas tobáceas, conglomerados, lutitas lacustres y tobas dacíticas (Bonilla, 2009).

Según (Bonilla, 2009), la geología de la faja de mineralización Zaruma-Portovelo, se encuentra formada por unidades pertenecientes al Paleozoico-Triásico: Unidad El Toro, rocas del Complejo Metamórfico El Oro, Unidad Chinguinda, rocas Cretácicas pertenecientes a la Unidad Pallatanga y rocas Terciarias de la Unidad Macuchi. Todas estas unidades cubiertas por depósitos volcánicos de actividad efusiva y de material de actividad magmática plutónica Terciaria.

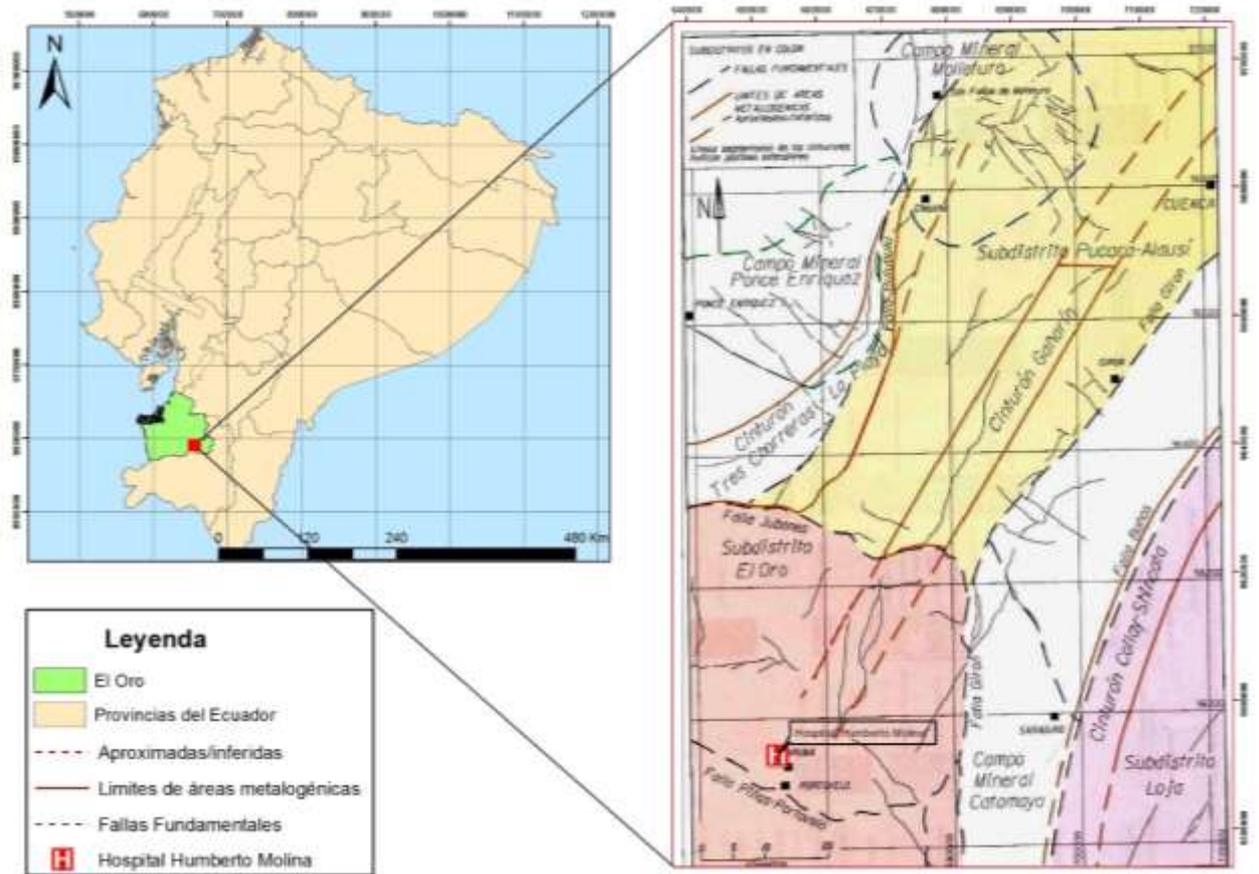


Figura 2.10 Mapa de las subdivisiones metalotectónicas del Distrito Azuay, el subdistrito El Oro y el subdistrito Pucará-Alausí. Modificado de: (Prodeminca, 2000)

2.2.2 Distrito Zaruma-Portovelo

El depósito epitermal Zaruma-Portovelo es el mayor depósito de oro en Ecuador, localizado al suroeste de la provincia de El Oro (Banda, Vikent'ev, & Nosik, 2005). Su morfología está representada por fuertes pendientes, crestas redondeadas y numerosas colinas resultado del patrón dendrítico del drenaje secundario. Este depósito se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del río Puyango (Bonilla, 2009) y está limitado al Norte y Sur por dos fallas principales de rumbo Noroeste (Fallas Piñas y Puente Busa-Palestina), que muestran un movimiento dextral-normal (Prodeminca, 2000).

Este sistema contiene más de 30 vetas de metal con base de cuarzo y contenido de Au, confinadas en una zona sub-longitudinal de 4 km de ancho, se extiende por 12 km desde Minas-Nuevas en el norte, a El Tablón en el sur (véase Figura 2.11) (Banda et al., 2005).

El distrito minero Zaruma-Portovelo está ubicado al Norte de la Falla de Piñas, siendo una importante estructura regional que separa el terreno metamórfico (ubicado al Sur) del terreno volcánico terciario (ubicado al Norte) (Bonilla, 2009).

Los mayores contenidos de oro se encontraron en la parte Sur del sistema (Portovelo), donde se encuentra el centro histórico de extracción de oro. Las venas tienen rumbo Norte-Sur con un buzamiento de 45° a 70° Este. Los metales de grado económico: Au (hasta 15 g/t y ley de corte 6 g/t), Ag (hasta 220 g/t), Cu (de 4 a 5%), Zn (hasta 10%) y Pb (de 4 a 5%). La parte central del sistema concentra los filones Vizcaya y Nicole (conocido como Sesmo en los horizontes superiores). Las vetas Vizcaya ubicadas al Noroeste de Zaruma se conocen desde la colonización española y son extraídas por la empresa ecuatoriana Bienes raíces (BIRA S.A.) (Bonilla, 2009).

2.2.3 Geología del distrito Zaruma-Portovelo

El distrito Zaruma-Portovelo está influenciado por un marco distrital dentro del cinturón mineralizado Ganarín (Prodeminca, 2000). Las principales Unidades y Formaciones geológicas del distrito Zaruma-Portovelo se describen a continuación (véase Figura 2.11):

- **Rocas Metamórficas (paleozoico):** ubicadas al Suroeste del distrito Zaruma-Portovelo y al Sur de la falla Piñas-Portovelo. Estas rocas se encuentran agrupadas con la denominación de Complejo Metamórfico El Oro (Aspden, Bonilla, & Duque, 1995). Conformada por serpentinitas fragmentadas, eclogitas, anfibolitas, gneises, granodioritas foliadas y migmatitas de alto grado, metapelitas, pizarras, lutitas, limolitas y conglomerados con clivaje de grado bajo a muy bajo (Bonilla, 2009) (Pérez, 2019).
- **Volcánicos Saraguro (Oligoceno):** es un ambiente deposicional subaéreo (Dunkley & Gaibor, 1997), que ocupa la porción Norte y Este del distrito Zaruma-Portovelo. El grupo Saraguro consiste en tobas (probablemente facies de flujo de salida de caldera), de composición riolítica a dacítica. Su espesor es menor a 1.000 metros (Bonilla, 2009) (Pérez, 2019).
- **Unidad Portovelo (Oligoceno):** se encuentra en contacto tectónico con las rocas metamórficas del Complejo Metamórfico El Oro, a lo largo de la falla Piñas-Portovelo.

Comprende mantos de lavas basalto-andesíticas y andesíticas de textura porfídica, tobas andesíticas y dacíticas. También incluye tobas de riolíticas a dacíticas con intercalaciones sedimentarias (pizarras-cherts) (Bonilla, 2009) (Pérez, 2019).

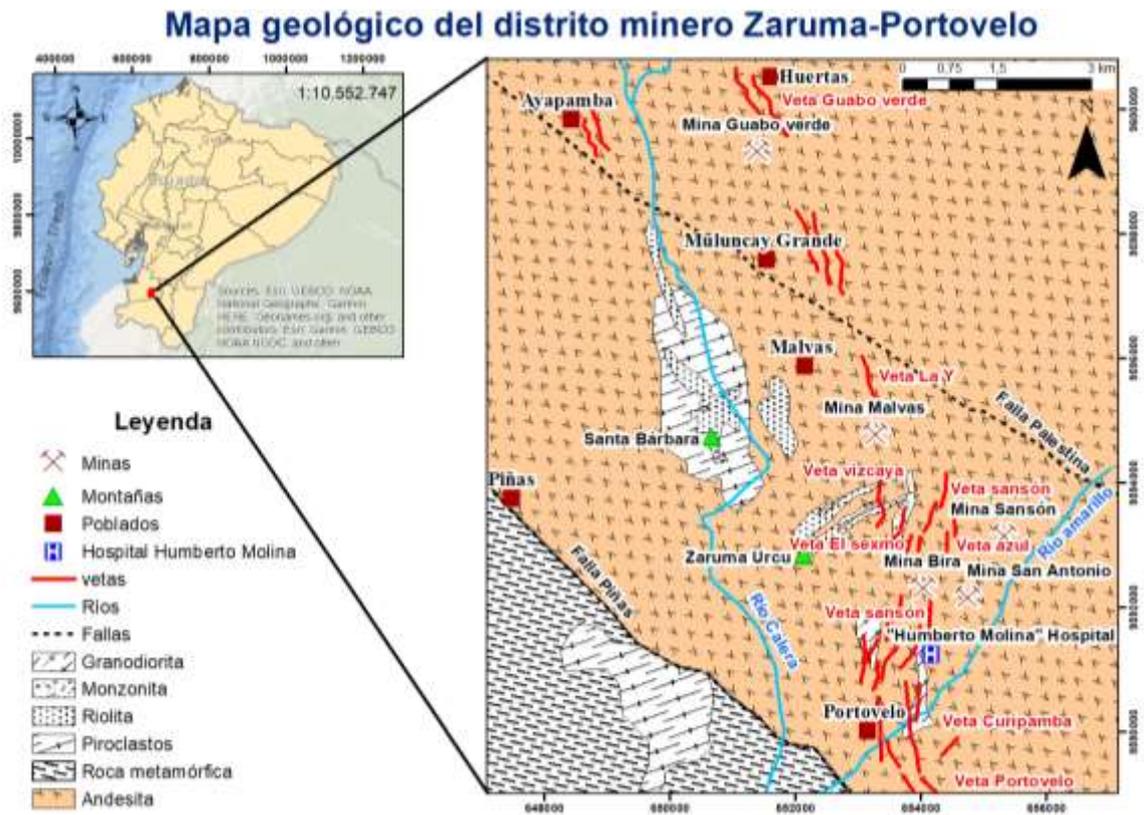


Figura 2.11 Mapa geológico del distrito minero Zaruma-Portovelo. Modificado de: (Berrezueta et al., 2016)

2.2.4 Estructuras del distrito Zaruma-Portovelo

Los principales rasgos estructurales en el distrito Zaruma-Portovelo, están representados por la falla Jubones al N y la falla Piñas-Portovelo al S, la megaestructura de rumbo Andino Girón al E y los lineamientos menores, entre los que se destaca el cinturón Gañarín (véase Figura 2.10). La falla Piñas-Portovelo de rumbo Noroeste-Sureste separa al Grupo Saraguro del Complejo Metamórfico El Oro y define el límite Sur del sistema de filones cuarzosos auríferos en el distrito (Bonilla, 2009) (Pérez, 2019).

La estructura regional Girón comprende pliegues cerrados, fallas inversas y cabalgamientos con rumbos Nornoreste a Norte. Entre las estructuras de 2do orden

(fallas Jubones y Piñas-Portovelo) se incluye una serie de fallas subordinadas de 3er orden:

- **Fallas de rumbo N-S:** destaca la falla Cerro Azul de 10 km de longitud y el sistema de fallas Salvias-Guanazán de 20 km de longitud, las cuales cortan litologías del Grupo Saraguro y Formación Pisayambo, respectivamente.
- **Fallas de rumbo NE-SO:** destacan las fallas Chilla de 4km de longitud y Chinchilla de 12 km de longitud, las cuales cortan litologías de la Formación Pisayambo.
- **Fallas de rumbo NO-SE:** destacan la falla Atahualpa y el sistema de fallas El Arí-Salvias, que cortan litologías del Grupo Saraguro, especialmente la Unidad Portovelo.
- **Falla de rumbo ONO-ESE:** representada por la falla Puente Busa-Palestina, situada 5 km al N de Zaruma. Es aproximadamente paralela a la falla Piñas-Portovelo y con movimiento dextral. La falla Puente Busa-Palestina delimita el principal enjambre de filones con cuarzo cerca de Malvas (Bonilla, 2009) (Pérez, 2019).

2.2.5 Geología local

La zona de estudio se encuentra sobre la unidad Portovelo, conformada por rocas andesitas, tobas volcánicas y brechas de clastos de andesita, que en su fase final de meteorización ha formado espesores de suelos potentes (entre 20 a 25 m) de tipo arcilloso, arenoso y areno-arcilloso, también llamado saprolito, de coloración gris rojizo a gris oscuro altamente inestables (Luis Cobos, Yáñez, & Flores, 2017).

Se aprecian algunas estructuras geológicas conservadas de la roca sana; de saturación media a alta. Además, como se puede observar al NW de la zona (véase Figura 2.12), se presenta un área de relleno, la misma que provoca problemas de hundimiento. En la inspección realizada por la SGR, se observó que la infraestructura de salud se localiza en una zona de inestabilidad geológica debido a las fuertes pendientes ($> 50^\circ$) generando reptación en dirección Sureste y Suroeste, las mismas que podrían desencadenar futuros deslizamientos (Luis Cobos et al., 2017).

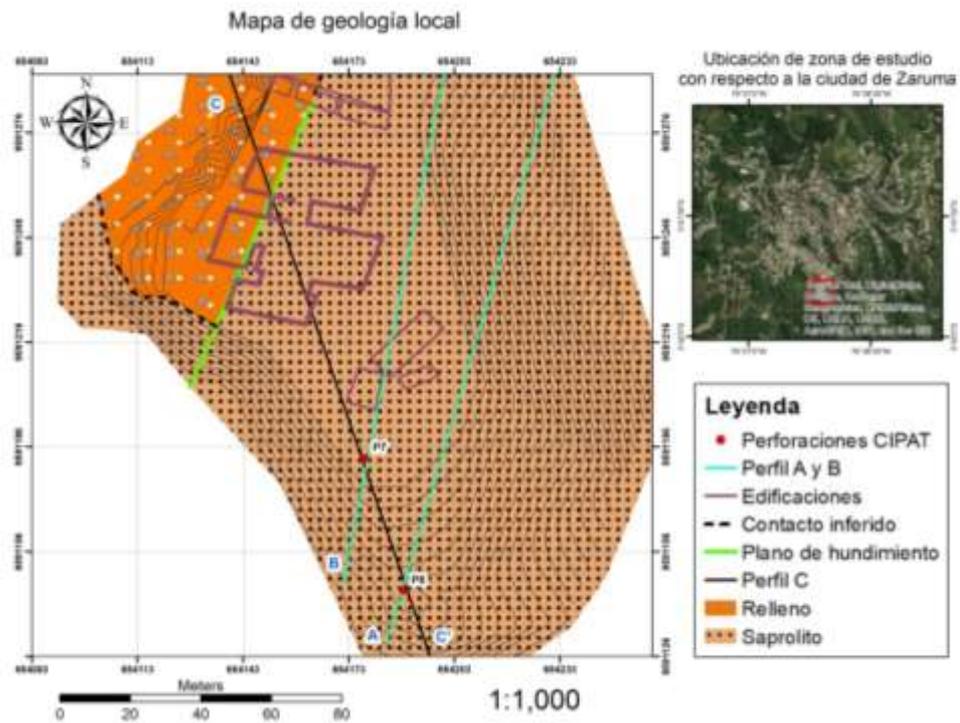


Figura 2.12 Mapa Geológico del Área de Estudio, obtenido de la información de informes anteriores.

Fuente: (CIPAT-ESPOL, 2019), Proyecto de consultoría, Zaruma, provincia de El Oro”.

2.3 Estado del arte

2.3.1 Metodología de estabilidad de taludes

Existen diferentes metodologías para el análisis de estabilidad de taludes. A continuación, se detallarán 2 casos donde han aplicado geofísica en diferentes zonas:

(González, Mascareño, Álvarez, González, & Álvarez, 2014), en su artículo: “*Inestabilidad de laderas en el área metropolitana de Tijuana*”, analizaron las principales causas de deslizamientos en el área de estudio. La metodología fue dividida en 2 fases:

- Recopilación de datos geométricos del terreno, perforación de pozos para establecer la estratigrafía y escáner 3D para el levantamiento topográfico. Como análisis adicional para determinar la distribución lateral de la litología se utilizó la configuración geométrica dipolo-dipolo.
- Análisis de estabilidad mediante cálculo de equilibrio límite utilizando simulaciones por computadora para cálculo de los factores de seguridad.

Como conclusión se obtuvo que, aunque las características geológicas, geotécnicas, morfológicas y tectónicas de la región son factores naturales que influyen en la inestabilidad, el desarrollo urbano y la actividad humana son los factores desencadenantes más importantes, ya que agravan la inestabilidad de las pendientes.

(Jiménez, 2015), en su trabajo: *“Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de Toledo (Oviedo)”* realizó y concluyó lo siguiente:

- 3 configuraciones geométricas (Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo) para la toma de datos.
- Software EarthImager 2D de la empresa AGI (Advanced Geosciences, Inc.) para procesar los datos obtenidos en la geofísica.
- El terreno en el que se realizaron las mediciones estaba embebido en agua, lo que favoreció la correcta toma de medidas de resistividad.
- No se pudo estudiar el final del deslizamiento, debido a la zona de difícil acceso cubierta por densa vegetación.
- Las grietas que se presentan en la zona de estudio se formaron después de episodios de intensas lluvias.
- Finalmente se pudo determinar el tipo y superficie de deslizamiento.

En base a los ejemplos antes mencionados, la geofísica es muy utilizada para el estudio y análisis de estabilidad de taludes, pero todo depende de las condiciones en las cuales esté enmarcado el problema. Las perforaciones ayudan a determinar de manera directa la estratigrafía de la zona de estudio. La presencia de agua ayuda a obtener mejores resultados en la toma de datos de resistividad. El tipo de roca o suelo, determinan el tipo de método a utilizar en el software para calcular el factor de seguridad del talud.

2.3.2 Alcance de las Tomografías eléctricas

La geofísica es usada en diferentes estudios e investigaciones:

Según (Jiménez, 2015), la tomografía eléctrica se suele utilizar para el estudio de los deslizamientos producidos cerca de la superficie, para identificar todo tipo de

discontinuidades o características en el subsuelo que presenten un contraste de resistividades.

(Teixidó & Quintana, 2013) mencionan que, la tomografía eléctrica permite obtener información de un deslizamiento. La masa deslizante suele estar determinada por resistividades más bajas que los materiales que la rodean. La infiltración de agua es uno de los principales agentes de activación de los deslizamientos.

De acuerdo con (Aracil et al., 2005), el objetivo específico de esta técnica es determinar el valor de la resistividad eléctrica real, y su distribución en el subsuelo a partir de mediciones realizadas en superficie. Posteriormente, los datos son procesados con herramientas informáticas, utilizando un proceso de iteraciones que aproximan la sección medida a un modelo teórico real. Combinando adecuadamente la resolución lateral y profundidad de la Tomografía eléctrica, esta técnica es sin duda una de las herramientas más eficaces de carácter no destructivo, aplicada en el estudio y caracterización del terreno en un amplio rango de profundidades.

2.3.3 Tomografías eléctricas aplicadas a deslizamientos

(Batayneh & Al-Diabat, 2002), utilizaron tomografías eléctricas 2D para investigar el caso de deslizamientos de tierra, producidos tras fuertes lluvias registradas en la zona de falla en el mar muerto (Jordania).

(Lapenna et al., 2005), estudiaron deslizamientos producidos en los Apeninos, Sur de Italia, mediante imágenes de resistividad eléctrica de alta resolución para delimitar la geometría de los deslizamientos y localizar las posibles superficies de reactivación.

(Cervantes, Poláček, & Rysavka, 2012), aplicaron tomografías eléctricas en el estudio de la deformación de ladera ocurrida en Lidečko, república Checa. Se asume que la causa de la activación del movimiento fue la lluvia torrencial, alcanzando la máxima saturación de las capas superficiales. En el estudio se pudo detectar la superficie de rotura mediante las medidas de resistividad del terreno, debido a la transición de la capa más basal y la capa menos resistiva, que desliza sobre su predecesora debido a su alto contenido en agua.

(López, 2019) en su trabajo de “*Aplicación de las tomografías eléctricas a la geotecnia en Guatemala*”, mencionó el caso de: Caracterización geotécnica en Escuintla, Guatemala. Éste estudio se realizó con la finalidad de evaluar las características geotécnicas del terreno, para anticipar las posibles amenazas de las edificaciones y las nuevas obras en la zona de estudio. Se aplicaron 2 metodologías:

- Tomografías eléctricas para caracterizar geológicamente el terreno.
- Sondeos eléctricos verticales para la exploración de aguas subterráneas.

Finalmente (Jiménez, 2015), hace referencia al caso del deslizamiento de Diezma, España. La metodología aplicada fue la realización de tomografías eléctricas para obtener el modelo y el volumen de la masa deslizante sobre la roca consolidada. El modelo del subsuelo se obtuvo con tres perfiles transversales al deslizamiento y uno longitudinal coincidiendo con el eje de simetría.

Los trabajos e investigaciones antes mencionados muestran la importancia de la geofísica en los deslizamientos de tierra o roca. Este tipo de metodología proporciona datos fundamentales para la evaluación y caracterización de los movimientos de masa, pero al mismo tiempo se deben conocer las limitantes que existen dentro de este método geofísico indirecto, las condiciones y geología del terreno.

2.3.4 Inestabilidad de terreno en Zaruma

(González, Ruiz, & Gallardo, 2017), en su trabajo “*Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador*” (González et al., 2017), aplicó la siguiente metodología:

- Caracterización de entorno físico y social e identificación de las principales problemáticas relacionadas con movimientos del terreno.
- Identificación y evaluación de los factores condicionantes de la inestabilidad, como: aspectos geológicos, tectónicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos que caracterizan la región y que influyen en el comportamiento de las masas de suelo y roca.

- Identificación y evaluación de los factores desencadenantes de la inestabilidad, especialmente los aspectos relacionados con la actividad humana, con especial énfasis en la minería y el desarrollo urbano en el área de estudio.

Concluyendo que, la actividad antropogénica generada por la actividad minera, infraestructura urbana y la densidad de población, así como los factores geológicos, geotécnicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos en Zaruma, hacen que la inestabilidad del terreno sea una amenaza permanente y que el riesgo de ocurrencia de movimientos en masas de suelo y roca alcancen niveles difíciles de predecir.

(Pesantes, 2005) en su trabajo *“Evaluación y Zonificación de Riesgos Geodinámicos en el Distrito Minero de Zaruma y Portovelo”* (Pesantes, 2005), utilizó la siguiente metodología:

- Observación y recopilación de información existente.
- Inventario de bocaminas, escombreras y deslizamientos.
- Generación de mapas para la zonificación de riesgos geodinámicos.

Concluyendo que, Zaruma presenta grandes problemas en sus infraestructuras debido a la erosión natural (mala calidad del suelo y fuertes pendientes) y actividades antrópicas (bocaminas que atraviesan el casco urbano).

(L. Cobos, 2018) en su informe *“Modelo geofísico del área de interés del casco urbano de la ciudad de Zaruma, provincia de El Oro”*, utilizó la siguiente metodología:

- Trabajo de campo, toma de datos de tomografías eléctricas usando el equipo ABEM Terrameter, mediante la configuración Wenner-Schlumberger.
- Procesamiento de tomografías eléctricas.
- Correlación de tomografías con perforaciones.

Finalmente menciona que, la presencia de abundantes labores mineras informales puede acelerar el proceso de alteración de las rocas preexistentes, generando zonas potencialmente inestables, debido a que la actividad minera produce constantes vibraciones durante las detonaciones.

De acuerdo con (Pindo, Espinoza, Noboa, & Villaverde, 2018), en su trabajo *“Información geoespacial del área minera Portovelo–Zaruma, para prevenir y reducir riesgos naturales*

y antrópicos en los resultados obtenidos del análisis de exposición de las edificaciones a las amenazas por movimientos en masa”, se obtuvieron como resultado datos de:

- Interferometría
- Ortofotos y modelo de elevaciones
- Correlación de tomografías eléctricas y perforaciones geotécnicas
- Modelo geofísico preliminar 3D

Los autores observaron que un alto porcentaje de las edificaciones, se encuentran expuestas a una categoría alta a movimientos de masa. Sin embargo, esto no significa que haya un peligro inminente, sino que se debe trabajar en la gestión de riesgos para tomar acciones preventivas frente a la amenaza.

En mención a lo descrito anteriormente, se puede evidenciar la problemática existente en la ciudad de Zaruma debido a la extracción minera ilegal. Esta actividad antrópica representa una amenaza en la estabilidad de suelos y rocas presentes en el caso urbano de la ciudad Zaruma. Existen muchos informes y trabajos realizados en la ciudad, aplicando diferentes metodologías en las cuales destaca la geofísica, señalando que es un método indirecto, que con la ayuda de las perforaciones permite conocer la geología existente en el subsuelo. En el área de estudio del presente proyecto es válido realizar los métodos geofísicos antes mencionados, para posteriormente elegir el método adecuado para la estabilización de taludes dependiendo del material existente en el subsuelo, determinado en base a la correlación de las tomografías eléctricas con las perforaciones.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

En la ciudad de Zaruma se han registrado varios problemas de subsidencia producto de la actividad minería ilegal que deja huecos en el subsuelo, provocando inestabilidad en el sector. El Hospital Humberto Molina ubicado al suroeste de Zaruma, presenta fisuras de origen desconocido en sus paredes y pisos. El objetivo principal del presente estudio consistió en, realizar la caracterización geomecánica del subsuelo y la estabilidad de taludes en el Hospital “Humberto Molina”, para las recomendaciones de la propuesta de pre-diseño.

Para la identificación de los factores involucrados en el proyecto, se utilizaron algunas herramientas de design thinking detalladas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Herramientas de design thinking utilizadas en el proyecto.

Fase	Objetivo	Herramienta	Resultado
Empatizar	Identificar quienes son los clientes directos, perjudicados e involucrados en solucionar la problemática.	Mapa de actores	<ul style="list-style-type: none"> • Municipio de Zaruma • COE provincial • SGR • ARCOM Ver diagrama (1)
Definir	Establecer las restricciones del proyecto, problemáticas y metodologías existentes en el proyecto.	Entrevista a experto Ing. Josue Briones	<ul style="list-style-type: none"> • Área que cubre el proyecto. • Metodología aplicada en el proyecto. • Presupuesto económico. • Información anterior del área de estudio.
		Entrevista a la comunidad Sra. Norma Maldonado	<ul style="list-style-type: none"> • Mencionó que nunca ha escuchado detonaciones cerca del hospital. • Su casa no presenta fisuras. • Necesitan que se reestablezca la atención médica. • Ha vivido en la zona hace muchos años y nunca han ocurrido deslizamientos cercanos.
		Mapa mental	Ver diagrama (1)

En base a los resultados obtenidos de las herramientas usadas en design thinking, se pudo establecer la metodología aplicada en el proyecto (véase Figura 3.1).

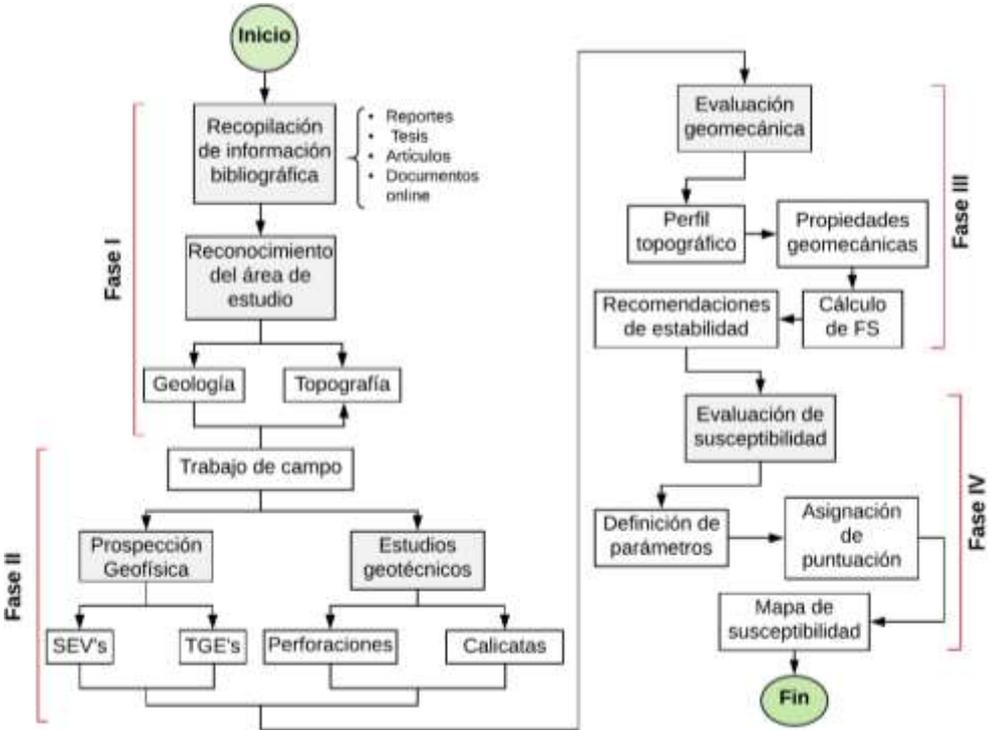


Figura 3.1 Flujo de metodología aplicada al proyecto.

3.1 Fase I: Búsqueda de información

Se revisaron informes realizados en la ciudad de Zaruma por instituciones como, la SGR, Ministerio de salud pública y la defensoría del pueblo. Además, publicaciones y entrevistas que trataban de la problemática que genera la minería ilegal. Esta recopilación de información ayudó a identificar los diferentes problemas que existen y cómo estos afectan al Hospital “Humberto Molina”. En base a bibliografía obtenida se pudo conocer la geología de la zona de estudio y las metodologías aplicadas en lugares que presentan el mismo problema. Entre los datos proporcionados por CIPAT-ESPOL constan: puntos topográficos obtenidos de GPS diferencial, mapa geológico, reporte de perforaciones, datos de calicatas y de las estaciones geomecánicas.

3.2 Fase II: Trabajo de campo

Para la determinación de la litología presente en la zona de estudio, se emplearon métodos indirectos y métodos indirectos con la finalidad de corroborar la información geológica, y así obtener resultados confiables.

3.2.1 Prospección geofísica

El método indirecto consiste en realizar SEV's y TGE's con diferentes configuraciones en el equipo, dependiendo de la finalidad del proyecto. En la (véase Figura 3.2) se puede observar la configuración seleccionada para la geofísica.

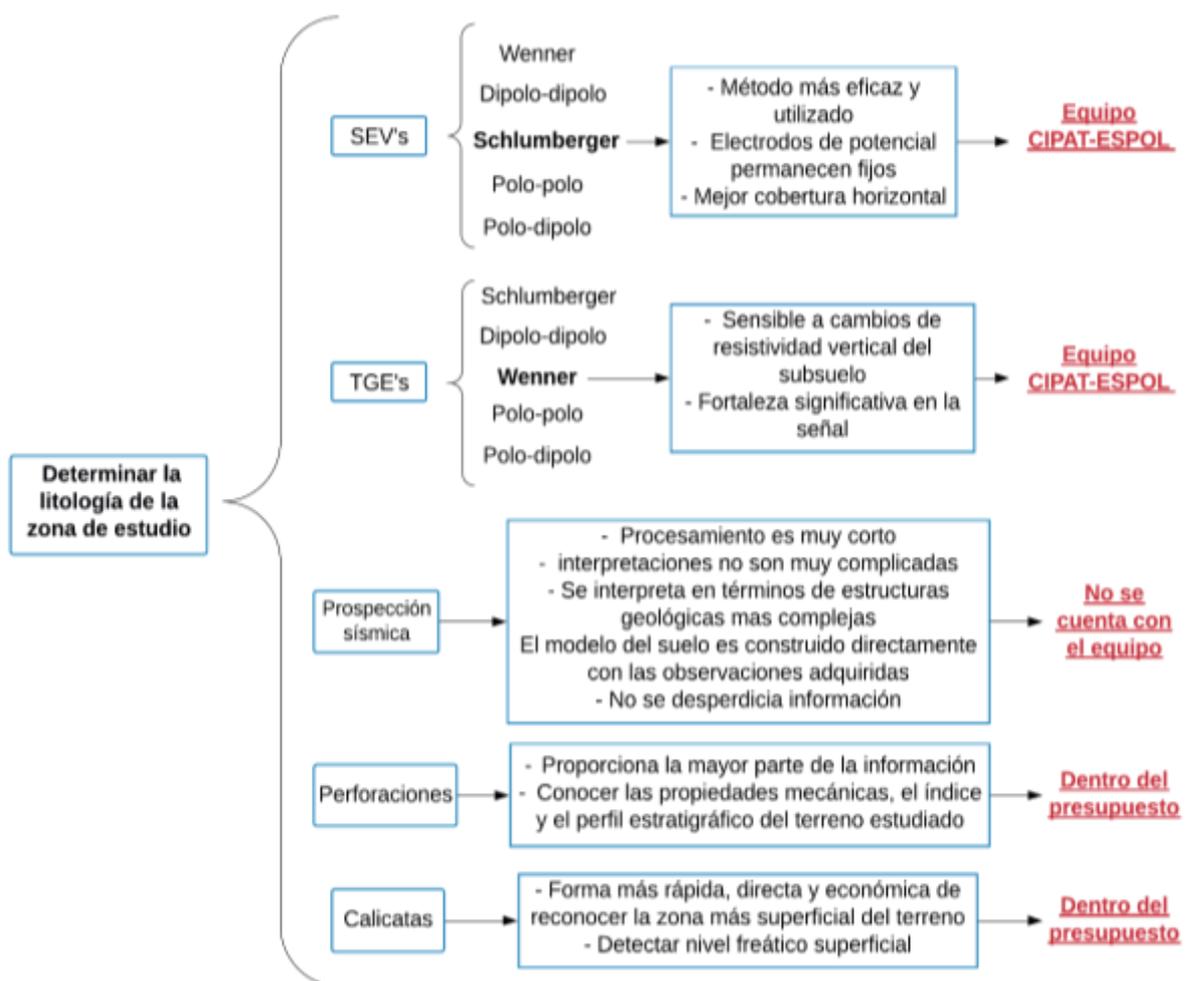


Figura 3.2 Metodologías existentes para la determinación de la litología en la zona de estudio.

3.2.1.1 SEV's

Se realizaron SEV's y TGE's utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000 (véase Figura 3.3). Este procedimiento geofísico se llevó a cabo en lugares que presentaron las condiciones adecuadas del terreno, como: superficie a la misma cota y presencia del suelo para enterrar los electrodos (véase Figura 3.4), de tal manera que se genere el paso de corriente. Todo lo expuesto anteriormente permitió que se efectuara la campaña geofísica (véase Figura 3.5).



Figura 3.3 Equipo utilizado en la prospección geofísica.



Figura 3.4 Superficie a la misma cota para TGE's.

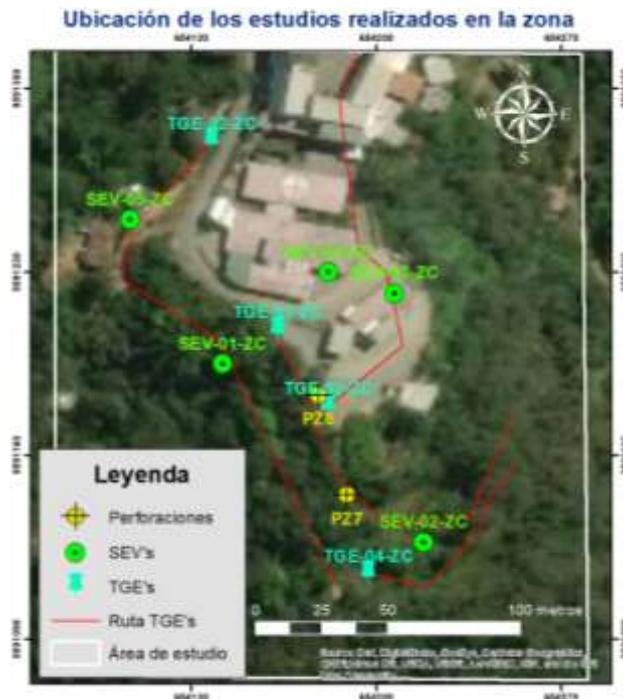


Figura 3.5 Ubicación de los estudios realizado en los alrededores del Hospital Humberto Molina

Se realizaron 5 SEV's (véase Figura 3.5) usando el equipo ABEM terrameter SAS1000, arreglo Schlumberger y distinta abertura entre electrodos internos y externos (véase Apéndice B: Geofísica). En la Tabla 3.2 se muestra la ubicación de los SEV's en la Figura 3.3 el arreglo del equipo utilizado en campo, todo este proceso con la finalidad de obtener la resistividad de las diferentes capas del subsuelo (Apéndice B: Geofísica).

Tabla 3.2 Coordenadas de los SEV's.

Códigos SEV's	Coordenadas X	Coordenadas Y	Observaciones
SEV-01-ZC	654142	9591195	Ubicado en el flanco oeste de la zona de estudio
SEV-02-ZC	654218	9591127	Ubicado en el sur de la zona de estudio
SEV-03-ZC	654207	9591222	Ubicado en el flanco este de la zona de estudio
SEV-04-ZC	654182	9591230	Ubicado en el flanco este de la zona de estudio
SEV-05-ZC	654107	9591250	Ubicado en al norte de la zona de estudio

Los datos obtenidos en los SEV's de la campaña geoelectrica (véase Apéndice B: Geofísica), fueron procesados en el software IPI2win (véase Figura 3.6) hasta obtener un porcentaje menor y alcanzar la profundidad teórica calculada (véase Figura 3.7) .

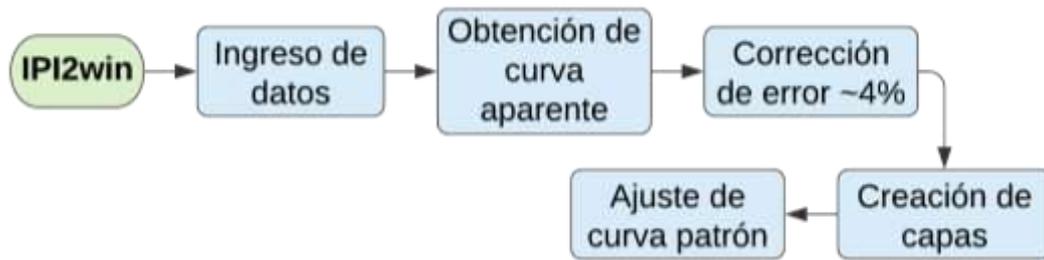


Figura 3.6 Procedimiento en el software IPI2win.

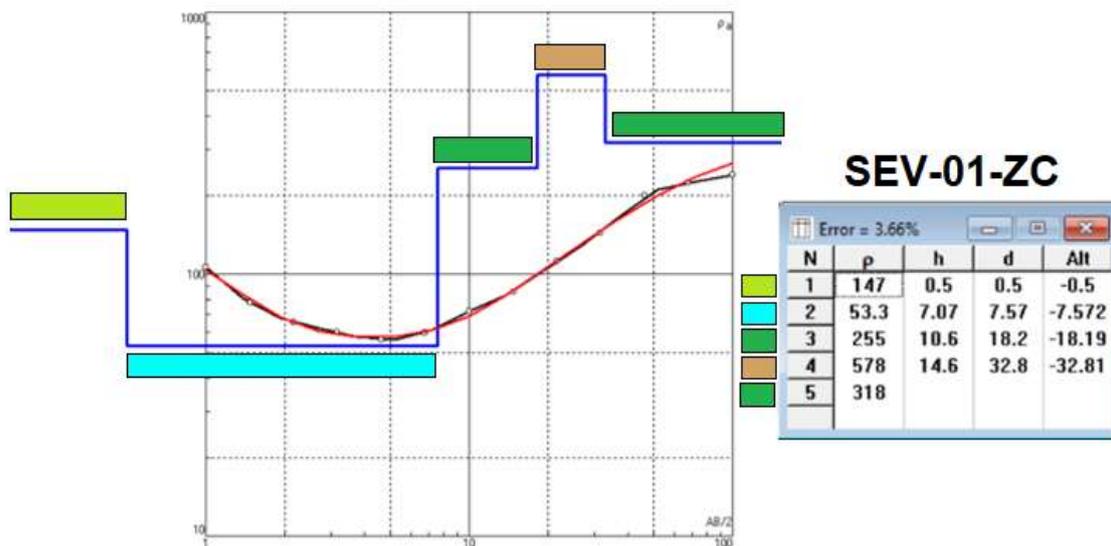


Figura 3.7 Curva obtenida en el software IPI2win correspondiente al SEV-01-ZC, con un error de 3.66%.

Las demás curvas correspondientes al resto de los sondeos se presentan en la sección de Apéndice B: Geofísica

3.2.1.2 TGE's

Se realizaron 4 TGE's (véase Figura 3.5), utilizando la configuración de Wenner, con el equipo ABEM (véase Figura 3.8). La Tabla 3.3 muestra la ubicación de las TGE's realizadas en la zona de estudio.



Figura 3.8 Arreglo del equipo ABEM para las TGE's.

Tabla 3.3 Coordenadas de Tomografías Geoeléctricas de la primera fase.

Código TGE's	Coordenadas X	Coordenadas Y	Observaciones
TGE-01-ZC	654163	9591208	Línea de dirección de la TGE ubicada hacia el oeste de la zona de estudio.
TGE-02-ZC	654138	9591280	Línea de dirección de la TGE ubicada hacia el sur de la zona de estudio.
TGE-03-ZC	654182	9591179	Línea de dirección de la TGE ubicada hacia el noreste de la zona de estudio.
TGE-04-ZC	654197	9591115	Línea de dirección de la TGE ubicada hacia el sureste de la zona de estudio.

Los datos obtenidos de las TGE's, fueron descargados a la computadora mediante un cable USB, en el software SAS 4000/SAS1000 utilities, en formato .dat (véase Figura 3.9).

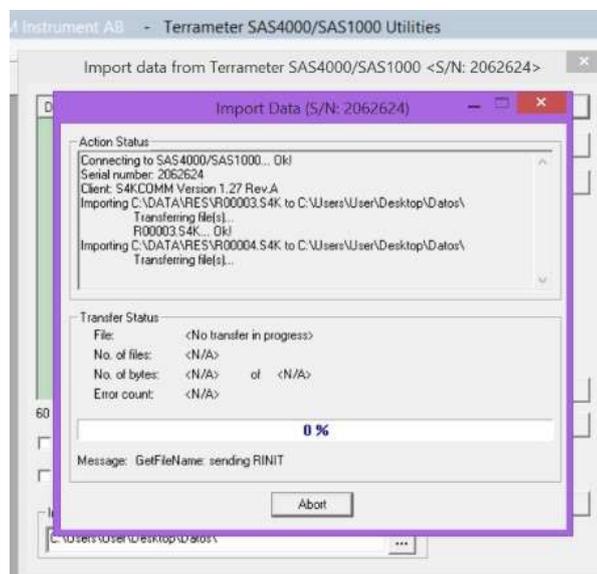


Figura 3.9 Descarga de datos de las TGE's en el software SAS4000/SAS1000 utilities.

Estos datos fueron procesados en el software RES2dinv, en donde se corrigieron los puntos que presentaban incoherencia con respecto a las cotas, hasta obtener un porcentaje de error menor a 10% (véase Figura 3.10). Con los datos que presentan menor porcentaje de error, se pudo realizar la inversión de mínimos cuadrados y una serie de procedimientos (véase Figura 3.11) para obtener la imagen final de la inversión. Con los valores de resistividad (véase Figura 3.12) se fueron delimitando las zonas y comparándolos con los valores para los diferentes tipos de saprolitos presentes en el área de estudio (véase Figura 3.12), hasta obtener la sección final.

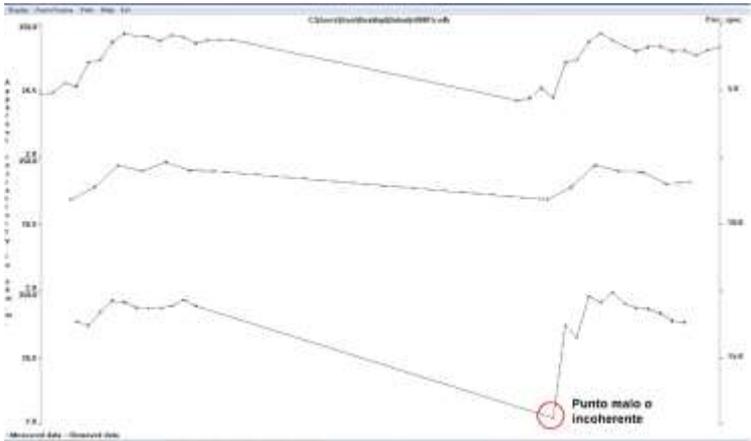


Figura 3.10 Exterminio de datos erróneos o malo que aumentar el error en la data de las TGE's.

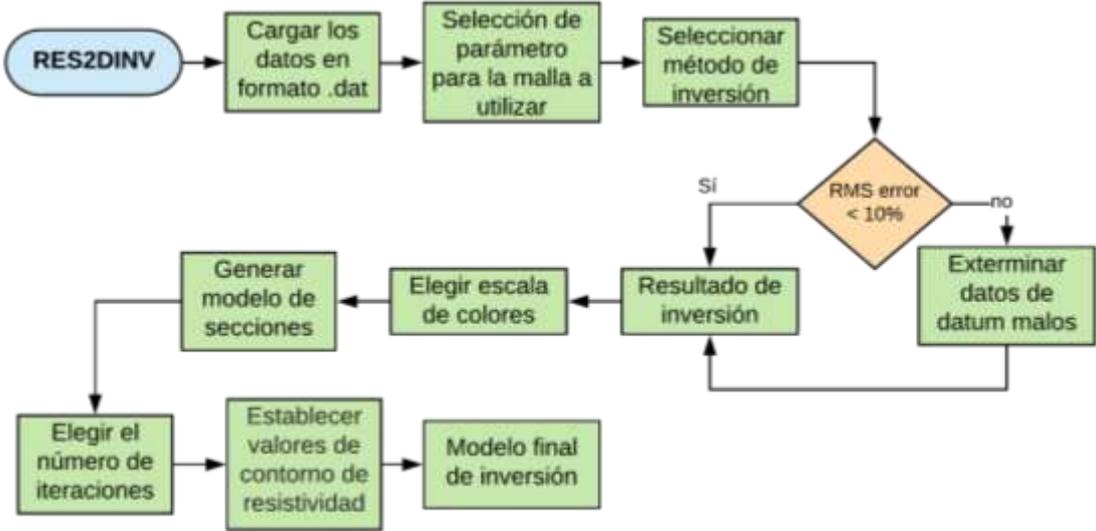


Figura 3.11 Flujoograma del proceso realizado en el software RES2DINV.

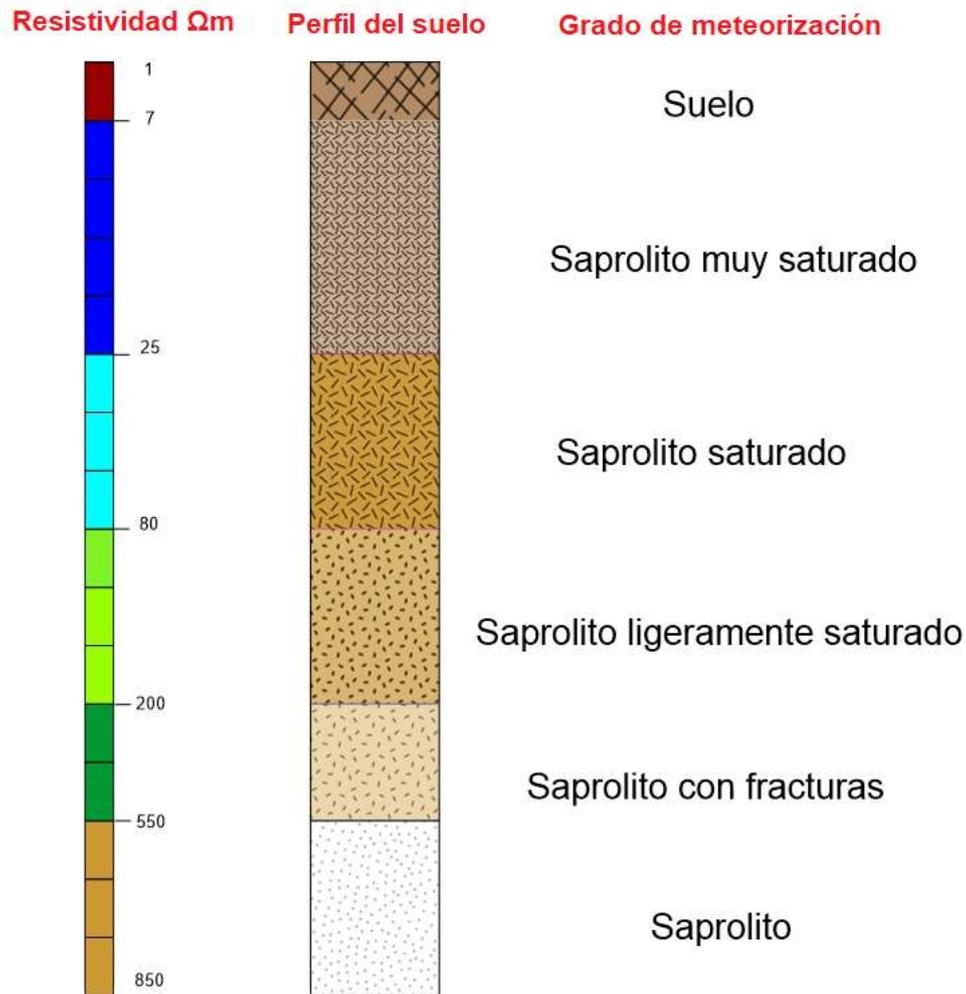


Figura 3.12 Tabla de referencia entre resistividades y grado de meteorización del suelo en base a las perforaciones realizadas y estudios anteriores en el área de estudio.

3.2.2 Estudios geotécnicos

Las perforaciones y calicatas son métodos directos para determinar el tipo de material localizado en el subsuelo de la zona de estudio.

3.2.2.1 Perforaciones

Con la información obtenida de la resistividad del subsuelo en los estudios geofísicos, se planificaron 2 perforaciones en el área de estudio (véase Figura 3.5). Posteriormente, se realizó el registro geológico-geotécnico de los testigos de perforación, determinando el tipo de litología, espesores, estructuras y calidad del macizo.

3.2.2.2 Calicatas

Se realizaron tres calicatas dentro de las instalaciones del hospital (debajo de las fracturas del piso) ubicadas tal como se muestra en la Figura 3.13, tomando muestras de material con ayuda de tubos shelby para ensayos posteriores de laboratorio.



Figura 3.13 Ubicación de las calicatas dentro del hospital.

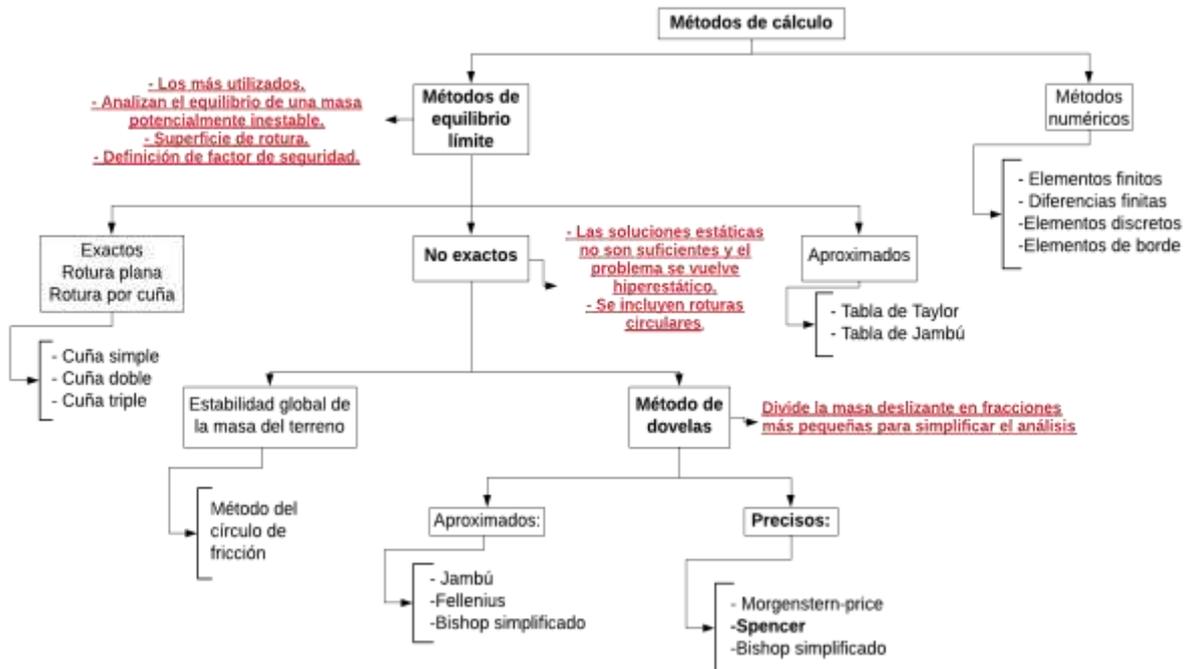


Figura 3.14 Mapa conceptual de las metodologías existentes para la estabilidad de taludes. Modificado de (Suárez Díaz, 2009)

A continuación (véase Tabla 3.4) se presenta un cuadro, donde se detallan las características más relevantes de los métodos de estabilidad de taludes por dovelas:

Tabla 3.4 Comparación de metodologías usadas en la estabilidad de taludes. Fuente:

Método	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Morgenstern-price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	El método es muy similar al método Spencer, diferenciándose en la inclinación de la fuerza resultante entre dovelas, ya que se asume que varía de acuerdo con una función arbitraria (Suárez Díaz, 2009).
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada (Suárez Díaz, 2009). Rigurosamente satisface el equilibrio estático.
Bishop simplificado (1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduce el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela (Suárez Díaz, 2009).

En la mayoría de los casos prácticos no se conoce el tipo de falla, por lo cual son muy usados los métodos rigurosos como Morgenstern-Price (1965) y Spencer (1967), dando resultados consistentes y sin mayores dificultades numéricas. Estos dos métodos mencionados anteriormente permiten obtener factores de seguridad muy similares entre ellos (Duncan & Wright, 1980). Se eligió el método de Spencer porque al tener como litología saprolito en diferentes tipos de saturaciones, se puede asumir que las fuerzas laterales son las mismas para cada dovela, satisfaciendo las condiciones de equilibrio estático.

3.3 Fase III: Cálculo de factor de seguridad

Con la topografía se generaron curvas de nivel (cada metro) en el software ArcGis, a partir de las cuales se trazaron perfiles topográficos escogiendo el lugar idóneo en base a la pendiente del talud que se considere de interés. Los perfiles, datos obtenidos en las perforaciones y estudios anteriores (cohesión, ángulo de fricción interna y peso específico) y, el valor de la aceleración sísmica de la ciudad de Zaruma (0.4) fueron ingresados en el software Slide 5.0 (véase Figura 3.15). Finalmente, se calcularon varios factores de seguridad mediante el método de Spencer, eligiendo el menor valor con la finalidad de cubrir las peores condiciones del terreno.



Figura 3.15 Proceso aplicado en el software Slide 5.0.

3.4 Fase IV: Susceptibilidad al deslizamiento.

Existen diferentes metodologías aplicadas a la evaluación del grado de susceptibilidad de los deslizamientos de masa, la mayoría de estos métodos se basan en determinar los diferentes factores que influyen a que se genere la rotura. Por lo general, estos factores se suelen combinar, reflejando los resultados obtenidos en forma cartográfica mediante mapas de susceptibilidad (Y. S. Medina, 2017). Existen cuatro métodos (véase Tabla 3.5) utilizados en la evaluación y confección de mapas de susceptibilidad del terreno.

Tabla 3.5 Tabla de resumen de las metodologías generales usadas para la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento. Fuente: (Ramírez Navas, 2006)

Método	Ventaja	Desventaja
Determinísticos	-Grado de fiabilidad alto si los datos son correctos. -Métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos.	-Baja idoneidad para zonificaciones rápidas y de extensas áreas.
Heurísticos	-Conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad. -Los factores son ordenados y ponderados según su importancia en la formación de deslizamientos.	-Introduce un grado de subjetividad que imposibilita comparar documentos producidos por diferentes autores.
Probabilísticos	-Relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actuales y pasados. -Se utilizan cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa.	-El costo de la adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente.
Geomorfológicos	-Validez y detalle del análisis y mapa resultantes, si se realizan por un buen experto.	-Alto grado de subjetividad dependiendo de la experiencia del autor. -Se necesita conocer la morfología y el tipo de movimientos (C. Medina & Astudillo, 2013).
Evaluación por expertos	-Análisis multicriterio implícito en la mente del profesional experimentado. -Puede ser analizado en diferentes escalas, con un manejo constante de información basada en la descripción detallada de la situación de campo.	-Subjetividad de los criterios. -Cada experto puede llegar a conclusiones diferentes de acuerdo con su propia experiencia.

Todos los métodos descritos anteriormente (véase Tabla 3.5) se pueden usar para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos, sin embargo considerando este tipo de problemática y trabajos anteriores realizados en la zona de estudio, se empleó una recopilación de metodologías (Suarez 1998, Nicholson 1997, Transportation Research Board, 1996, González, 1989) en base a la evaluación por expertos, para discriminar entre los deslizamientos provocados por la actividad minera ilegal y los causados por otros factores externos. (Sánchez & Sánchez, 2018) en su proyecto de tesis usaron diferentes parámetros para roca y suelo, pero por la geología del sector determinada en las fases anteriores del proyecto, solo se usaron los parámetros correspondientes al suelo.

En la Figura 3.16, se representa el proceso para determinar la susceptibilidad al deslizamiento en la zona de estudio.

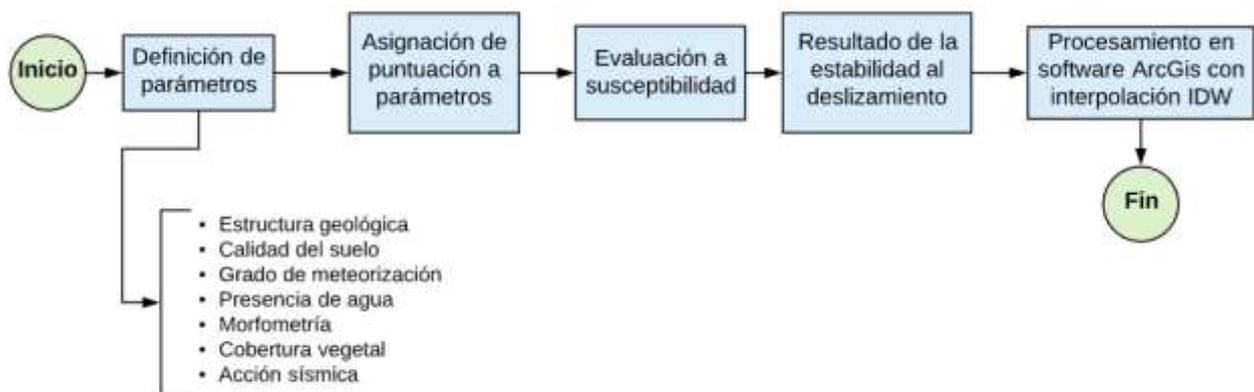


Figura 3.16 Procesamiento aplicado en la susceptibilidad a deslizamientos.

Se valoraron las condiciones de la zona de estudio (laderas del cerro) y se realizó la caracterización preliminar, a partir de los resultados obtenidos en las visitas de campo y estudios anteriores realizados en la zona. El procedimiento anterior permitió obtener criterios sobre los sectores más propensos al movimiento de masa y los factores que más influyen a que se produzca este suceso. A partir de estos criterios se eligieron los sitios de estudio (16 estaciones geotécnicas) (véase Figura 3.17) y se definieron los parámetros principales en el análisis de la susceptibilidad al deslizamiento (véase Tabla 3.6), asignándole calificaciones a cada uno de estos parámetros.

Tabla 3.6 Puntuación asignada a cada parámetro del suelo.

Fuente: (Ambalagan, 1992; Sánchez & Sánchez, 2018)

Parámetro principal	Peso asignado en el análisis de la susceptibilidad al deslizamiento (S.D)
Característica (calidad) del suelo	Hasta 4.0
Estructura geológica	Hasta 3.0
Morfometría	Hasta 4.0
Grado de deterioro (erosión – meteorización)	Hasta 4.0
Presencia de agua	Hasta 3.0
Cobertura vegetal	Hasta 3.0
Acción sísmica	Hasta 4.0



Figura 3.17 Ubicación de las estaciones geomecánicas en la zona de estudio.

Además, se elaboraron tablas para cada parámetro (véase Tabla 3.7 a Tabla 3.13), a los cuales se les asignaron puntuaciones de acuerdo con (Ambalagán, 1992, Suarez 1998, Suarez 2000, Transportation Resarch Boord 1996 y González 1989).

- **Estructuras geológicas:** Dependen del rumbo y el buzamiento de las discontinuidades y su relación con la inclinación del talud, definiendo si la estructura favorece o no al deslizamiento.

Tabla 3.7 Puntuación asignada al parámetro estructura geológica.

Fuente: (Ambalagan, 1992), Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018) .

Categoría	Condiciones existentes	Puntuación
I	Posición del talud favorable con respecto a los planos de debilitamiento	0.5
II	Posición del talud algo favorable con respecto a los planos de debilitamiento	1.5 – 2.0
III	Los planos de debilitamiento favorecen al deslizamiento	2.5 – 3.0
IV	Los planos de debilitamiento crean condiciones muy favorables al deslizamiento	4.0

- **Características (calidad) del suelo:** Determinación en campo del tipo de suelo y su estado: coluvial, residual, saprolitos, grado de deterioro (meteorización y erosión).

Tabla 3.8 Puntuación asignada al parámetro calidad de suelo.

Fuente: (Ambalagan, 1992), Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018) .

Categoría	Características y estado del suelo	Puntuación
I	Suelos de calidad, bien consolidados, prácticamente no erosionados.	0
II	Suelos de mediana a alta calidad, poco erosionados.	1.0
III	Suelos tipos coluviales, arcilloso con poca humedad	2.0
IV	Suelos arenosos – arcillosos, húmedos, poco estable	3.0
V	Suelo residual	4.0

- **Presencia de agua:** Se valoran diferentes situaciones relacionadas con el contenido de agua en el sector analizado.

Tabla 3.9 Valor asignado al parámetro presencia del agua.

Fuente: (Ambalagan, 1992). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018) .

Categoría	Características	Puntuación
I	No hay presencia de agua	0
II	Muy poca acción de las aguas superficiales. Existe alguna influencia de agua subterránea.	0.5
III	Se produce una acción apreciable del agua superficial. Existe presencia de agua subterránea	1.0
IV	Existe presencia significativa de agua superficial y de las aguas subterráneas.	2.0
V	Mucha influencia de agua superficial y subterráneas. Se produce un empuje significativo.	3.0

- **Grado de erosionabilidad del suelo:** Puede variar desde un suelo sin erosionar hasta un suelo muy erosionado.

Tabla 3.10 Valor asignado al parámetro grado de erosionabilidad (suelo).

Fuente: (Phillipson & Brand, 1985). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018).

Grado de erosionabilidad	Características de los suelos según el grado de erosionabilidad	Puntuación
I	Suelos prácticamente sin ser erosionados	0
II	Suelos con poca erosión	0.5
III	Suelos con mediana erosión	1.0
IV	Suelos con significativo proceso de erosión	2.0
V	Suelo erosionado	3.0
VI	Suelo muy erosionado	4.0

- **Morfometría:** relacionado con la inclinación del talud; puede variar desde una situación con muy poca pendiente, hasta una pendiente muy alta.

Tabla 3.11 Valor asignado al parámetro morfometría.

Fuente: (Ambalagan, 1992). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018).

Categoría	Características	Puntuación
I	Talud de muy poca pendiente	0
II	Talud de pendiente suave o mediana	1
III	Talud de pendiente media	2
IV	Talud de pendiente alta	3
V	Talud de pendiente muy grande	4

- **Cobertura vegetal:** Se valora a partir del grado de recubrimiento vegetal del talud. Si el talud o ladera está totalmente cubierto por cobertura vegetal se le asigna una puntuación mínima y si no existe ningún tipo de cobertura, la puntuación que se le asigna es la máxima (Suárez, 1998).

Tabla 3.12 Valor asignado al parámetro cobertura vegetal.

Fuente: (Ambalagan, 1992). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018).

Categoría	Condiciones existentes	Puntuación
I	El talud o ladera está totalmente cubierto por una adecuada cobertura vegetal	0

II	El talud o ladera está en gran medida cubierto por una adecuada cobertura vegetal	0.5
III	El talud o ladera está solo parcialmente cubierto por una adecuada cobertura vegetal	1.5
IV	Existe poca cobertura vegetal	2.5
V	No existe ninguna cobertura vegetal, el talud está totalmente denudado.	3.0

- **Acción sísmica:** mientras mayor sea la aceleración sísmica, mayor será el valor que tome el parámetro.

Tabla 3.13 Valor asignado al parámetro sismicidad.

Fuente: (Blanco, 2015). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018).

Grado	Condiciones existentes	Puntuación
I	Prácticamente no existe sismicidad	0
II	Muy baja acción sísmica $a_s = (0.02 \text{ a } 0.05) g$	1
III	Baja sismicidad $a_s = (0.05 \text{ a } 0.10) g$	2
IV	Media sismicidad $a_s = (0.10 \text{ a } 0.14) g$	2.5
V	Alta sismicidad $a_s = (0.14 \text{ a } 0.18) g$	3.5
VI	Muy alta sismicidad $a_s > 0.18 g$	4

Después de obtener los valores para cada una de las categorías mencionadas anteriormente, se sumaron las puntuaciones para obtener la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento. En la Tabla 3.14 se observan las categorías según el grado de susceptibilidad.

Tabla 3.14 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento para suelos.

Fuente: (Blanco, 2015). Modificado por (Sánchez & Sánchez, 2018).

Categoría de susceptibilidad	Grado de susceptibilidad	Observaciones
I	Susceptibilidad muy baja $SD < 5.0$	Condiciones estables.
II	Susceptibilidad baja SD entre 5 y 8	Condiciones estables. Debe existir monitoreo.
III	Mediana susceptibilidad SD entre 8 y 12	Condiciones preponderadamente estables. Debe haber un monitoreo sistemático.
IV	Alta susceptibilidad SD entre 12 y 16	Condiciones potencialmente inestables.
V	Muy alta susceptibilidad $SD > 16$	Condiciones inestables.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Identificación de estructuras y levantamiento de túneles existentes

Durante las salidas primeras salidas de campo realizadas en la zona de estudio, se identificaron las principales estructuras geológicas, determinando un plano de hundimiento como estructura principal con medidas estructurales de $N203^{\circ}/73^{\circ}SE$ (véase Figura 4.1).

Además, se realizó el levantamiento de túneles próximos a la zona de estudio, encontrando un túnel al SW del área, con dirección $N120^{\circ}$, aproximadamente 24 metros de profundidad, 1,60 metros de altura y 0.80 metros de ancho (véase Figura 4.1).



4.2 SEV's

En base a los 5 SEV's realizados en la zona de estudio aplicando geofísica, se pudieron construir las siguientes columnas estratigráficas que representan el perfil del suelo:

4.2.1 SEV-01-ZC

La Tabla 4.1 presenta la interpretación tentativa de las capas geoelectricas según las resistividades del terreno a diferentes profundidades, alcanzando una profundidad máxima de 32.8 metros, a partir de los datos obtenidos en campo. La primera capa tiene una resistividad de 147 Ω m, según la Figura 3.12 corresponde a saprolito ligeramente saturado, lo que concuerda con lo observado en campo. En la segunda capa, la resistividad baja a un valor de 53.3 Ω m, interpretándose como un material más consistente que no permitió el paso del pulso eléctrico con facilidad, según la Figura 3.12 este valor de resistividad corresponde a saprolito saturado que se presenta a una profundidad de 0.50 m. La tercera capa registró un aumento en el valor de resistividad a 255 Ω m y profundidad de 7.57 m, lo cual corresponde a saprolito fracturado. A una profundidad de 18.20 m, se encuentra una capa con una alta resistividad de 578 Ω m, correspondiente a un material diferente, según la Figura 3.12 a saprolito. La columna geoelectrica resultante se puede revisar en la Figura 4.2.

Tabla 4.1 Capas de resistividades SEV-01-ZC, obtenidas en el software IPI2win.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	0.50	0.50	147.00	Saprolito ligeramente saturado
2	7.07	7.57	53.30	Saprolito saturado
3	10.60	18.20	255.00	Saprolito con fracturas
4	14.60	32.80	578.00	Saprolito
5			318.00	Saprolito con fracturas

4.2.2 SEV-02-ZC

En la Tabla 4.2 se presenta la interpretación tentativa de las capas geoelectricas según las resistividades del terreno a diferentes profundidades, alcanzando una profundidad máxima de 32.3 metros, a partir de los datos obtenidos en campo. La primera capa corresponde a la capa superficial, interpretándose como suelo. La segunda capa presentó un valor alto de resistividad de 740 Ω m a una profundidad de 0.50 m,

interpretándose como saprolito. En la tercera capa el valor de la resistividad bajo a 446 Ωm y una profundidad de 4.15 m, dando como resultado la presencia de saprolito con fracturas. A 13.60 m de profundidad se registró un valor bajo de resistividad de 151 Ωm , que corresponde a saprolito ligeramente saturado (véase Figura 4.2).

Tabla 4.2 Capas de resistividades SEV-01-ZC, obtenidas en el software IPI2win.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	0.50	0.50	1431.00	Suelo
2	3.65	4.15	740.00	Saprolito consistente
3	9.41	13.60	446.00	Saprolito con fracturas
4	18.7	32.30	151.00	Saprolito ligeramente saturado
5			628.00	Posiblemente roca fracturada (regolito)

4.2.3 SEV-03-ZC

En la Tabla 4.3 se presenta la interpretación tentativa de las capas geoelectricas según las resistividades del terreno a diferentes profundidades, alcanzando una profundidad máxima de 22.8 metros, a partir de los datos obtenidos en campo. La primera capa con una resistividad de 364 Ωm , según la Figura 3.12 corresponde a saprolito con fracturas. La segunda capa baja su valor de resistividad a 121 Ωm y una profundidad de 0.55 m, lo cual representa la presencia de saprolito ligeramente saturado. Debajo de la capa anterior, se detectó una elevada resistividad de valor 535 Ωm a 6.51 m de profundidad, en base a la Figura 3.12, este valor de resistividad corresponde a saprolito con fracturas. Por último, a 11.20 m de profundidad, se encontró la cuarta capa, con un valor bajo de resistividad de 24 Ωm , correspondiente a saprolito muy saturado (véase Figura 4.2).

Tabla 4.3 Capas de resistividades SEV-03-ZC, obtenidas en el software IPI2win.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	0.55	0.55	364.00	Saprolito con fracturas
2	5.96	6.51	121.00	Saprolito ligeramente saturado
3	4.74	11.20	535.00	Saprolito con fracturas
4	11.60	22.80	24.00	Saprolito muy saturado
			218.00	Saprolito con fracturas

4.2.4 SEV-04-ZC

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra que la profundidad máxima alcanzada en el SEV-04-ZC fue de 20.50 m. La primera capa presentó una resistividad de 18.90 Ωm , la cual corresponde a saprolito muy saturado. La segunda capa registró una resistividad de 47.90 Ωm a 0.50 m de profundidad, correspondiente según la Figura 3.12, a saprolito saturado. A 1.06 metros de profundidad se encontró una capa con resistividad de 97.30 Ωm , valor que pertenece a saprolito ligeramente saturado. En la Figura 4.2 se presenta la columna geoelectrica resultante.

Tabla 4.4 Capas de resistividades SEV-04-ZC, obtenidas en el software IPI2win.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	0.50	0.50	18.90	Saprolito muy saturado
2	0.56	1.06	47.90	Saprolito saturado
3	19.50	20.50	97.30	Saprolito ligeramente saturado
4			121.00	Saprolito ligeramente saturado

4.2.5 SEV-05-ZC

En la Tabla 4.5 se muestran los datos obtenidos del SEV-05-ZC, alcanzando una profundidad máxima de 24.50 m. La primera capa presentó una resistividad de 58.70 Ωm , valor perteneciente a saprolito saturado. La segunda capa registró un valor de 105.00 Ωm a 1.13 metros de profundidad, correspondiente a saprolito ligeramente saturado. Debajo se determinó la presencia de una capa de saprolito muy saturado, con resistividad de 9.23 Ωm a 1.72 metros de profundidad. Por último, a 3.09 metros de profundidad, se encontró una capa de saprolito con fracturas, registrando un valor de resistividad de 326 Ωm (véase Figura 4.2).

Tabla 4.5 Capas de resistividades SEV-05-ZC, obtenidas en el software IPI2win.

N	Espesor (m)	Profundidad (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	1.13	1.13	58.70	Saprolito saturado
2	0.59	1.72	105.00	Saprolito ligeramente saturado
3	1.36	3.09	9.23	Saprolito muy saturado
4	21.40	24.50	326.00	Saprolito con fracturas
5			299.00	Saprolito con fracturas

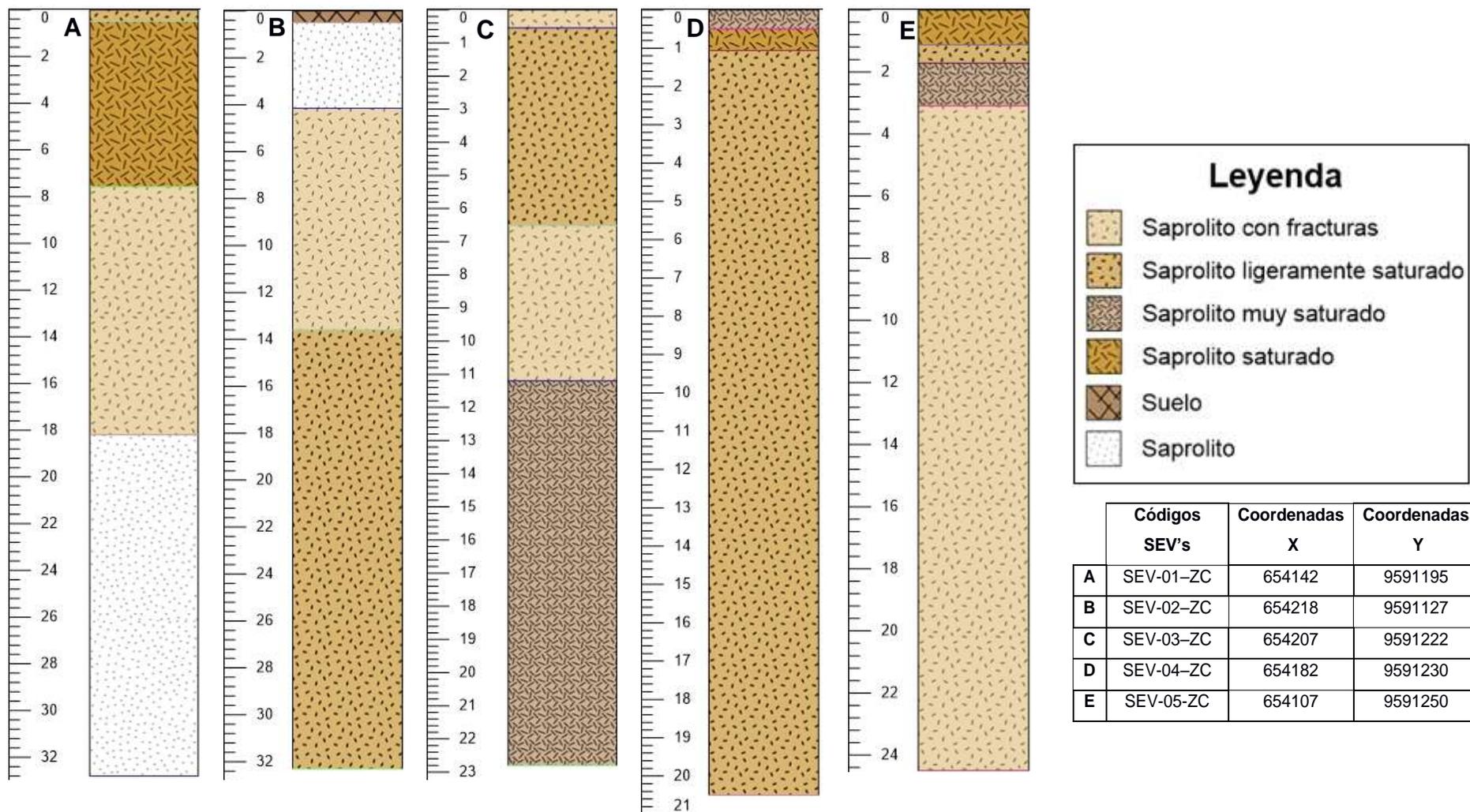


Figura 4.2 Columnas litológicas a partir de los resultados de SEV's.

4.3 TGE's

4.3.1 Tomografía Geoeléctrica 1

Perfil al S de la zona de estudio, longitud de 200 m y profundidad de aproximadamente 22 m. Las rocas sanas con resistividades de 200 Ω m a 800 Ω m (véase Figura 4.3), en el inicio de la tomografía, este tipo de roca se profundiza conforme avanza el perfil. En la parte central del perfil, la resistividad varía de 25 Ω m a 200 Ω m. Además, se presentan sectores con resistividades muy bajas (7 Ω m) entre 1118m a 1113m de profundidad.

4.3.2 Tomografía Geoeléctrica 2

Perfil realizado al NW del área de estudio, longitud de 200 m, espaciado interelectrónico Wenner de 5 m y profundidad de aproximadamente 35 m. En la Figura 4.4 se observan resistividades entre 200 Ω m a 800 Ω m correspondientes a rocas sanas. Al final del perfil de la tomografía, se observó material con resistividades muy bajas, desde los 1118m a 1105m de profundidad.

4.3.3 Tomografía Geoeléctrica 3

Perfil realizado al NE del área de estudio, longitud de 200 m, espaciado interelectrónico Wenner de 5 m y profundidad de aproximadamente 12.4 m. En la Figura 4.5 se observan mayoritariamente resistividades entre 80 Ω m a 200 Ω m correspondientes a rocas ligeramente saturadas. A inicios del perfil, se registraron resistividades entre 14 Ω m a 25 Ω m identificadas como roca muy saturada. En la cota de 1118 m de profundidad, la resistividad varía entre 550 Ω m a 850 Ω m correspondiente a roca sana.

4.3.4 Tomografía Geoeléctrica 4

Perfil realizado al SE del área de estudio, longitud de 95 m, espaciado interelectrónico Wenner de 5 m y profundidad de aproximadamente 13.4 m. En la parte final del perfil, se registraron resistividades mayores a 550 Ω m (véase Figura 4.6) pertenecientes a roca sana, mientras que, al inicio de perfil la mayoría de la resistividad presente varía de 200 Ω m a 550 Ω m, representando roca con fracturas. En la cota de 1108m de profundidad, la resistividad baja a valores entre 102 Ω m a 200 Ω m, correspondiente a roca ligeramente saturada.

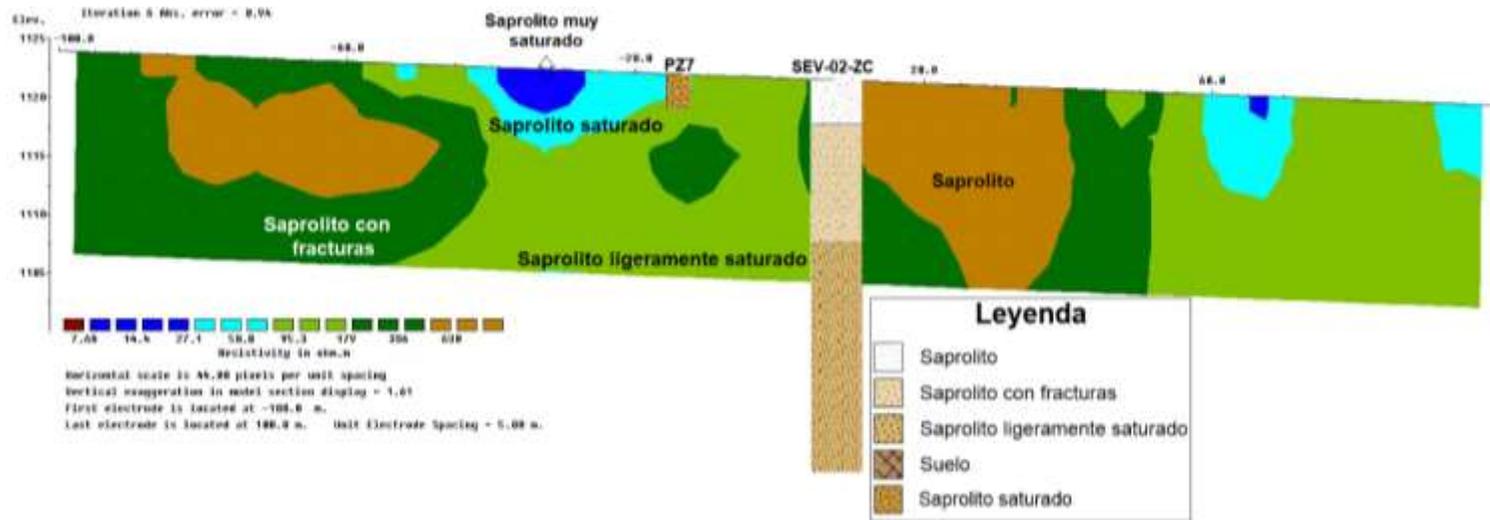


Figura 4.3 Correlación de tomografía (TGE-01-ZC), sondeo (SEV-02-ZC) y perforación PZ7 de la zona de estudio.

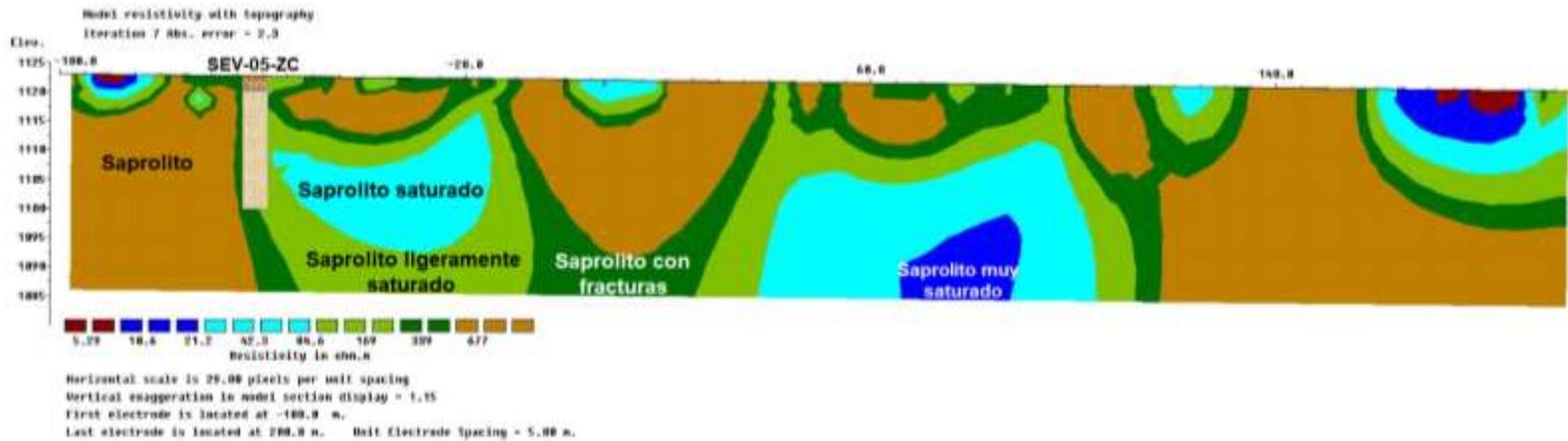


Figura 4.4 Correlación de tomografía (TGE-02-ZC) y sondeo (SEV-05-ZC) de la zona de estudio.

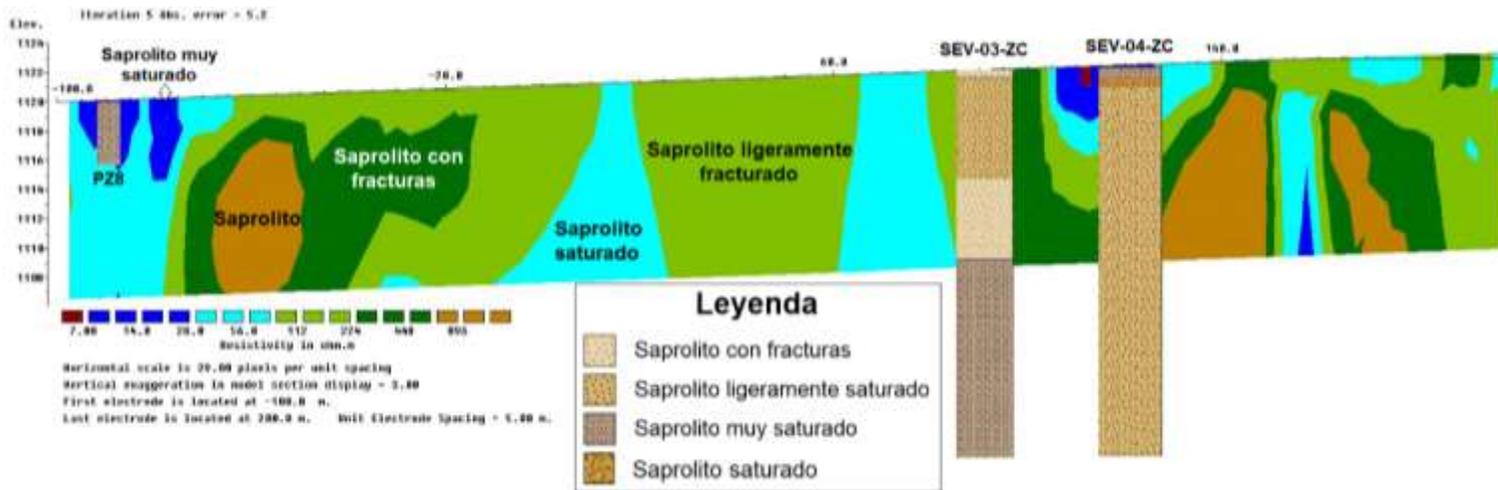


Figura 4.5 Correlación de tomografía (TGE-03-ZC), sondeo (SEV-03-ZC), (SEV-04-ZC) y perforación PZ8 de la zona de estudio.

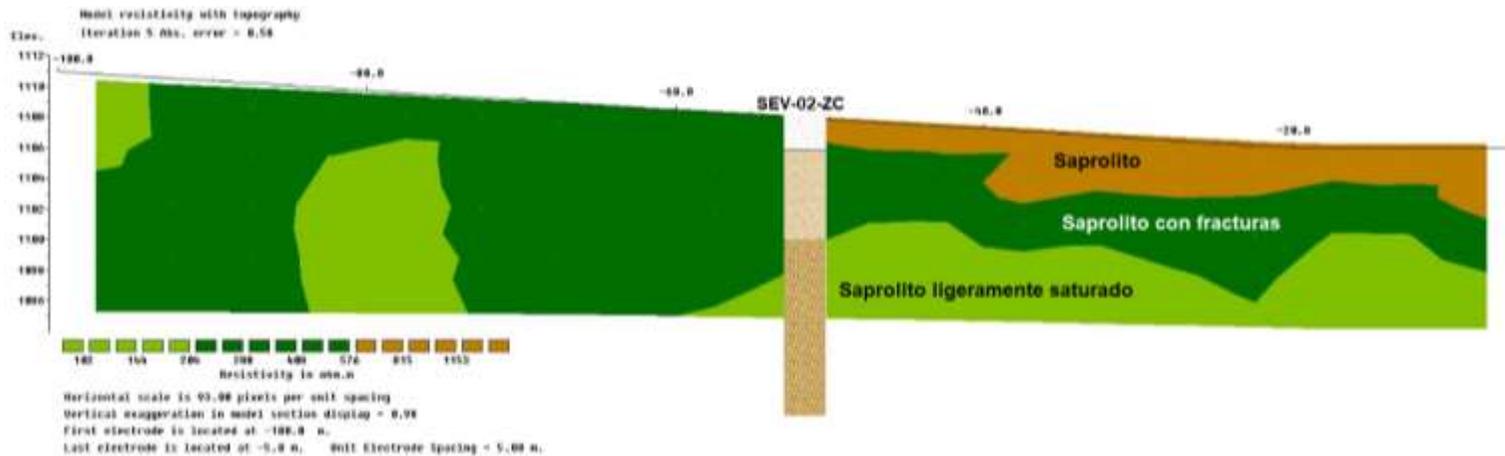


Figura 4.6 Correlación de tomografía (TGE-04-ZC) y sondeo (SEV-02-ZC) de la zona de estudio.

4.4 Resultado de las perforaciones

Tabla 4.6 Registro geológico-geotécnico de la perforación PZ7.

Perforación PZ7					
Coordenadas X	654189	Coordenadas Y	9591145	Cota (m)	1130
Profundidad (m)	Descripción General		Grado de Meteorización	Simbología	Registro Fotográfico
0 – 1.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito marrón anaranjado. Granulometría fina. Saturado. 		Completamente Meteorizado		
1.0 – 3.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito marrón anaranjado. Granulometría fina. Poco compacto. 		Completamente Meteorizada		
3.0 – 4.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito de color rojizo anaranjado. Granulometría fina-media. Poco compacto. Fracturas oxidadas de separación centimétrica y relleno decimétrico. 		Completamente Meteorizada		
4.0 – 7.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito de color rojizo anaranjado. Granulometría media-gruesa. Poco compacto. Fracturas oxidadas de separación centimétrica y relleno milimétrico. 		Completamente Meteorizada		
7.0 – 10.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito de color marrón amarillento. Granulometría media-gruesa. Fracturas oxidadas de separación centimétrica y relleno milimétrico. 		Completamente Meteorizado		

Tabla 4.7 Registro geológico-geotécnico de la perforación PZ8.

Perforación PZ8					
Coordenadas X	654178	Coordenadas Y	9591183	Profundidad Total	15m
Profundidad (m)	Descripción General		Grado de Meteorización	Simbología	Registro Fotográfico
0 – 1.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito marrón anaranjado. Granulometría fina. Muy saturado. 		Completamente Meteorizada		
1.0 – 3.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito rojizo Granulometría fina. Poco compacto. Poco saturado Fracturas oxidadas rellenas, de espaciamiento y espesores centimétricos. 		Completamente Meteorizada		
3.0 – 4.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito marrón anaranjado. Granulometría fina-media. Saturado. 		Completamente Meteorizada		
4.0 – 7.0	<ul style="list-style-type: none"> Saprolito marrón rojizo. Granulometría media-gruesa. Poco compacta. Poco saturado. 		Completamente Meteorizada		

7.0 – 11.0	<ul style="list-style-type: none"> • Saprolito marrón amarillento. • Ligeramente saturado. • Granulometría media-gruesa. • Clastos centimétricos. • Poco compacto. 	Completamente Meteorizada		
11.0 – 15.0	<ul style="list-style-type: none"> • Saprolito rojizo. • Granulometría media a gruesa. • Fracturas oxidadas, de separación y relleno centimétricos. 	Completamente Meteorizada		

4.5 Correlación entre tomografías con perforaciones

En base a las TGE's y los SEV's se pudieron realizar 2 perforaciones en las zonas que registraron interés con respecto a los valores bajos de resistividades (véase Tabla 4.6 y Tabla 4.7). Entre la TGE-01-ZC y la perforación PZ7 (véase Figura 4.3), se pudo confirmar la presencia de saprolito saturado correspondiente al color celeste en la tomografía. Mientras que entre la TGE-03-ZC y la perforación PZ8 (véase Figura 4.5) se pudo evidenciar la presencia de saprolito muy saturado, correspondiente al color azul al inicio del perfil de la tomografía. Lo cual comprueba que estos valores corresponden a un material con presencia de agua, más no a la presencia de huecos en el subsuelo.

El perfil geológico (véase Figura 4.7) fue elaborado por CIPAT-ESPOL en base a la información obtenida de las perforaciones de la SGR. Para lo cual, se extrapolaron los contactos de saprolito cuya coloración varía entre marrón a rojizo, con alta saturación y espesor entre 20 – 25m. Debajo de este material, se encuentra la roca volcanoclástica de 8 a 15m de espesor, con componentes andesíticos de tonalidades grises, presenta sulfuros y vetillas de sílice. El material volcanoclástico sobreyace a la roca andesita, envuelta en una matriz afanítica de tonalidad gris, presencia de sulfuros diseminados,

cuyo espesor aproximado es de 30 a 40m. Además, en el perfil geológico se muestra el plano de hundimiento, en la entrada principal del hospital, en el que se pudo constatar que existe un asentamiento. Debido a las profundidades de las perforaciones realizadas por CIPAT-ESPOL, sólo se pudo comprobar la presencia de diferentes tipos de saprolito a poca profundidad. Correlacionando todos los resultados obtenidos, tanto la prospección geofísica como las perforaciones, se pudo interpretar y establecer las siguientes capas (véase Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Interpretación de la litología en el subsuelo en base a los sondeos y tomografías.

Resistividad (Ωm)	Profundidad capas (m)	Interpretación
1-7	1	Suelo
7-25	1-11	Saprolito muy saturado
25-80	1-7	Saprolito saturado
80-200	1-21	Saprolito ligeramente saturado
200-550	9-20	Saprolito con fracturas
550-850	11-20	Saprolito

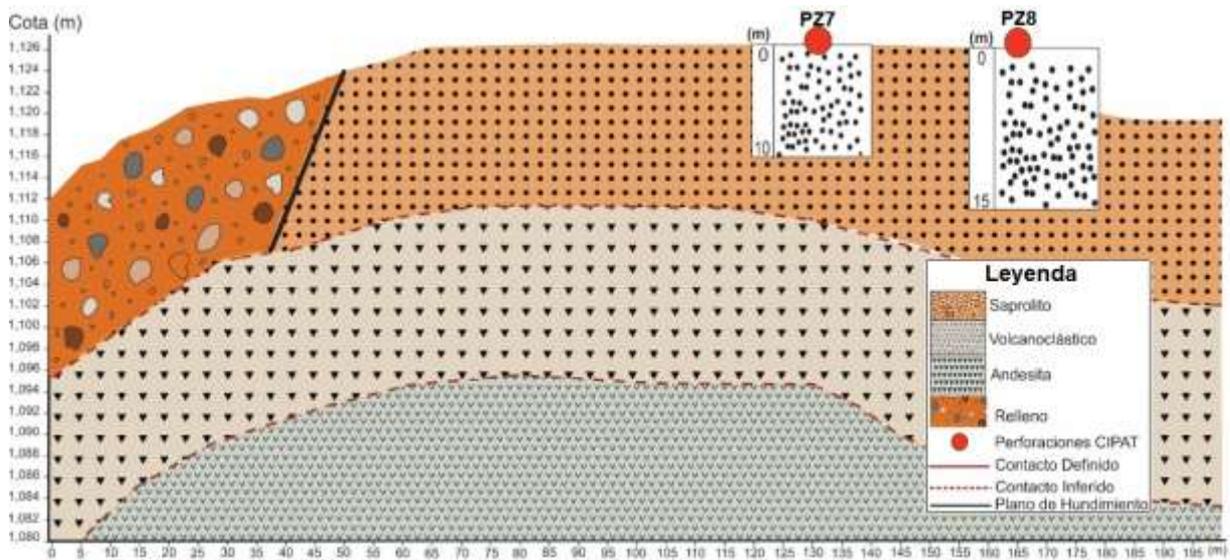


Figura 4.7 Correlación del perfil geológico con las perforaciones PZ7 y PZ8.

Fuente: CIPAT-ESPOL

4.6 Caracterización de calicatas

Se realizaron tres calicatas en las fracturas del piso del hospital Humberto Molina, las cuales permitieron caracterizar el tipo de litología debajo de la construcción y los espesores de hormigón y relleno empleados.

A continuación, se detalla los datos tomados para cada una de ellas (véase Tabla 4.9 a Tabla 4.11):

Tabla 4.9 Caracterización Calicata #1.

Calicata #1			
Ubicación	Hospital Humberto Molina (Sala Gineco-Obstetricia)		
 <p>Figura 4.8 Muestra obtenida de la calicata # 1.</p>	Profundidad (cm)	43	
	Espesor Hormigón (cm)	14	
	Espesor de Relleno (cm)	19	
	Descripción General: Saprolito de color naranja, plástico, presenta ligera compactación y granulometría fina a media. Ligeramente húmedo.		

Tabla 4.10. Caracterización Calicata #2.

Calicata #2			
Ubicación	Hospital Humberto Molina (Sala de Pediatría)		
 <p>Figura 4.9 Muestra obtenida de la calicata # 2.</p>	Profundidad (cm)	44.2	
	Espesor Hormigón (cm)	7	
	Espesor de Relleno (cm)	29	
	Descripción General: Saprolito de color rojizo, ligeramente plástico, poco compactado y granulometría media.		

Tabla 4.11. Caracterización Calicata #3.

Calicata #3	
Ubicación	Hospital Humberto Molina (Sala Gineco-Obstetricia)
	Profundidad (cm)
	Espesor Hormigón (cm)
	Espesor de Relleno (cm)
Descripción General: Sapolito de color naranja-rojizo, plástico, presenta ligera compactación y granulometría fina a media. Ligeramente húmedo.	

Figura 4.10 Muestra obtenida de la calicata # 3.

Con las caracterizaciones de las calicatas, se procedió a realizar la correlación entre los perfiles para el análisis de espesores, como se muestra en la Figura 4.11. Donde, el espesor de hormigón varía entre 6.5 y 14cm, el relleno de 19 a 29cm de espesor, e inmediatamente después se presenta saprolito completamente degradado, lo cual concuerda con la litología encontrada en las perforaciones realizadas por CIPAT-ESPOL.

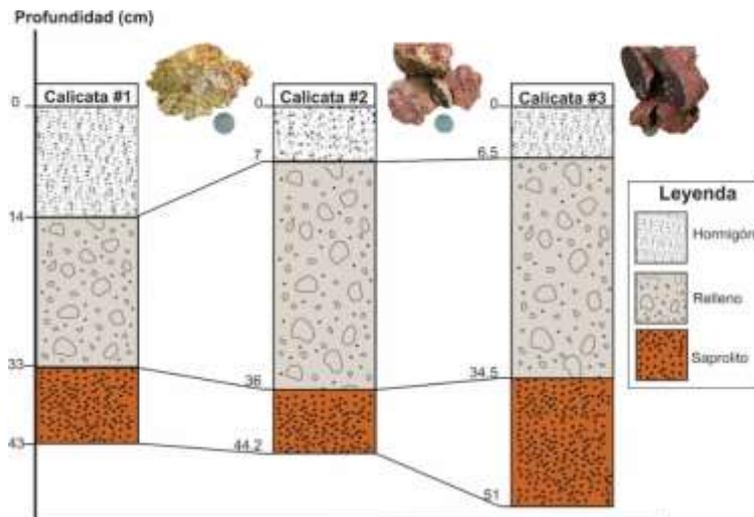


Figura 4.11 Correlación entre los perfiles de calicatas en zona de estudio.

4.7 Estabilidad del talud

En la Figura 4.12 se presentan los 7 perfiles seleccionados para el cálculo del factor de seguridad en la zona de estudio. Estos se eligieron teniendo en cuenta la pendiente del terreno.

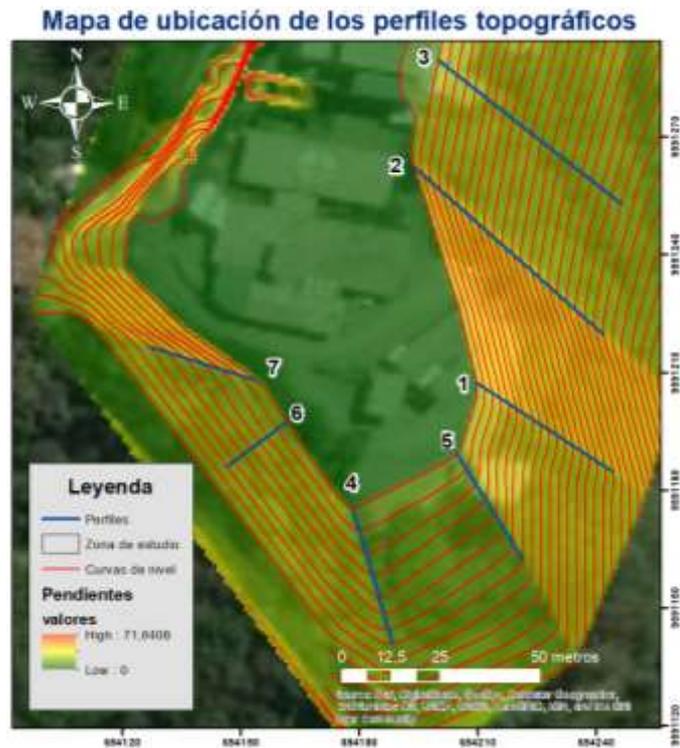


Figura 4.12 Mapa de ubicación de los perfiles seleccionados para el cálculo del factor de seguridad.

En la Figura 4.13 se muestran los resultados de los factores de seguridad correspondientes a los 7 perfiles realizados. El perfil 1, presenta el valor más bajo de factor de seguridad (1.135) teniendo en cuenta la aceleración sísmica de la ciudad de Zaruma establecido por la NEC. Mientras el perfil topográfico 4 representa un valor cercano a 2. Todos los valores calculados, al ser mayores a 1 son considerados estables por la NEC. Pero si se toma en cuenta que es un hospital, el cual debe estar habilitado las 24 horas del día, en cualquier situación y que puede generar pérdidas humanas, este factor puede considerarse inestable para algunos autores. El coeficiente de importancia de la NEC para diseño, establece un valor mayor a 1.5 para este tipo de edificaciones, y para (Suárez Díaz, 2009) si se consideran las pérdidas humanas el factor de seguridad de diseño debe ser mayor a 1.7. Con lo mencionado anteriormente, se deben realizar mapas de susceptibilidad a deslizamientos para conocer las recomendaciones de la propuesta de prediseño, con la finalidad de prevenir cualquier caso de movimientos de masas, aunque estos sean pequeños, se generen superficialmente, lejos de las edificaciones y en condiciones extremas.

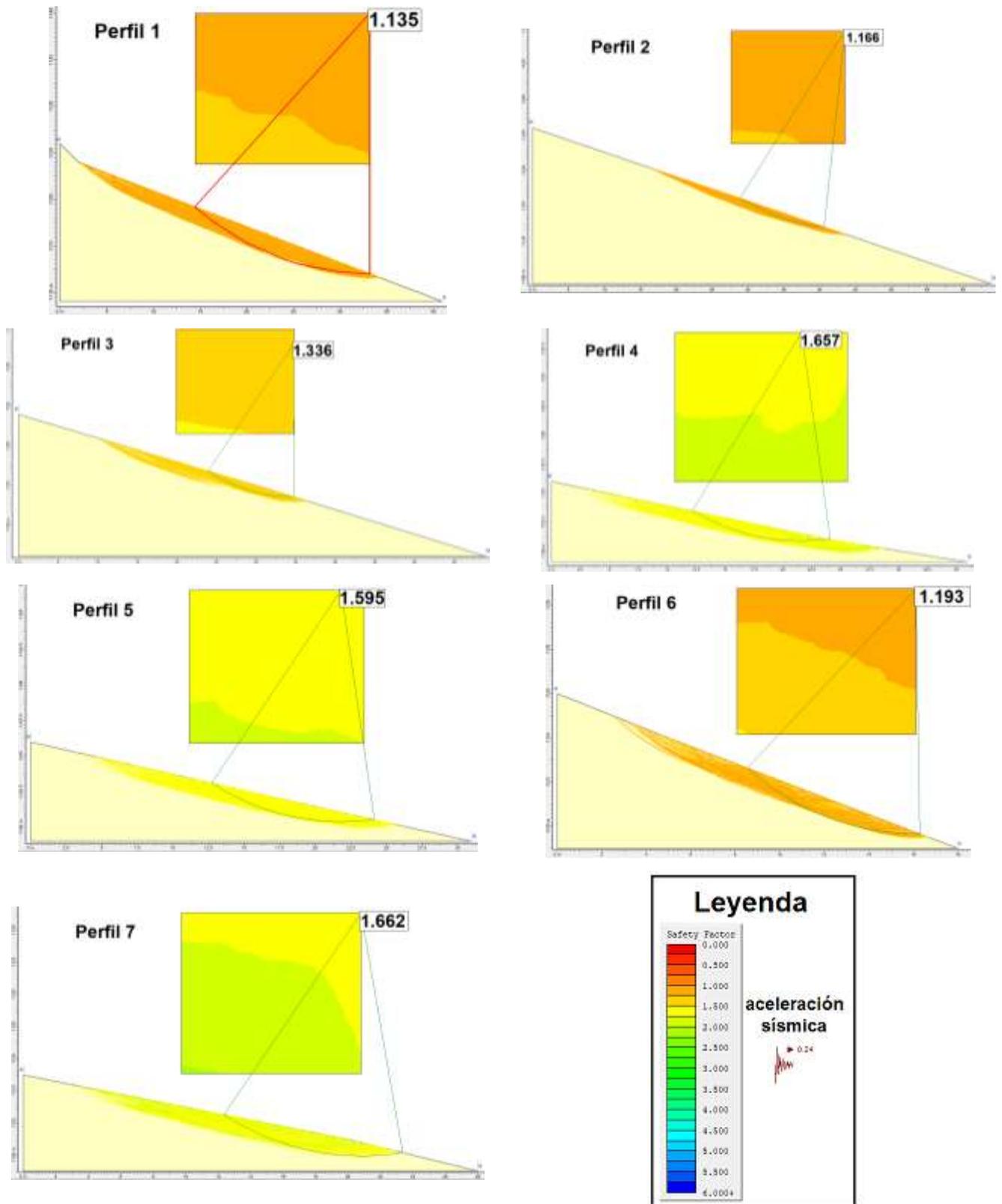


Figura 4.13 Factores de seguridad calculados en el software Slide, método de Spencer y aceleración sísmica.

4.8 Susceptibilidad al deslizamiento

4.8.1 Estaciones geomecánicas

Se tomaron diferentes parámetros (establecidos en la metodología) de las 16 estaciones geomecánicas establecidas en la zona de estudio. En la Tabla 4.12 se muestran los resultados a partir de la valoración de campo, correspondiente a la estación 1, mientras en el Apéndice D: Estaciones Geomecánicas se pueden observar las demás estaciones.

Tabla 4.12 Parámetros principales y puntuación asignada en la Estación 1.

Estación N° 1			
Coordenadas	X	654198 m E	
	Y	9591080 m N	
	cota	1100 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo compacto y gran dureza	Característica (calidad) del suelo	0	<ul style="list-style-type: none"> Afloramiento a un lado del sendero. Espesor de 2.40 metros. Suelo formado por material saprolítico y de color rojizo. Valor estructural N256° (plano de fractura). Pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 26°. 
Valor estructural en dirección de la pendiente	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de un valor medio	Morfometría	2	
El suelo no tiene erosión	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	0	
Superficie del suelo húmeda	Presencia de agua	0.5	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	7	

Figura 4.14 Estación geomecánica #1, gran cobertura vegetal, suelo saprolito.

4.8.2 Resultado de la susceptibilidad al deslizamiento en el terreno

En base a la valorización de los parámetros tomados en campo, se pudo determinar finalmente el grado de susceptibilidad de cada estación (véase Tabla 4.13).

Tabla 4.13 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento de las estaciones para suelos.

Estación	Grado de susceptibilidad	Observaciones
1	7	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
2	9.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
3	11.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
4	10.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
5	8	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
6	7.5	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
7	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
8	10.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
9	8	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
10	7.5	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
11	11.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
12	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
13	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
14	6.5	Condiciones estables, debe existir monitoreo.
15	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
16	7.5	Condiciones estables, debe existir monitoreo.

Realizando el análisis de la susceptibilidad al deslizamiento, en base a los parámetros registrados de las estaciones geomecánicas en condiciones actuales, se obtuvo como resultado 3 categorías (véase Figura 4.15). En la II categoría se encuentran las estaciones: 1, 5, 6, 9, 10, 16 y 14, representada por el color celeste, correspondiente a una susceptibilidad al deslizamiento entre 8 y 5, en donde la zona analizada se encuentra en condiciones estables, pero debe existir monitoreo. En la categoría III se encuentran las estaciones: 2, 3, 4, 7, 8, 11, 12 y 13, representada por el color amarillo, corresponden a un grado de susceptibilidad entre 8 y 12, la zona estudiada presenta condiciones preponderadamente estables, en donde debe haber un monitoreo sistemático. En la categoría IV representada por color rojo, en donde solo se encuentra la estación 5, se interpreta como una zona que presenta condiciones inestables.

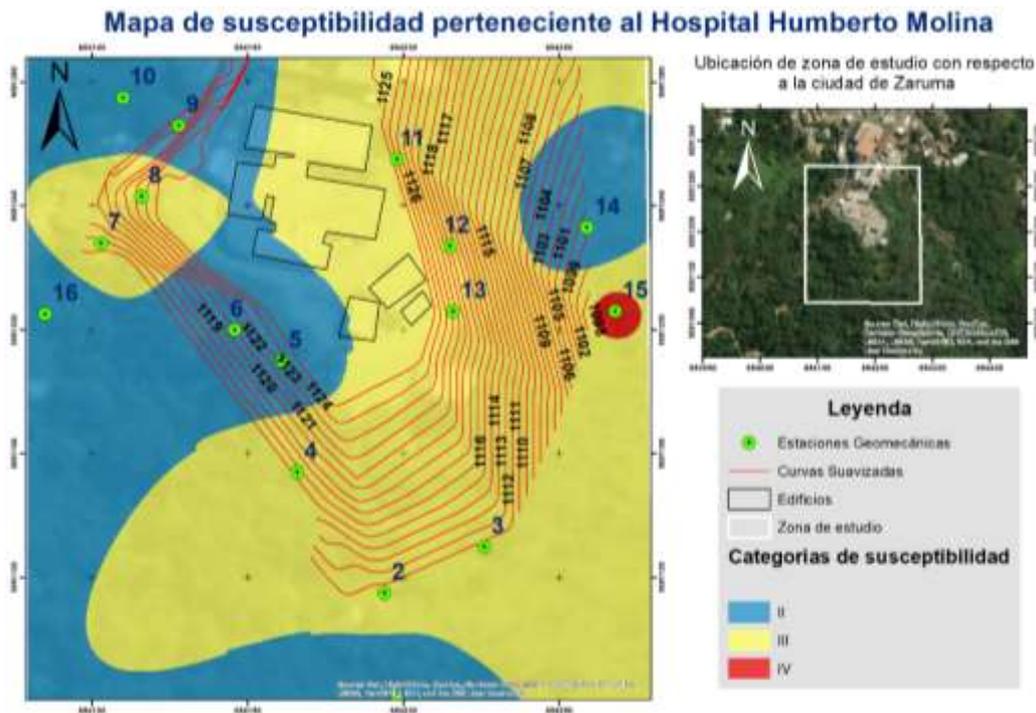


Figura 4.15 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento del Hospital Humberto Molina.

4.8.3 Análisis para el caso de que la saturación de agua sea máxima

Se realizó la zonificación del mismo sector analizado en condiciones actuales, pero partiendo de una situación extrema. Se consideró el talud lleno de agua, por lo que el parámetro presencia de agua se le asignó el valor de 4 en todas las estaciones, cambiando así el valor final del S.D. en cada caso (véase Tabla 4.14).

Tabla 4.14 Clasificación de la susceptibilidad al deslizamiento con un parámetro de saturación de agua al máximo.

Estación	Grado de susceptibilidad	Observaciones
1	9.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
2	12	Condiciones potencialmente inestables.
3	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
4	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
5	10.5	Condiciones preponderadamente estables. Debe haber un monitoreo sistemático.
6	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
7	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
8	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
9	10.5	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.

10	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
11	14	Condiciones potencialmente inestables.
12	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
13	12.5	Condiciones potencialmente inestables.
14	9	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.
15	15	Condiciones potencialmente inestables.
16	10	Condiciones preponderadamente estables, debe haber un monitoreo sistemático.

En base a la condición extrema de la presencia de agua, se obtuvo un cambio en la categoría de la susceptibilidad, obteniendo 2 categorías (véase Figura 4.16). La categoría III representada por el color amarillo en donde las estaciones: 1, 2, 5, 6, 9, 10, 14 y 16, se encuentran en una zona de condiciones preponderadamente estables, en dónde debe haber un monitoreo sistemático. Y la categoría IV, representada por el color rojo, se encuentran las estaciones: 3, 4, 7, 8, 11, 12, 13 y 15, en condiciones potencialmente inestables, dónde deben plantearse soluciones para la estabilidad.

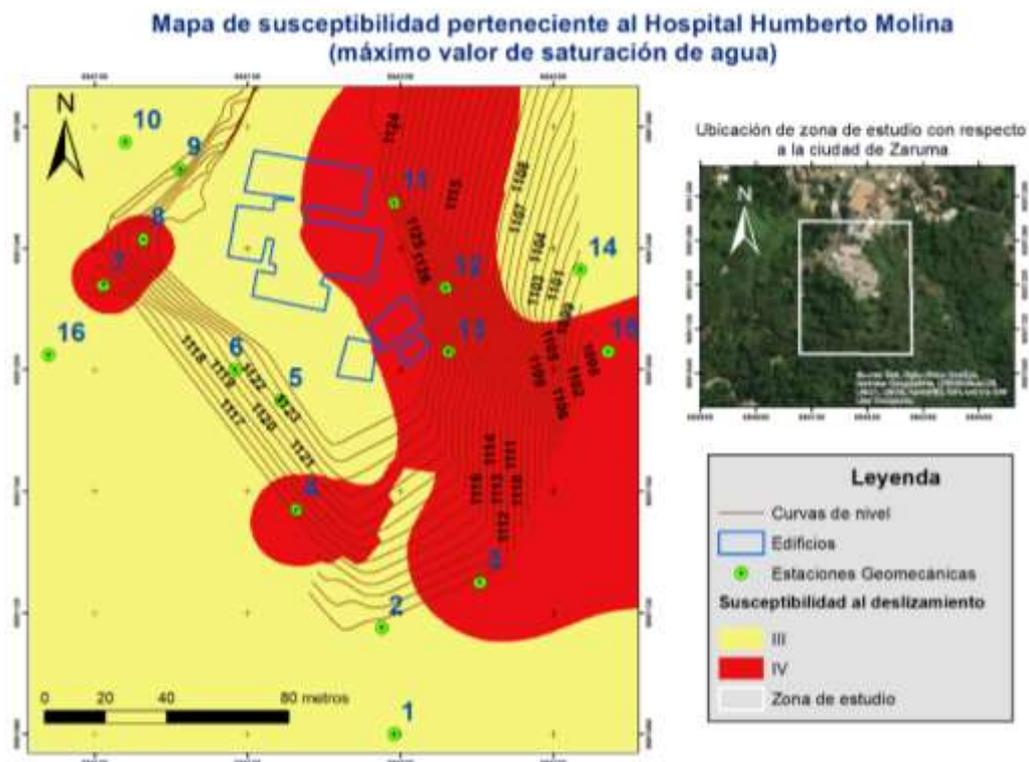


Figura 4.16 Mapa de susceptibilidad al deslizamiento del Hospital Humberto Molina tomando en cuenta el máximo valor de saturación de agua.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En la fase de levantamiento de campo, fue posible encontrar un túnel de aproximadamente 25m de profundidad con dirección N120°, determinando su litología como saprolito fracturado con familias de discontinuidades, separaciones decimétricas y rellenos centimétricos. Además, mediante observaciones en campo, se determinó un plano de hundimiento con dirección N203°/73°SE en la entrada del Hospital que delimita la zona de relleno del saprolito, evidenciándose asentamientos en las estructuras.

A partir de las campañas de sondeos eléctricos verticales, tomografías eléctricas, perforaciones y calicatas, se determinó la potencia de las estructuras geológicas del subsuelo, reconociendo y distinguiendo las diferentes capas correspondientes a saprolito completamente meteorizado, de tonalidades que varían de marrón claro a rojizo, granulometría fina a gruesa y presencia de fracturas subverticales con separaciones centimétricas.

Con ayuda de la correlación entre las perforaciones de la SGR y las realizadas por CIPAT-ESPOL, se ha interpretado que la capa de saprolito sobreyace a rocas volcanoclásticas de espesores entre 15 y 20 m, éstas a su vez se encuentran sobreyaciendo a las rocas volcánicas, principalmente andesitas de espesores entre 20 y 30m. Sin embargo, es importante que se realicen perforaciones más profundas para corroborar esta información. Se realizaron varios perfiles en la zona de estudio, determinando factores de seguridad desde 1.135 hasta 1.657, los cuales son considerados estables. Estos valores en conjunto con la prospección geofísica, perforaciones y calicatas, permiten comprobar que el terreno no presenta huecos de origen minero ilegal en el subsuelo.

El área de estudio se caracteriza por ser una terraza rodeada por laderas de bajas a fuertes pendientes (de 10° a mayores de 45°), la vegetación abundante en todas las laderas funciona como un buen sostenimiento para posibles deslizamientos. En base a los parámetros evaluados en campo para el análisis de susceptibilidad, se determinaron las siguientes características: según (Ambalagan, 1992; Blanco, 2015; Sánchez & Sánchez, 2018), el suelo estudiado se lo categorizó de calidad muy bueno a medio, y en un sector en específico (estación 15) se lo categorizó un poco inestable. En general el suelo es plástico, con una buena consolidación y en otros sectores suele ser degradable pero también con buena compactación. Se estima que la filtración del agua es buena, ya que solo se pudo determinar suelos húmedos superficialmente.

Las investigaciones realizadas señalan que, toda el área en la que se asientan las edificaciones es estable. La existencia de grietas en paredes y pisos se debe al pobre relleno, ya que estos materiales sin compactar se hundieron dejando sin apoyo a las baldosas.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar perforaciones de profundidades superiores a los 25m, para verificar la litología interpretada y de ser posible llegar a la roca inalterada para su completa caracterización.
- Monitorear la vegetación natural en el terreno, ya que este factor actúa como agente estabilizador. No acumular desechos que pueden funcionar como peso en aquellos sectores más susceptibles a deslizamientos.
- Realizar un análisis profundo de las estructuras, ya que esta edificación tiene más de 70 años y cuando fue construida no se tomaron en cuenta todos los estudios que existen ahora. Además, se han construido nuevos pisos que no constaban en el diseño original del Hospital.
- Debido a la vulnerabilidad del terreno y lo propenso que puede ser en el caso de acumulación de agua, se recomienda la instalación de un canal de drenaje (véase Apéndice D: Propuesta de pre-diseño) y realizar un control en el estado de las tuberías.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambalagan, R. (1992). Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides*, 861–871. Christchurch.
- Aracil, E., Porres, J., Espinosa, A., Maruri, U., Vallés, J., García, L., & Ibáñez, S. (2005, June). APLICACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN DESLIZAMIENTO DE LADERA EN UN VERTEDERO ARACIL. *VI Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables*, 8.
- Aspden, J., Bonilla, W., & Duque, P. (1995). The El Oro metamorphic complex, Ecuador: Geology and economic mineral deposits. *Overseas Geology and Mineral Resources*, 63.
- Ayuso, M. (2016). La ciudad que va a ser trasladada íntegra tres kilómetros al este: así lo harán. Retrieved November 7, 2019, from El Confidencial website: https://www.elconfidencial.com/alma-corazon-vida/2016-05-28/kiruna-suecia-urbanismo-subsidencia_1205591/
- Banda, R., Vikent'ev, V., & Nosik, L. (2005). *Sulfur isotopic composition of the Vizcaya and Nikol veins, Portovelo Zaruma deposit, Ecuador* (No. 9; Vol. 405; Doklady Akademii Nauk, Trans.). Retrieved from Pleiades Publishing, Inc. website: <https://www.researchgate.net/publication/289734574>
- Batayneh, A., & Al-Diabat, A. (2002). Application of a two-dimensional electrical tomography technique for investigating landslides along the Amman-Dead sea highway, Jordan. *Environmental Geology*, 42, 399–403.
- Berrezueta, E., Ordóñez-Casado, B., Bonilla, W., Banda, R., Castroviejo, R., Carrión, P., & Puglla, S. (2016). Ore petrography using optical image analysis: Application to zaruma-portovelo deposit (Ecuador). *Geosciences (Switzerland)*, 6(2), 0–24. <https://doi.org/10.3390/geosciences6020030>
- Blanco, R. (2015). *Estudios y Propuestas de Estabilización del Cerro Las Cabras*. Guayaquil, Ecuador.
- Bonilla, W. R. (2009). *Metalogenia del distrito minero Zaruma-Portovelo, República del Ecuador*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

- Campoverde, C., Noriega, R., Carrión, P., Pindo, J., Recalde, E., & Morante, F. (2019). Análisis de subsidencia por la actividad minera en la ciudad de Zaruma, patrimonio del Ecuador. Caso de estudio Escuela La Inmaculada. In L. Mansilla & J. Mata (Eds.), *XVII Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero* (29th ed., p. 1330). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Cervantes, B., Poláček, A., & Rysavka, J. (2012). Contribution of electrical resistivity tomography applied to the slope deformation survey in Lidecko. *GeoScience Engineering LVIII*, 7–15.
- Cobos, L. (2018). *MODELO GEOFÍSICO DEL ÁREA DE INTERÉS DEL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE ZARUMA, PROVINCIA DE EL ORO* (No. SGR-IASR-08-2018-0034). Zaruma, Ecuador: Secretaria de Gestión de riesgos.
- Cobos, Luis, Yáñez, D., & Flores, J. (2017). *ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL HOSPITAL BÁSICO HUMBERTO MOLINA DE LA CIUDAD DE ZARUMA, PROVINCIA DE EL ORO* (No. SGR-IASR-08-0166). Ecuador.
- Delgado, M. (2018). ESTUDIO DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN EL BARRIO LA MERCED BAJA-CANTÓN GUARANDA (Universidad central del Ecuador; Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Duncan, J. ., & Wright, S. . (1980). *The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis* (Vol. 16).
- Dunkley, P., & Gaibor, A. (1997). *Geology of the area between 2 and 3 degrees south, western Cordillera, Ecuador* (No. 2).
- Enriquez, P. (Defensoría del P. (2018). *Resolución Defensorial* (p. 20). p. 20. Zaruma: Delegación Provincial de El Oro.
- Fernandez, J. (2017). Aplicación de la Geofísica y Geoestadística para la detección de agua en el subsuelo — Steemit. Retrieved November 19, 2019, from Steemit website: <https://steemit.com/stem-espanol/@jfernandez/aplicacion-de-la-geofisica-y-geoestadistica-para-la-deteccion-de-agua-en-el-subsuelo>
- Geoseismic. (2017). Métodos de Resistividad Eléctrica SEV tipo Wenner y Schlumberger. Retrieved November 19, 2019, from Geoseismic website: <http://www.geoseismic.cl/metodos-resistividad-electrica-sev/>
- Gómez, S. (2013). *La Universidad Católica de Loja*. Universidad Técnica Particular de

Loja.

- González, A., Mascareño, D., Álvarez, I., González, C., & Álvarez, A. (2014). Hillside instability in the tijuana metropolitan area. Analysis of landslide-provoked building collapse. *Engineering Failure Analysis*, 46, 166–178. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.004>
- González, A., Ruiz, F., & Gallardo, R. (2017). *Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador* (Vol. 4, pp. 69–81). Vol. 4, pp. 69–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2248762X.12116>
- Gonzalez DeVallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica* (I. Capella, Ed.). Retrieved from https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Ingenieria_Geologica_-_Gonzalez_de_Vallejo.pdf
- Hermenejildo, A. (SGR). (2017). *INFORMACION GEOESPACIAL DEL ÁREA MINERA PORTOVELO – ZARUMA, PARA PREVENIR Y REDUCIR RIESGOS NATURALES Y ANTRÓPICOS” – Fase I* (No. SGR-IASR-08-0154). Ecuador.
- Illinois Department of natural resources. (2016). Abandoned Mine Lands. Retrieved November 6, 2019, from Subsidence website: <https://www.dnr.illinois.gov/mines/AML/Pages/Subsidence.aspx>
- Jesús Gallardo Amaya, R., Edison Guerrero Barbosa, T., Armando Macgregor Torrado, A., Gallardo, R., Guerrero, T. E., & Macgregor, A. (2013). Investigación Geotécnica para la estabilización de las laderas del Barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia) * Geotechnical Research for Slope Stabilization at San Fermin Neighborhood, Ocaña City, Norte de Santan. *Inge Cuc*, 9(2), 66–74.
- Jiménez, E. (2015). *Caracterización mediante tomografía eléctrica del deslizamiento de toleo (Oviedo)*. Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- Lapenna, V., Lorenzo, P., Perrone, A., Piscitell, S., Rizzo, E., & Sdo, F. (2005). 2D electrical resistivity imaging of some complex landslides in the Lucanian Apennine Chain, southern Italy. *Geophysics* 70, B11–B18.
- López, A. (2019). *Aplicación de las tomografías eléctricas a la geotécnia en Guatemala*. (p. 36). p. 36. Guatemala.
- Medina, C., & Astudillo, J. (2013). *UBICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LOS*

- PRINCIPALES DESLIZAMIENTOS DE LA VÍA MACARÁ-SABIANGO DE LA PROVINCIA DE LOJA* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Medina, Y. S. (2017). Zonificación de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la cuenca de río Patia- Departamento del Cauca. UNIVERSIDAD DE MANIZALES, Colombia.
- Melentijevic, S. (2005). *ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS CON CRITERIOS DE ROTURA NO LINEALES Y LEYES DE FLUENCIA NO ASOCIADA* (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID E.). Retrieved from <http://oa.upm.es/722/1/04200507.pdf>
- Miensopust. (2010). *Magnetotellurica multidimensional: un estudio de caso 2D y un 3D enfoque para invertir simultáneamente la estructura de resistividad y los parámetros de distorsión*. Instituto de Dublín para Estudios avanzados; Universidad Nacional de Irlanda Galway, Dublín.
- Montalvan, A. (2019). *INFORME DE CARACTERÍSTICAS SOCIALES EN EL SECTOR DE ESTUDIO. INMEDIACIONES DEL HB DR. HUMBERTO MOLINA Y LA PARROQUIA DE ZARUMA*. Ecuador.
- Novoa, C. (El telégrafo). (2017). La minería marcó la historia de Zaruma. Retrieved November 4, 2019, from <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/septimo/1/un-rincon-alberga-el-esplendor-de-la-era-minera-en-zaruma>
- Paucar, E. (2017). 59 kilómetros de galerías surcan las entrañas de Zaruma. Retrieved November 10, 2019, from El Comercio website: <https://www.elcomercio.com/actualidad/zaruma-galerias-mineria-oro-estadodeexcepcion.html>
- Pérez, J. (2019). *Particularidades geológicas y petrográficas de los cerros Zaruma Urcu y Santa Bárbara; distrito minero Zaruma-Portovelo, Provincia de El Oro*. (Universidad de Guayaquil). Retrieved from [http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/39860/1/UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL_FACULTAD_DE_CIENCIAS_NATURALES_CARRERA_DE_INGENIERÍA_GEOLÓGICA.pdf](http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/39860/1/UNIVERSIDAD_DE_GUAYAQUIL_FACULTAD_DE_CIENCIAS_NATURALES_CARRERA_DE_INGENIERÍA_GEOLÓGICA.pdf)
- Pesantes, C. C. P. B. R. (2005). *Evaluación y zonificación de riesgos geodinámicos en el distrito Zaruma y Portovelo* (pp. 1535–1540). pp. 1535–1540.
- Phillipson, H. B., & Brand, E. (1985). A Review of International Practice. *Sampling and*

Testing of Residual Soils.

- Pindo, J., Espinoza, T., Noboa, A., & Villaverde, Y. (2018). *INFORMACIÓN GEOESPACIAL DEL ÁREA MINERA PORTOVELO – ZARUMA, PARA PREVENIR Y REDUCIR RIESGOS NATURALES Y ANTRÓPICOS* (No. SGR-IASR-08-2018-075). Secretaria de Gestión de riesgos.
- Poland, J. F., Lofgren, B. E., Riley, F. S., & Mckelvey, V. E. (1972). *Glossary of Selected Terms Useful in Studies of the Mechanics of Aquifer Systems and Land Subsidence due to Fluid Withdrawal* (No. 2401–00228). Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/wsp/2025/report.pdf>
- Prodeminca. (2000). Depósitos Epi-mesotermiales relacionados con intrusiones. In *Evaluación de Distritos Mineros del Ecuador* (1st ed.). Quito: UCP Prodeminca.
- Ramírez Navas, M. R. (2006). *LA EVALUACIÓN DEL PELIGRO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN DE MASA Y SU APLICACIÓN A LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Ricardo, A., Sanz, V., Martí, S. S., & Orrego, A. D. (2015). Estabilidad de Taludes : Conceptos Básicos , Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo. *Civilizate*, (7), 29. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf?sequence=1>
- Sánchez, C., & Sánchez, A. (2018). *EVALUACIÓN DE AMENAZAS GEODINÁMICAS EN EL ENTORNO DE LA ACTIVIDAD MINERA EN LA CONCESIÓN MINERA PALACIOS*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, Guayaquil, Ecuador.
- Serrano, J. (2003). *Tema 3: TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA*. Retrieved from Universitat politècnica de Catalunya website: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
- SGM. (2014). Panorama Minero del Estado de Hidalgo. In *Panorma Minero de los Estados*. Retrieved from <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf>
- Suárez Díaz, J. (2009). Análisis Geotécnico. In *Deslizamientos: Análisis geotecnico* (p. 588).
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*.
- Teixidó, T., & Quintana, Á. R. (2013). *Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la*

Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía. Universidad de Granada, Granada, España.

Villa, W., & Furlan, N. (2011). Estimación de medidas de resistividad para el modelo del Suelo usando técnicas de estadística multivariante. Retrieved November 19, 2019, from

https://www.researchgate.net/publication/329453535_Estimacion_de_medidas_de_resistividad_para_el_modelo_del_Suelo_usando_tecnicas_de_estadistica_multivariante

Wesley, L. D., & Irfan, T. Y. (1997). Classification of residual soils. In Blight G.E. editor (Ed.), *Mechanics of residual soils* (pp. 17–40).

Zha, J., & Xu, M. (2017). High-grade highways deformation and failure laws in mining area – a case in Nantun Coal Mine, China. *International Journal of Pavement Engineering*, 8436, 1–13. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1402592>

APÉNDICES

Índice de apéndices

Apéndice A: Design Thinking

Figura 1: Mapa mental de las problemáticas, importancia, informes existentes y metodología aplicadas en el Hospital Humberto Molina.

Figura 2: Mapa de actores involucrados en la problemática del Hospital Humberto Molina.

Figura 3: Entrevista a dueña de restaurante ubicado al frente del Hospital Humberto Molina.

Apéndice B: Geofísica

Tabla 1: Datos obtenidos en el SEV-01-ZC y SEV-02-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

Tabla 2: Datos obtenidos en el SEV-03-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

Tabla 3: Datos obtenidos en el SEV-04-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

Tabla 4: Datos obtenidos en el SEV-05-ZC 5 utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

Figura 4: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-02-ZC.

Figura 5: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-03-ZC.

Figura 6: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-04-ZC.

Figura 7: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-05-ZC.

Tabla 5: Coordenadas de las tomografías TGE-01-ZC y TGE-02-ZC.

Tabla 6: Coordenadas de las tomografías TGE-03-ZC y TGE-04-ZC.

Apéndice C: Estudio Económico

Tabla 7: Costos del personal en el proyecto.

Tabla 8: Costos de materiales usados en el proyecto.

Tabla 9: Costos de los softwares empleados en el proyecto.

Tabla 10: Cálculos de costes de material informático, softwares y trabajos realizados.

Tabla 11: Costos del material fungible.

Tabla 12: Costos de gastos varios.

Tabla 13: Suma de costos de estudios realizados, materiales fungibles y gastos varios.

Tabla 14: Costos parciales del proyecto.

Tabla 15: Costos generales y gastos totales.

Apéndice D: Estaciones Geomecánicas

Tabla 16: Datos de campo correspondientes a la estación 2.

Tabla 17: Datos de campo correspondientes a la estación 3.

Tabla 18: Datos de campo correspondientes a la estación 4.

Tabla 19: Datos de campo correspondientes a la estación 5.

Tabla 20: Datos de campo correspondientes a la estación 6.

Tabla 21: Datos de campo correspondientes a la estación 7.

Tabla 22: Datos de campo correspondientes a la estación 8.

Tabla 23: Datos de campo correspondientes a la estación 9.

Tabla 24: Datos de campo correspondientes a la estación 10.

Tabla 25: Datos de campo correspondientes a la estación 11.

Tabla 26: Datos de campo correspondientes a la estación 12.

Tabla 27: Datos de campo correspondientes a la estación 13.

Tabla 28: Datos de campo correspondientes a la estación 14.

Tabla 29: Datos de campo correspondientes a la estación 15.

Tabla 30: Datos de campo correspondientes a la estación 16.

Apéndice D: Propuesta de pre-diseño

Figura 8: Plano de propuesta de diseño para el control de aguas lluvias.

1. APÉNDICE A: DESIGN THINKING

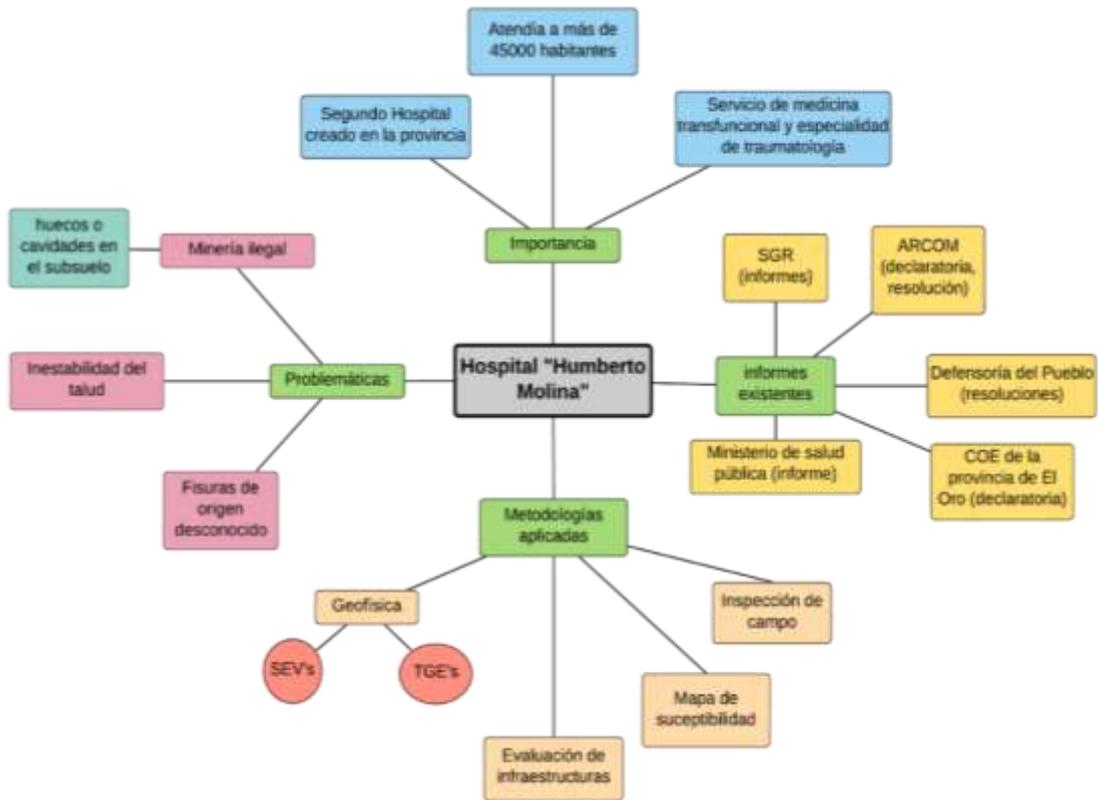


Figura 1: Mapa mental de las problemáticas, importancia, informes existentes y metodología aplicadas en el Hospital Humberto Molina.

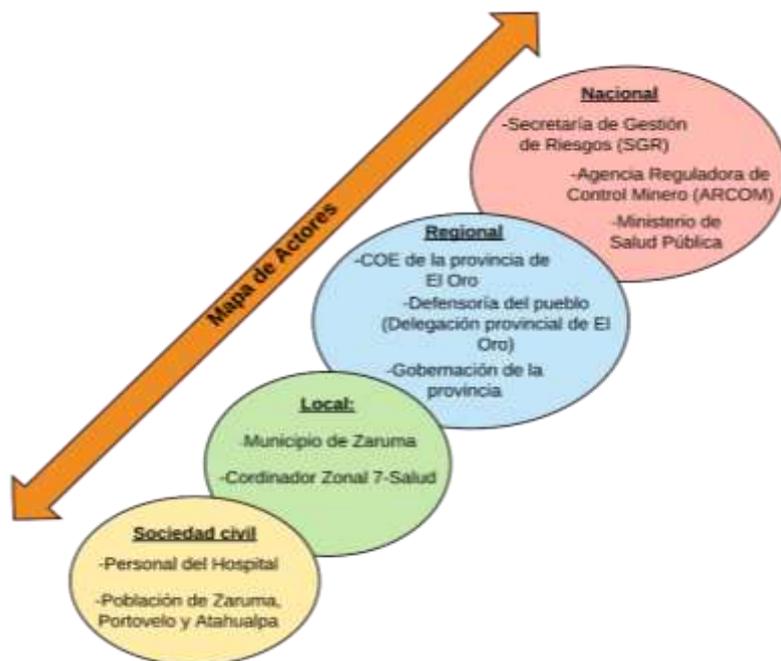


Figura 2: Mapa de actores involucrados en la problemática del Hospital Humberto Molina.



Figura 3: Entrevista a dueña de restaurante ubicado al frente del Hospital Humberto Molina.

2. APÉNDICE B: GEOFÍSICA

- SEV's

Tabla 1: Datos obtenidos en el SEV-01-ZC y SEV-02-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad (Ω m)	AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad (Ω m)
1	0.2	56.018	1	0.2	662.1703
1.47	0.2	102.25	1.47	0.2	581.0008
2.15	0.2	130.345	2.15	0.2	470.0294
3.16	0.2	117.29	3.16	0.2	464.4655
4.64	0.2	83.26	4.64	0.2	424.6842
4.64	0.5	84.94	4.64	0.5	440.1605
6.81	0.2	85.71	6.81	0.2	375.4927
6.81	0.5	14.68	6.81	0.5	390.1412
10	0.5	31.52	10	0.5	336.3400
14.7	0.5	97.697	14.7	0.5	66.2469
14.7	2	206.00	14.7	2	320.5332
21.5	0.5	23711.84	21.5	0.5	225.5797
21.5	2	782.62	21.5	2	281.6743
31.6	2	4031.72	31.6	2	3149.3009
46.4	2	11835.29	46.4	2	19975.4838
46.4	5	1879.07	46.4	5	1256.1999
68.1	2	27101.78	68.1	2	98629.8971
68.1	5	5237.19	68.1	5	7589.2154
100	5	12403.07	100	5	38868.1179
100	10	551.91	100	10	858.2806

Tabla 2: Datos obtenidos en el SEV-03-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad (Ωm)
1	0.2	399,590
1.47	0.2	168,716
2.15	0.2	104,407
3.16	0.2	68,487
4.64	0.2	127,243
4.64	0.5	117,121
6.81	0.2	197,539
6.81	0.5	182,485
10	0.5	260,132
14.7	0.5	403,647
14.7	2	308,040
21.5	0.5	322,709
21.5	2	275,191
31.6	2	158,741
46.4	2	118,560
46.4	5	116,663
68.1	2	117,795
68.1	5	112,381
100	5	141.357,195
100	10	126,009

Tabla 3: Datos obtenidos en el SEV-04-ZC utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad (Ωm)
1	0.2	39,806676
1.47	0.2	48,995394
2.15	0.2	62,705377
3.16	0.2	75,0098141
4.64	0.2	88,0221456
4.64	0.5	71,74342
6.81	0.2	110,0858
6.81	0.5	91,4541501
10	0.5	102,1993581
14.7	0.5	116,9281152
14.7	2	108,2087022
21.5	0.5	104,2134074

21.5	2	96,2147403
31.6	2	103,7965544
46.4	2	135,2696173
46.4	5	113,4745848
68.1	2	102,8376439

Tabla 4: Datos obtenidos en el SEV-05-ZC 5 utilizando el equipo ABEM terrameter SAS1000.

AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad (Ωm)
1	0.2	85.933
1.47	0.2	66.577
2.15	0.2	71.545
3.16	0.2	94.513
4.64	0.2	51.226
4.64	0.5	32.865
6.81	0.2	42.924
6.81	0.5	20.912
10	0.5	36.962
14.7	0.5	42.501
14.7	2	164.754
21.5	0.5	37.982
21.5	2	126.138
31.6	2	87.432
46.4	2	472.784
46.4	5	79.520
68.1	2	89.271
68.1	5	139.780

Figura 4: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-02-ZC.

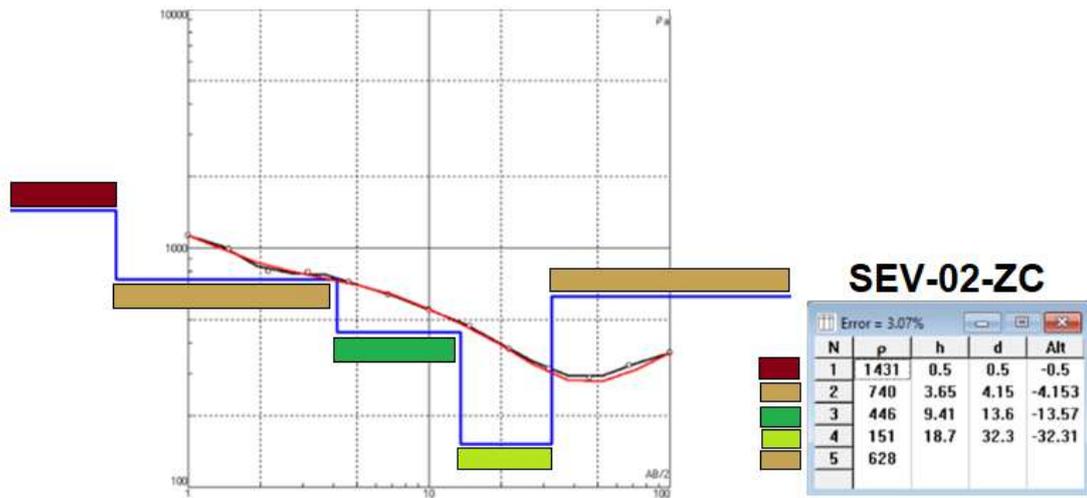


Figura 5: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-03-ZC.

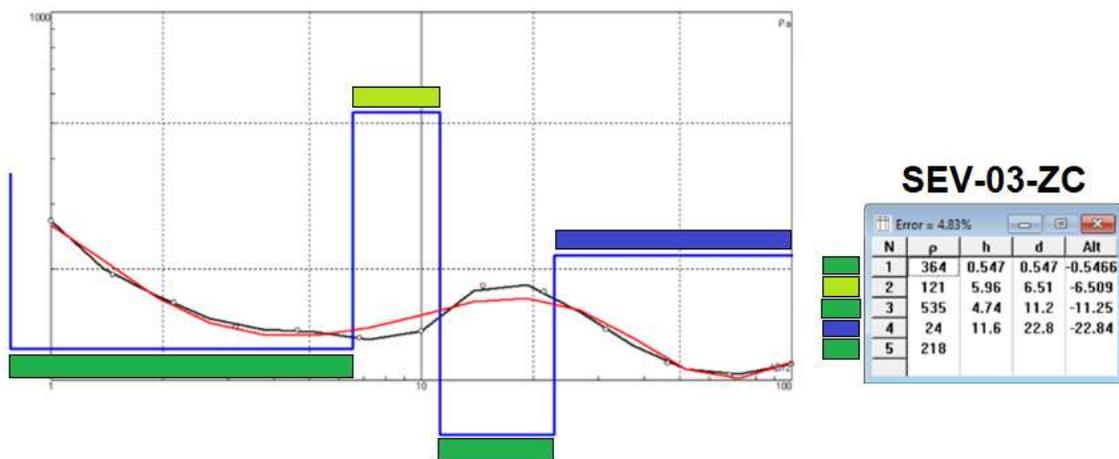


Figura 6: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-04-ZC.

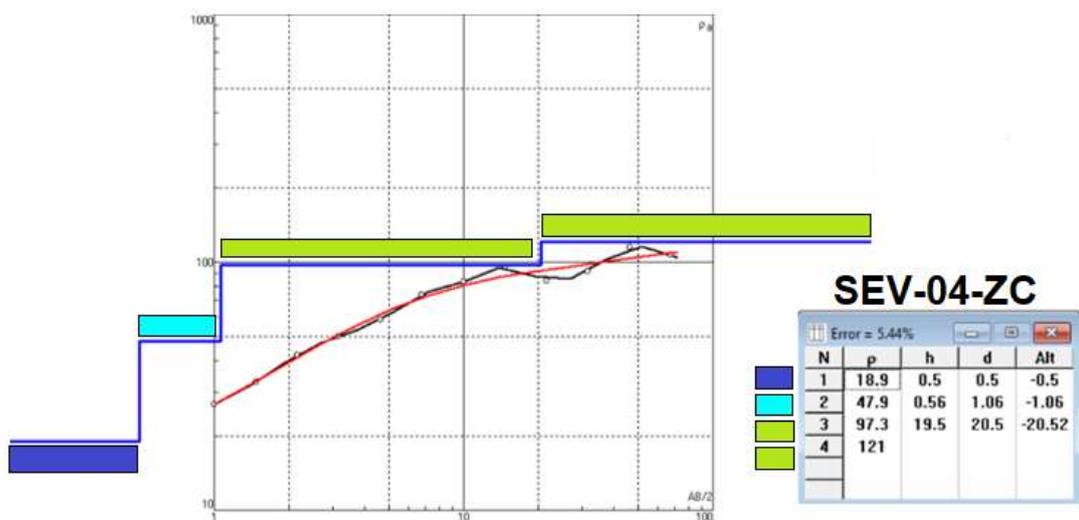
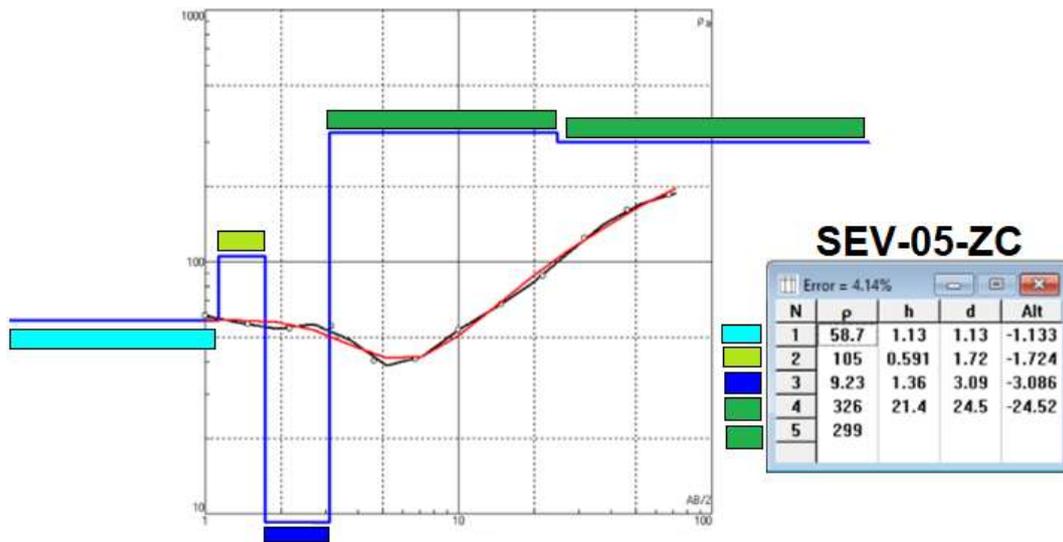


Figura 7: Curva de resistividades en el software IPI2Win, correspondiente al SEV-05-ZC.



- TGE's

Tabla 5: Coordenadas de las tomografías TGE-01-ZC y TGE-02-ZC.

TGE- 01-ZC		TGE-02-ZC	
Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y
654137	9591279	654260	9591203
654108	9591247	654253	9591178
654185	9591111	654164	9591211
654141	9591204	654235	9591136
654104	9591227	654203	9591134
654172	9591137	654185	9591152

Tabla 6: Coordenadas de las tomografías TGE-03-ZC y TGE-04-ZC.

TGE- 03-ZC		TGE-04-ZC	
Coordenada X	Coordenada Y	Coordenada X	Coordenada Y
654138	9591280	654163	9591208
654108	95291247	654260	9591203
654185	9591111	654253	9591178
654141	9591204	654235	95911136
654104	9591227	654203	9591134
654172	9591137	654185	9591152

3. APÉNDICE C: ESTUDIO ECONÓMICO

- **Costos de ejecución del proyecto**

El presente proyecto es un tema de consultoría, el costo de la ejecución del mismo se centra en valorar los gastos debido a las campañas geofísicas, perforaciones, calicatas, cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes y análisis de susceptibilidad.

- **Coste del personal**

Para llevar a cabo el proyecto se necesitó de personal (véase Tabla) como:

- Ingeniero/a superior sénior que dirija el proyecto. Esta persona se encarga de supervisar y corregir el contenido de la información.
- Ingeniero/a superior junior que recopile la información de informes existentes, los datos de entrada y del procesamiento de información obtenida en salidas de campo.
- Administrativo/a para realizar los trámites que se requieran durante todo el proceso.

Tabla 7: Costos del personal en el proyecto.

	Coste (\$/hora)	Tiempo (horas)	Coste total (\$)
Ingeniero/a superior sénior	18,75	120,00	2.250,00
Ingeniero/a superior junior	9,38	960,00	9.000,00
Administrativo	3,75	10,00	37,50
		Subtotal	11.287,50

Coste de recursos materiales

- **Material informático**

Para la realización del proyecto, se recomienda tener una computadora portátil (laptop) y una de escritorio de alta gama. En el costo de estos equipos se incluye un porcentaje de amortización para el proyecto, dependiendo de la vida útil del equipo (6000 horas).

Tabla 8: Costos de materiales usados en el proyecto.

	Precio (\$)	Amortización (\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
Ordenador	1.500,00	0,25	900,00	225,00
Portátil	2.000,00	0,33	900,00	300,00
Escritorio	500,00	0,02	900,00	18,00
Impresora	180,00	0,03	40,00	1,20
			Subtotal	544,20

En este proyecto se hicieron uso de los softwares: Slide 5.0, RES2DINV, ArcGis® y el paquete Microsoft office 2010®. Considerando 6000 horas de vida útil, se tienen los siguientes cálculos:

Tabla 9: Costos de los softwares empleados en el proyecto.

	Precio (\$)	Amortización (\$/h)	Utilización (h)	Coste (\$)
Microsoft office 2010	170,00	0,03	900,00	25,50
Software RES2Dinv	5.000,00	0,83	100,00	83,33
Slide	750,00	0,13	100,00	12,50
ArcGIS	24.000,00	4,00	300,00	1.200,00
Subtotal				1.321,33

Realizando la suma de los cálculos del material informático, softwares y trabajos realizados en la zona de estudio, se tiene:

Tabla 10: Cálculos de costes de material informático, softwares y trabajos realizados.

	Coste (\$)
Equipos Informáticos	544,20
SEV's, TGE's e interpretaciones	6.000,00
Topografía	1.800,00
Licencias software	1.321,33
Subtotal	9.665,53

- **Material fungible**

Considerando como materiales fungibles, la papelería y materiales varios, se tiene:

Tabla 11: Costos del material fungible.

	Coste (\$)
Material fungible	120
Subtotal	120

- **Gastos varios**

En la Tabla , se encuentran los gastos correspondientes a documentación, viajes a la zona de estudio para llevar a cabo todos los estudios y demás.

Tabla 12: Costos de gastos varios.

	Coste (\$)
Gastos documentación	60,00
Viajes	300,00
Gastos sin justificar	40,00
Subtotal	400,00

Realizando la suma entre los materiales y trabajos, materiales fungibles y gastos varios, se tiene:

Tabla 13: Suma de costos de estudios realizados, materiales fungibles y gastos varios.

	Coste (\$)
Materiales y estudios	9.666
Material Fungible	120
Gastos varios	400
Subtotal	10.186

- **Costos parciales**

Los cálculos de costos parcial que considera al personal y los recursos materiales del proyecto se describen a continuación:

Tabla 14: Costos parciales del proyecto.

	Coste (\$)
Personal	11.288
Recursos materiales	10.186
Subtotal	21.473

- **Costos generales y gastos totales**

En los costes generales se incluyen los suministros, estudios realizados, gastos financieros y personal.

Tabla 15: Costos generales y gastos totales.

	Coste (\$)
Costes generales y gastos totales	5.368
Subtotal	5.368

4. APÉNDICE D: ESTACIONES GEOMECÁNICAS

Tabla 16: Datos de campo correspondientes a la estación 2.

Estación N° 2			
Coordenadas	X	654194 m E	
	Y	9591115 m N	
	cota	1112.9 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo arcilloso, maleable, y no tan compacto	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> Afloramiento a un lado del sendero. Espesor de 2 metros. Suelo formado por material orgánico los primeros 1.40 metros, de color café y rojizo. En la parte inferior, el suelo es arcilloso, color rojizo maleable. Pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 29°. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de un valor medio	Morfometría	2	
El suelo tiene poca erosión	Grado de deterioro	0.5	
Superficie del suelo húmeda	Presencia de agua	0.5	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	9.5	

Tabla 17: Datos de campo correspondientes a la estación 3.

Estación N° 3			
Coordenadas	X	654226 m E	
	Y	9591130 m N	
	cota	1112.4 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo medianamente duro y maleable, no tan consolidado	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en un corte. Espesor del afloramiento de 1.50 metros. La pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 30°.
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de un valor medio	Morfometría	2	

El suelo tiene erosión en nivel medio	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	1	
Presencia de agua tanto superficialmente como al excavar en el afloramiento	Presencia de agua	2	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	11.5	

Tabla 18: Datos de campo correspondientes a la estación 4.

Estación N° 4			
Coordenadas	X	654166 m E	
	Y	9591154 m N	
	cota	1117.5 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo arcillo, maleable, no tan consolidado, en ciertas partes hay acumulación de suelo coluvial	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> • La estación se la realizó en un afloramiento a un lado del sendero. • Espesor del afloramiento de 1.5 metros. • Pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 23°. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de un valor medio	Morfometría	2	
El suelo tiene erosión en nivel medio	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	1	
Se produce una acción apreciable del agua superficial	Presencia de agua	1	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	10.5	

Tabla 19: Datos de campo correspondientes a la estación 5.

Estación N° 5			
Coordenadas	X	654161 m E	
	Y	9591190 m N	
	cota	1123.5 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo arcilloso, maleable medianamente compacto	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se ubicó subiendo una ladera. Suelo rojo maleable, algo consolidado y húmedo. La pendiente medida fue de 11°. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de bajo valor	Morfometría	1	
El suelo tiene erosión media	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	1	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	8	

Tabla 20: Datos de campo correspondientes a la estación 6.

Estación N° 6			
Coordenadas	X	654146 m E	
	Y	9591200 m N	
	cota	1119.1 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo arcilloso, maleable medianamente compacto	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en un afloramiento a un costado del sendero. Espesor de 1.70 metros. Suelo rojo maleable, algo consolidado y húmedo. Pendiente de 20°.
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de bajo valor	Morfometría	1	
El suelo tiene poca erosión	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	0.5	

Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	7.5	

Tabla 21: Datos de campo correspondientes a la estación 7.

Estación N° 7			
Coordenadas	X	654103 m E	
	Y	9591228 m N	
	cota	1117.6 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo coluvial con algo de compactación y dureza	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> • La estación se la realizó en un afloramiento a un lado del sendero. • Espesor del afloramiento de 1.4 metros. • Suelo coluvial degradable no tan consolidado. • Pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 9°. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de bajo valor	Morfometría	1	
El suelo tiene un significativo proceso de erosión	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	2	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
Afloramiento con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	10	

Tabla 22: Datos de campo correspondientes a la estación 8.

Estación N° 8			
Coordenadas	X	654116 m E	
	Y	9591243 m N	
	cota	1123.9 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo maleable, y con cierto nivel de consolidación	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> • La estación se la realizó a la subida de la ladera. • Suelo color café. • Pendiente de 32°. • Alta humedad. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de valor medio	Morfometría	2	
El suelo tiene erosión media	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	1	
Se produce una acción apreciable del agua superficial	Presencia de agua	1	
El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	10.5	

Tabla 23: Datos de campo correspondientes a la estación 9.

Estación N° 9			
Coordenadas	X	654128 m E	
	Y	9591266 m N	
	cota	1120.8 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelo que se degrada con cierto esfuerzo, presenta poca compactación.	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> • La estación se la realizó en un afloramiento a un lado de la calle. • Espesor del afloramiento muy pequeño. • Suelo poco húmedo y algo coluvial. • Pendiente medida en la parte superior del afloramiento de 5°. • Poca vegetación.
El espesor del afloramiento es de muy bajo tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de valor medio	Morfometría	0	
El suelo tiene baja erosión	Grado de deterioro	0.5	

Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
El afloramiento se encuentra con poca cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0.5	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	8	

Tabla 24: Datos de campo correspondientes a la estación 10.

Estación N° 10			
Coordenadas	X	654110 m E	
	Y	9591275 m N	
	cota	1117 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de mediana a alta calidad, poco erosionados	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se localizó a la bajada de una ladera. Suelo maleable y compacto. Pendiente de 22°. Existe presencia de vegetación y presencia de agua superficial. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es suave y mediana	Morfometría	1	
El suelo tiene baja erosión	Grado de deterioro	0.5	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	7.5	

Tabla 25: Datos de campo correspondientes a la estación 11.

Estación N° 11			
Coordenadas	X	654198 m E	
	Y	9591255 m N	
	cota	1122.1 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos tipos coluvial y arcilloso	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó a la bajada de una ladera.

El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	<ul style="list-style-type: none"> Suelo color rojizo muy maleable, con gran compactación. Suelo coluvial por paso de una corriente de agua. Pendiente medida de 32°. Existe presencia de vegetación y gran presencia de agua superficial. 
La pendiente es de valor medio	Morfometría	2	
El suelo tiene un significativo proceso de erosión	Grado de deterioro	2	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0.5	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	11.5	

Tabla 26: Datos de campo correspondientes a la estación 12.

Estación N° 12			
Coordenadas	X	654215 m E	
	Y	9591227 m N	
	cota	1122.5 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de mediana a alta calidad	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en la bajada de una ladera. Suelo color rojizo, maleable y arcilloso, con alto nivel de compactación. La pendiente fue de 36°. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de valor medio alto	Morfometría	3	
El suelo tiene mediana y poca erosión	Grado de deterioro	1	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	10	

Tabla 27: Datos de campo correspondientes a la estación 13.

Estación N° 13			
Coordenadas	X	654216 m E	
	Y	9591206 m N	
	cota	1124.1 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de mediana a alta calidad	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en la bajada de una ladera. Suelo color rojizo, maleable y arcilloso, con un alto nivel de compactación. La pendiente fue de 35°. Existe presencia de vegetación y humedad en la superficie. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es de valor medio alto	Morfometría	3	
El suelo tiene una mediana y poca erosión	Grado de deterioro	1	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	10	

Tabla 28: Datos de campo correspondientes a la estación 14.

Estación N° 14			
Coordenadas	X	654259 m E	
	Y	9591233 m N	
	cota	1100.6 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de calidad, buena compactación y no es fácilmente degradable	Característica (calidad) del suelo	0	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en un corte en la ladera. Suelo color rojizo, saprolito, donde se observa pequeños planos de fracturas. Se obtuvo un valor estructural de N299°, 74°, el cual va en contra de la pendiente del talud. El suelo tiene una buena compactación, no es maleable y se degrada haciendo una buena presión con la mano. La pendiente fue de 20°.
Espesor del suelo medido es de 1 metro.	Estructura geológica	0.5	
La pendiente es suave a media	Morfometría	1	
A penas existe erosión en el suelo	Grado de deterioro	0.5	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	

El afloramiento se encuentra con gran cobertura vegetal	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	6.5	

Tabla 29: Datos de campo correspondientes a la estación 15.

Estación N° 15			
Coordenadas	X	654268 m E	
	Y	9591206 m N	
	cota	1092 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de tipo de coluvial y arcilloso	Característica (calidad) del suelo	2	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en un pequeño deslizamiento en la ladera. Suelo de color rojo de granulometría de medio a fino, no maleable. En otras partes hay suelo coluvial. El espesor de suelo observado es de 4 metros aproximadamente. La pendiente es de 15° en la parte superior del afloramiento. Existe presencia de vegetación en los alrededores del deslizamiento y en la parte superior del talud, hay humedad en la superficie. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
Pendiente de suave a media	Morfometría	1	
Existe un deslizamiento en el terreno	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	3	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
La ladera se encuentra parcialmente cubierta	Cobertura vegetal	1.5	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	12.5	

Tabla 30: Datos de campo correspondientes a la estación 16.

Estación N° 16			
Coordenadas	X	654085 m E	
	Y	9591205 m N	
	cota	1100 m	
Características	Parámetro medido	Peso asignado en el análisis de la Susceptibilidad al Deslizamiento (S.D.)	Foto/Observaciones
Suelos de mediana a alta calidad	Característica (calidad) del suelo	1	<ul style="list-style-type: none"> La estación se la realizó en un pequeño afloramiento lleno de vegetación. Suelo de color rojo maleable y compacto. No se observa ni un signo de erosión, la pendiente es de 20°. Existe gran presencia de vegetación en el terreno y se registró la presencia de humedad en la superficie. 
El espesor del afloramiento no es de gran tamaño	Estructura geológica	0.5	
Pendiente de suave a media	Morfometría	1	
Terreno sin prácticamente erosión	Grado de deterioro (erosión – meteorización)	0.5	
Solo la superficie del suelo se encontraba húmeda	Presencia de agua	0.5	
Gran cobertura vegetal en el terreno	Cobertura vegetal	0	
	Acción sísmica	4	
	TOTAL	7.5	

5. APÉNDICE D: PROPUESTA DE PRE-DISEÑO

Figura 8: Plano de propuesta de diseño para el control de aguas lluvias.

