



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Aplicación de elementos finitos al deslizamiento de “El
Temazcal-Tzitzio”

**Tesis para obtener el grado de
MAESTRO EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE
EN LA RAMA DE LAS VÍAS TERRESTRES**

Presenta:

Ing. Carla Fabiola Germán Martínez

Asesor:

Dr. Carlos Chavez Negrete

Coasesor:

Dr. José Eleazar Arreygue Rocha

Morelia, Michoacán de Ocampo, Agosto 2023



Agradecimientos

Primeramente, agradezco a mis padres Fabiola y Carlos, por darme la oportunidad de estudiar en otro estado y en otra ciudad, por apoyarme en cada una de mis decisiones y por guiarme para cumplir mis metas.

A mis hermanos, Carlos y Camila, por estar siempre apoyandome y echandome porras, y el estar presente en mi vida.

A mis compañeros de maestría, especialmente a Misael y Jessica, que hicieron un poco más divertida la estancia en Morelia.

Agradezco al CONACYT por el apoyo otorgado durante el desarrollo del plan de estudios, y contribuir en el proceso de esta investigación.

Finalmente, a mi asesor de tesis, el Dr. Carlos Chávez Negrete y a mi coasesor, el Dr. José Eleazar Arreygue Rocha.

Dedicatoria

Se la dedico a mis padres, que sin ellos nada de esto hubiera sido posible, su apoyo incondicional y el siempre confiar en mi, alentandome a cumplir otra meta más.

Y finalmente a mi novio, por siempre apoyarme en todo momento, por su amor y su dedicación en todo este proceso de investigación y redacción de mi tesis.

Resumen

Durante los últimos años sobre la carretera estatal 49 El Temazcal – El Limón en el km 8+430 ubicado en el municipio de Tzitzio Michoacán, se han presentado constantemente movimientos en masa, siendo una de las mayores afectaciones en la infraestructura vial, provocando inseguridad y una mayor inversión económica. El riesgo de que ocurra un deslizamiento está en función de tres factores principales: las condiciones del terreno (litológicas y estructurales), su geomorfología (relieve superficial) y los procesos de cambios climáticos (lluvias fuertes, cortas y continuas). Se han realizado diversos estudios en la zona a través de los años donde se han obtenido distintos parámetros del suelo tales como su peso volumétrico, contenido de agua, límite líquido, límite plástico, límite de contracción lineal, límite de contracción volumétrica y su clasificación SUCS.

En esta investigación se pretende emplear los resultados obtenidos de trabajos realizados que han estudiado la zona a través de los años, los mismos que han concluido en recomendaciones y medidas a adoptarse, además del constante monitoreo mediante instrumentación ubicada en diferentes lugares considerados críticos y que presentan movimiento evidente, por lo tanto, se propone realizar una modelación numérica con elementos finitos (MEF), con ayuda del software Slide y RS2®, aplicando los parámetros del deslizamiento, estudiando su movimiento y comportamiento. Se considera un material en condiciones plásticas, utilizando el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown.

Finalmente, se obtuvo el factor de seguridad (FS) y el comportamiento del suelo (desplazamientos y deformaciones).

Palabras clave: Estabilidad, deslizamiento, Modelo, MEF, Modelación, Taludes.

Abstract

During the last years on the state highway 49 El Temazcal - El limón at km 8+430 located in the municipality of Tzitzio Michoacán, there have been constant mass movements, being one of the biggest impacts on road infrastructure, causing insecurity and increased economic investment. The risk of landslides depends on three main factors: soil conditions (lithological and structural), geomorphology (surface relief) and climate change processes (heavy, short and continuous rainfall). Several studies have been carried out in the area over the years where different soil parameters have been obtained such as its volumetric weight, water content, liquid limit, plastic limit, linear contraction limit, volumetric shrinkage limit and its SUCS classification.

The aim of this research is to use the results obtained from studies carried out over the years, which have led to recommendations and measures to be adopted, in addition to the constant monitoring by instrumentation located in different places considered critical and that present evident movement, therefore, it is proposed to perform numerical modeling with finite elements (MEF), with the help of the Slide and RS2 software, applying the sliding parameters, studying their movement and behavior. It is considered a material in plastic conditions, using the constituent model of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown.

Finally, the safety factor (FS) and the behavior of the soil (displacements and deformations) were obtained.

Keywords: Stability, sliding, Model, MEF, Modeling, Slopes.

Índice

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ESTADO DEL ARTE	1
1.1.1. TRABAJOS RELACIONADOS	1
1.1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. OBJETIVOS	5
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	6
2. MARCO	6
2.1. INESTABILIDAD DE TALUDES.....	6
2.1.1. NOMENCLATURA DE UN TALUD O LADERA	6
2.1.2. FACTOR DE SEGURIDAD	8
2.2. PRINCIPALES CAUSAS DE LOS MOVIMIENTOS	9
2.3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS MEDIANTE MODELAMIENTO NUMÉRICO	10
2.4. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM).....	11
2.4.1. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE LOS MODELOS.....	15
2.5. MODELOS CONSTITUTIVOS	16
2.5.1. HOEK-BROWN	16
2.5.2. MOHR-COULOMB.....	19
2.5.3. BARTON-BANDIS	21
2.6. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SOFTWARES UTILIZADOS	22
2.6.1. PROGRAMA COMPUTACIONAL SLIDE	22
2.6.2. ROCK AND SOIL ^{2D} (RS ²)	23
2.7. TEORÍA DE LA PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA	24
2.7.1. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	24

2.7.2. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	25
--	----

CAPITULO III. METODOLOGÍA **27**

3.1. CASO EN ESTUDIO	27
3.2. PERFIL TOPOGRÁFICO.....	29
3.3. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DE LA MESA DE TZITZIO	30
3.4. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	30
3.4.1. SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL	31
3.5. MODELACIÓN NUMÉRICA	32
3.5.1. PARÁMETROS UTILIZADOS CON EL CRITERIO DE MOHR-COULOMB	33
3.5.2. PARÁMETROS UTILIZADOS CON EL CRITERIO DE HOEK-BROWN	33

CAPITULO IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y MODELACIÓN **35**

4. RESULTADOS	35
4.1. PERFIL TOPOGRÁFICO.....	35
4.2. ESTUDIO GEOLÓGICO	38
4.3. ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	40
4.4. ESTUDIOS GEOFÍSICOS.....	41
4.4.1. ESTUDIO GEOELÉCTRICO EN 1998.....	42
4.4.2. ESTUDIO GEOELÉCTRICO EN 2022.....	44
4.4.3. COMPARACIÓN DE SEV'S	51
4.5. CONFORMACIÓN SECCIÓN GEOTÉCNICA	53
4.6. MODELACIÓN	55
4.6.1. EQUILIBRIO LIMITE	55
4.6.2. STRENGTH REDUCTION FACTOR	61

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **70**

5.1. RECOMENDACIONES	72
<u>VI. BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>73</u>
<u>VI. ANEXOS.....</u>	<u>78</u>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas (Suárez, 1998).</i>	7
<i>Figura 2. Diferentes definiciones del factor de seguridad (F.S) (Abramson, 2002).</i>	9
<i>Figura 3. Sistema de nodos y elementos en MEF (Rubio & Romero, 2010).</i>	12
<i>Figura 4. Tipos de elementos en la malla del MEF (Medina, Salas, Luco & Bertram, 2005).</i>	13
<i>Figura 5. Ejemplo de un medio en MEF (Germán, 2020).</i>	14
<i>Figura 6. Proceso de análisis por medio de MEF (Pezzotti & Antico, 2007).</i>	15
<i>Figura 7. Relaciones entre los esfuerzos principales mayor y menor para el criterio de Hoek-Brown y el equivalente del criterio de Mohr-Coulomb (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, 2002).</i>	19
<i>Figura 8. Envolvente de falla de Mohr-Coulomb (Álvarez, 2020).</i>	21
<i>Figura 9. Procedimiento de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).</i>	26
<i>Figura 10. Ubicación de la zona de estudio.</i>	28
<i>Figura 11. Sección de la carretera afectada.</i>	28
<i>Figura 12. Estudio del terreno.</i>	29
<i>Figura 13. Puntos obtenidos del reconocimiento de zona en estudio.</i>	29
<i>Figura 14. a) Equipo de resistividad SuperSting modelo R1/IP, b) Electrodo SuperSting modo dual de acero inoxidable (Gómez Nicolás, 2014).</i>	32
<i>Figura 15. Restitución apoyada en carta topográfica del INEGI con escala 1:5000.</i>	36
<i>Figura 16. Perfil longitudinal con escala 1:1000 obtenido de AutoCAD.</i>	37
<i>Figura 17. Columna litológica de la zona de estudio con unidad de M.S.N.M (Adaptado de Pola Villaseñor, 2006).</i>	39
<i>Figura 18. Clasificación de la zona de estudio con unidad M.S.N.M (Adaptado de Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).</i>	40
<i>Figura 19. Equipo utilizado para tomografía eléctrica.</i>	41
<i>Figura 20. Croquis de localización de sondeos y secciones (Chávez, 1998).</i>	42
<i>Figura 21. Estrato conformado por los materiales obtenidos de SEV1 (Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).</i>	43
<i>Figura 22. Estrato conformado por los materiales obtenidos de SEV2 (Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).</i>	44
<i>Figura 23. Estudio geoelectrico realizado en uno de los puntos de estudio.</i>	45
<i>Figura 24. Ubicación de los sondeos geoelectricos verticales (SEV's).</i>	46
<i>Figura 25. Ubicación de los trabajos de campo.</i>	47
<i>Figura 26. Perfil geoelectrico de SEV1.</i>	48
<i>Figura 27. Perfil geoelectrico de SEV2.</i>	50

<i>Figura 28. Ubicación de SEV's en un perfil longitudinal.</i>	52
<i>Figura 29. Distribución de estratos.</i>	54
<i>Figura 30. Estratigrafía de la ladera con polilínea de búsqueda de bloque en los materiales de arcilla, arena y toba.</i>	56
<i>Figura 31. F.S. =1.21, obtenido en el perfil sin NAF con el metodo de Bishop simplificado.</i>	57
<i>Figura 32. Estratigrafía de la ladera con niveles de agua mediante el método estadístico.</i>	58
<i>Figura 33. F.S. =1.03, obtenido en el perfil con nivel de agua freatico con el metodo de Bishop simplificado.</i>	59
<i>Figura 34. Estratigrafía de la ladera con la opción de área de búsqueda de SSR en el estrato donde se encuentra la arena, arcilla y toba.</i>	61
<i>Figura 35. Mallado cuadrilátero y condiciones de contorno.</i>	62
<i>Figura 36. Valores de lluvia diaria y altura total lineal.</i>	63
<i>Figura 37. Presión del poro por lluvia diaria con el valor de 72.5 mm/día.</i>	64
<i>Figura 38. Desplazamiento horizontal con una longitud máxima de 5.32 m.</i>	65
<i>Figura 39. Desplazamiento vertical con una altura máxima de 3.33 m.</i>	66
<i>Figura 40. Desplazamiento total máximo de 5.3629 m.</i>	66
<i>Figura 41. Desplazamiento vertical sin NAF con un SRF=1.53.</i>	67
<i>Figura 42. Desplazamiento vertical con lluvia con un SRF=1.07.</i>	68

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Factores que influyen en la estabilidad de los taludes (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo , 2002).</i>	10
<i>Tabla 2. Métodos de modelación comunes y sus siglas en ingles (Wagner H. , 2019).</i>	11
<i>Tabla 3. Estimacion del indice geologico de resistencia (GSI), en base a una descripcion geologica del macizo rocoso (Hoek & Brown, 1997).</i>	34
<i>Tabla 4. Parámetros del macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown (Hoek E. , 2007).</i>	39
<i>Tabla 5. Parámetros del suelo con el criterio de Mohr-Coulomb (Martínez Rojas, 2020)</i>	41
<i>Tabla 6. Coordenadas UTM de SEV'S.</i>	46
<i>Tabla 7. Comparación de los factores de seguridad de sin NAF y con NAF.</i>	60

Capítulo I. Introducción

1.1. Estado del arte

En los últimos años el análisis de los deslizamientos, considerando parámetros adicionales a los establecidos por las clasificaciones, ha sido tema de estudio para diversas investigaciones sobre movimientos de masa. A pesar de las diferencias metodológicas y técnicas, muchos de los métodos propuestos consideran que las condiciones geológicas y geomorfológicas de los deslizamientos futuros, deberían ser similares a las condiciones que condujeron a la inestabilidad de laderas pasadas y presentes. El objetivo de los estudios previos es el conocimiento geológico-geotécnico general de la zona en conflicto o de la zona donde se va realizar el proyecto, la mayoría de los estudios se basan en la revisión de la información disponible y en el reconocimiento geológico-geotécnico de campo. Se dividió en función de los resultados técnicos y parámetros considerados para la caracterización del deslizamiento por Martínez (2020), Pola (2006) y Chávez (1998).

1.1.1. Trabajos relacionados

Coutinho et al., (2009), describen el estudio geológico-geotécnico de la ocurrencia de un movimiento de masas en una ladera en el municipio de Camaragibe, estado de Pernambuco, Brasil. A través, de las pruebas de laboratorio e instrumentación de campo, realizaron un análisis de estabilidad que representa la verdadera condición de estabilidad de la ladera. En la etapa de falla, el movimiento fue clasificado como deslizamiento rotacional; se enfatiza que el desplazamiento masivo en el área estudiada todavía ocurre, y hasta la fecha no hay mitigación. La lluvia se indicó como el factor desencadenante principal, por lo que aseguran que la elaboración de un modelo de filtración de estado estacionario de las condiciones del agua subterránea complementa la caracterización del movimiento.

Cervantes-Ricalde y Cuadros-León (2017), emplearon técnicas geofísicas de Tomografía de resistividad eléctrica y Georadar en el área del deslizamiento de Lidecko (República Checa), en un periodo comprendido entre el año 2011 y 2014, centrándose principalmente en los resultados obtenidos en la parte de transporte y acumulación del deslizamiento; realizaron varios perfiles de medición a lo largo del eje del deslizamiento y en dirección

perpendicular al movimiento, y una vez determinado el tipo y velocidad del movimiento, realizaron un seguimiento de los cambios de resistividad en la parte más inestable del deslizamiento en el periodo 2012-2014. Finalmente determinaron que la implementación de técnicas geofísicas brinda una forma rápida y en tiempo real de obtener los datos, lo que contribuye a una interpretación más objetiva de los resultados obtenidos.

Ausilio y Zimmaro (2017), analizaron un deslizamiento de tierra ubicado en Gimigliano de la región de Calabria (sur de Italia). A través de mediciones geotécnicas convencionales tales como lecturas de inclinómetro y estudios geofísicos magnéticos y eléctricos. Concluyeron que los métodos de detección electromagnética y tomografía de resistividad eléctrica permiten validar las mediciones obtenidas mediante enfoques convencionales.

Bernal (2015), analizó un deslizamiento traslacional de tipo creep, que se presenta en un sector del municipio de Guateque, Colombia. A través de las pruebas de laboratorio e instrumentación de campo identificó las condiciones de falla mediante programas computacionales o softwares especializados, así mismo, para el análisis de estabilidad empleó el método propuesto por Spencer, ya que se tiene en cuenta el análisis de equilibrio de fuerzas y momentos, se trata de un movimiento con rango de 35 a 40 m. El factor detonante del movimiento corresponde a la saturación del material por efectos de la infiltración de agua, proveniente de la escorrentía superficial y precipitación.

1.1.2. Trabajos previos

Tosca y Chávez (1998), empleó técnicas geofísicas de Tomografía de resistividad eléctrica en el año de 1998, el cual consiste en inducir corriente eléctrica al terreno para determinar la resistividad que presentan los materiales del subsuelo al paso de la corriente, de este modo se determinan los electro-estratos, conociendo su correlación entre resistividad y litología, así como también se tomó en cuenta el nivel estático y la geología de la zona.

Pola (2006), elaboró un mapa geologico-estructural de la zona donde se describieron los diferentes procesos de remocion en masa (PRM), asi mismo, se realizaron estudios

mecánicos, físicos y pruebas mineralógicas de suelos con la finalidad de reconocer las relaciones directas entre causa y efecto. Se realizaron también pruebas mecánicas en muestra de roca y un análisis de fracturamiento, en conjunto con un análisis de estabilidad y factor de seguridad a lo largo del plano de falla crítica en suelos arcillosos no consolidados. En su trabajo se observa que en la cima de la columna se tienen grandes paquetes de ignimbritas vítreas muy compactas, las cuales forman la geoforma conocida como mesa de Tzitzio que está siendo fragmentada por fallas normales con dirección NE-SW, así mismo, los movimientos de la zona son generados por las caídas y volcamientos de roca y flujos de arenas arcillosas. Subyaciendo se encuentra una secuencia de sedimentos arcillosos formados por la erosión y deslizamientos de masas a partir de la desintegración de las unidades volcánicas.

Martínez (2020), realizó la caracterización geotécnica de un deslizamiento ubicado sobre la carretera estatal 49 El Temazcal – El limón, estado de Michoacán, se determinaron los parámetros hidrológicos que se correlacionan con los factores desencadenantes de los movimientos. Con la correspondiente caracterización de los materiales se evidenció que el tipo de material más común encontrado son suelos arcillosos. En su trabajo se concluyó que de acuerdo al análisis topográfico y geomorfológico el tipo de movimiento presente en la zona es un deslizamiento complejo de tipo rototraslativo.

1.2. Planteamiento del problema

Durante los últimos años sobre la carretera estatal 49 El Temazcal – El limón en el km 8+430 ubicado en el municipio de Tzitzio Michoacán, se han presentado constantemente movimientos en masa, siendo una de las mayores afectaciones en la infraestructura vial, provocando inseguridad y una mayor inversión económica. El riesgo de que ocurra un deslizamiento está en función de tres factores principales: las condiciones del terreno (litológicas y estructurales), su geomorfología (relieve superficial) y los procesos de cambios climáticos (lluvias fuertes, cortas y continuas). Los factores geológicos dependen de la calidad del material, su meteorización, fracturas, fisuras y su capacidad de infiltración, así mismo, los factores morfológicos consisten en la erosión que existen en los márgenes laterales, la erosión fluvial al pie de la ladera y la erosión subterránea que se pueda

presentar, los factores físicos son donde entran los cambios climáticos encontrándose la precipitación, temperatura, sismos y erupciones volcánicas.

En la carretera Temazcal-Tzitzio, el mayor problema son las constantes lluvias, Martínez (2020), menciona que se considera como atípico, el año 2001 donde se tuvieron precipitaciones de hasta 900 mm en promedio anual causando la infiltración de agua en la ladera, lo que provoca derrumbes en el talud inestable y bloqueos en la carretera, obstruyendo el paso a pasajeros y transportes que quieran transitar en esta área, se han realizado diversos estudios por Chávez (1998), Pola (2006) y Martínez, (2020) en la zona a través de los años, donde se han obtenido distintos parámetros del suelo tales como su peso volumétrico, contenido de agua, límite líquido, límite plástico, límite de contracción lineal, límite de contracción volumétrica y su clasificación SUCS mediante pruebas de laboratorio, sin embargo, no se ha llegado a una propuesta de solución ya que solo se han realizado estudios de cómo se comporta el deslizamiento y no se ha elaborado un perfil estratigráfico para analizar el movimiento de masa que se presenta.

1.3. Justificación

Los estudios hasta ahora realizados en México solo han abordado la inestabilidad de taludes en base a aspectos más geomorfológicos, meteorológicos, aspectos físicos (geotécnicos), aspectos químicos de las rocas, estudios hidrológicos, monitoreo, pruebas de campo y laboratorio. Se ha considerado prioritaria esta zona, debido a que cada año, los movimientos son más perceptibles y no solo afecta a las vías terrestres, también ha iniciado movimientos en la zona urbana de la población de Tzitzio, comprometiendo a los habitantes. Por lo tanto, se debe entender y mitigar el problema de la inestabilidad, agregando estudios de infiltración de agua, ya que se sabe que el mayor problema del deslizamiento es la precipitación, siendo uno de los principales factores desencadenantes del movimiento de masa.

En esta investigación se emplearon los resultados obtenidos de trabajos previos que han estudiado la zona a través de los años, los mismos que han concluido en recomendaciones y medidas a adoptar, además del constante monitoreo mediante instrumentación ubicada en diferentes lugares considerados críticos y que presentan movimiento evidente. Por lo tanto, se propone realizar una modelación numérica con métodos del equilibrio límite y elementos

finitos (MEF), aplicando los parámetros del deslizamiento propuestos en otros estudios y la estratigrafía deducida de los estudios geofísicos; estudiando su movimiento y comportamiento. La eficiencia de estos dará los resultados del deslizamiento de la zona, verificando el movimiento y los desplazamientos que se presentarán.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Entender los constantes desplazamientos del deslizamiento “El Temazcal”, Tzitzio del estado de Michoacán, desarrollando un modelo geológico-geotécnico estructural de la zona utilizando modelaciones numéricas para determinar la causa y la evolución del comportamiento de la ladera natural, considerando el comportamiento elástico y plástico del suelo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el marco geológico-geotécnico de la zona para la conformación de un modelo geológico estructural en el software Slide.
- Realizar un estudio geofísico para conocer las características estratigráficas del subsuelo con el método geoelectrico de resistividades.
- Interpretar los resultados obtenidos de la elaboración de los sondeos geoelectricos verticales.
- Simular el deslizamiento “El Temazcal”-Tiztizio del Estado de Michoacán mediante el programa computacional Slide y RS2, lo que permitirá obtener factor de seguridad (FS) y el comportamiento del suelo (desplazamientos y deformaciones).

Capítulo II. Marco teórico

2.1. Inestabilidad de taludes

Los procesos de ladera son igualmente denominados procesos gravitacionales, procesos de remoción en masa (PRM), o en un sentido general, se conocen también como deslizamientos de tierra. Los deslizamientos se presentan sobre la superficie terrestre en una extensa variedad de escalas, lugares, condiciones geológicas, geomorfológicas, y climáticas (Alcántara Ayala & Murillo García , 2008).

Los movimientos de ladera provocan daños materiales importantes en el mundo, y son el tercer riesgo natural por número de víctimas después de los terremotos e inundaciones (Ayala-Carcedo, 2002).

El clima, y en especial la lluvia, es uno de los detonadores naturales más importantes en México. Basta recordar, por ejemplo, los lamentables hechos ocurridos en la sierra norte de Puebla en 1999, que cobró más de 200 víctimas, la mayoría de ellas ocurridas en Teziutlán; o bien los deslaves y flujos de lodo acontecidos en Chiapas en 1998, o el flujo de escombros en Acapulco en 1997, provocado por el huracán Pauline que produjo grandes pérdidas humanas y económicas. En varios de los casos de mayor impacto, la combinación de lluvias abundantes o intensas, con un inadecuado uso del suelo y deforestación, fue el motor principal de la inestabilidad y los flujos (Vázquez Conde , 2002).

2.1.1. Nomenclatura de un talud o ladera

Los taludes pueden ser producto de la misma naturaleza, los cuales se denominan ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes se generan por intervención de la actividad humana se pueden denominar como cortes, en ocasiones pueden ser terraplenes; estos taludes se consideran como taludes artificiales.

Suárez Díaz (1998), menciona que un “talud” o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente (ver Figura 1). Los taludes se

pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención.

Los elementos constitutivos de un talud o ladera se definen de la siguiente manera:

- Altura: Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas, debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- Pie: Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- Cabeza o escarpe: Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- Altura de nivel freático: Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- Pendiente: Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

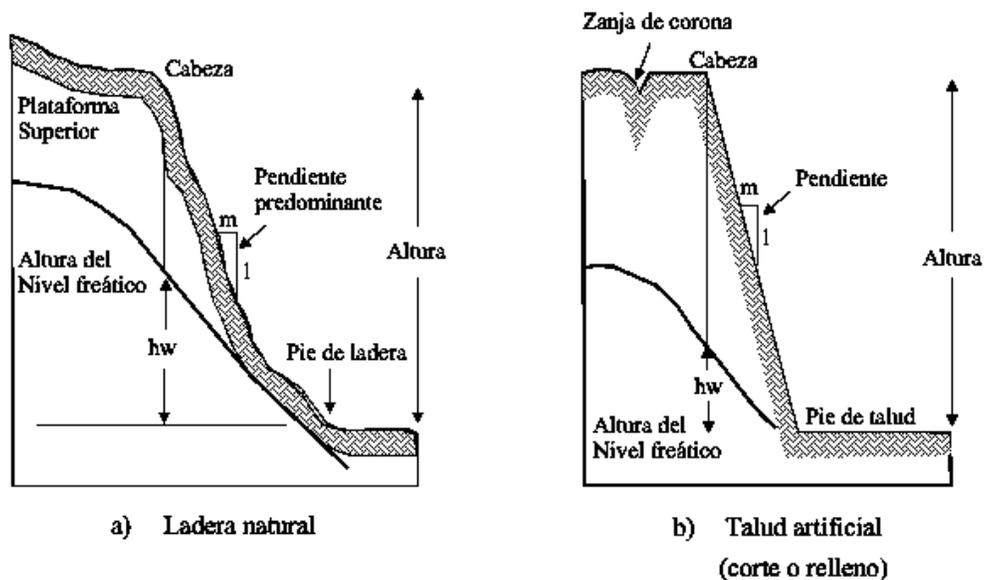


Figura 1. Nomenclatura de taludes y laderas (Suárez, 1998).

2.1.2. Factor de seguridad

Abramson, L. W et al., (2002), menciona que una de las funciones del F.S. es dar cuenta de la inseguridad del talud, y por lo tanto para proteger contra la ignorancia acerca de la confiabilidad de los elementos que entran en el análisis, como, por ejemplo, parámetros de fuerza, la distribución de la presión de poro, y la estratigrafía. En la Figura 2 el análisis de equilibrio limite, se calcula la resistencia al corte requerida a lo largo de una superficie de falla para mantener la estabilidad y luego se comparada con la magnitud de la resistencia al corte disponible.

La adopción de los factores de seguridad para los esfuerzos efectivos (F_c y F_ϕ) permiten diferentes proporciones de los parametros efectivos de resistencia a la tensión (C' y ϕ) de la resistencia que será movilizadada a lo largo de la superficie de falla.

Par el diseño de taludes en carreteras, el F.S. requerido (no sísmico) está usualmente entre el rango de 1.25 y 1.5. Pueden ser requeridos factores más altos si hay un alto riesgo de pérdidas de vidas o si se tiene desconfianza con respecto a los parámetros de diseño pertinentes.

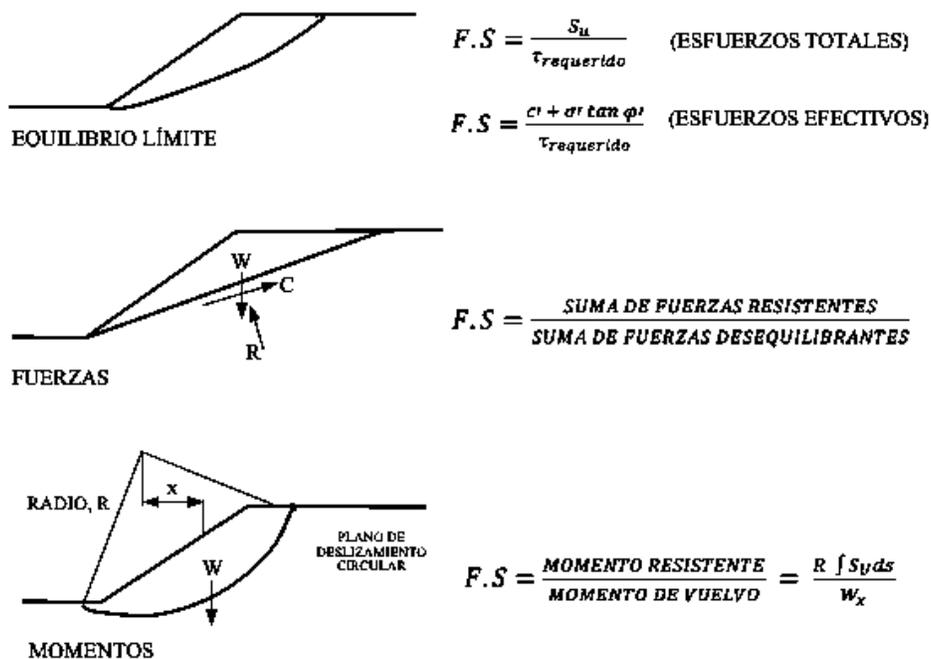


Figura 2. Diferentes definiciones del factor de seguridad (F.S) (Abramson, 2002).

2.2. Principales causas de los movimientos

González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo (2002), menciona que la estabilidad de un talud está determinada por:

- a) Factores geométricos: altura e inclinación.
- b) Factores geológicos: que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud.
- c) Factores hidrogeológicos: presencia de agua.
- d) Factores geotécnicos: que están relacionados con el comportamiento mecánico del terreno como la resistencia y la deformabilidad.

Los factores geológicos, hidrológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales (ver Tabla 1), por lo que se les denomina factores internos. Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes, también denominados, «pasivos», los factores desencadenantes o «activos», provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones.

Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características, propiedades y las condiciones de equilibrio del talud.

Tabla 1. Factores que influyen en la estabilidad de los taludes (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo , 2002).

<i>Factores condicionantes</i>	<i>Factores desencadenantes</i>
Estratigrafía y litología.	Sobrecargas estáticas.
Estructura geológica.	Cargas dinámicas.
Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales.	Cambios en las condiciones hidrogeológicas.
Propiedades físicas, resistentes y deformacionales.	Factores climáticos.
Esfuerzos naturales y estado tenso-deformacional.	Variaciones en la geometría.
	Reducción de parámetros resistentes.

2.3. Análisis de esfuerzos mediante modelamiento numérico

Monte Parra (2020), menciona que, desde la segunda mitad del siglo XX, el constante avance tecnológico y desarrollo de computadoras ha permitido el auge de nuevas metodologías de análisis y resolución de problemas que complementan los métodos empíricos, dentro del área de la ingeniería una de las principales es el modelamiento numérico, que contribuye en el estudio y predicción de la naturaleza irregular de un medio natural como lo son los macizos rocosos.

Los métodos numéricos permiten representar una aproximación de la realidad de manera simplificada a través de una formulación matemática y una sucesión de operaciones numéricas de resolución de ecuaciones diferenciales, las cuales pueden ser resueltas de manera matricial, proceso útil en situaciones donde el resultado exacto de la ecuación no puede ser calculado analíticamente, lo que sucede en la mayoría de los casos prácticos reales, y se converge a una solución aproximada. Los métodos de modelamiento numérico usan esta base para simular el comportamiento del medio en estudio.

En minería, el modelamiento numérico apoya el diseño de taludes y excavaciones subterráneas mediante la predicción de carga, deformación y estabilidad a través de análisis de esfuerzos, en la medida de que se disponga de suficiente información geológica y geotécnica (Coulthard M. A., 1999). El análisis numérico suele estudiar la estabilidad en términos de deformación máxima y desplazamientos (Derek & Peter , 2018). Permitiendo, de este modo, representar de manera más precisa las condiciones de borde de un problema complejo.

En la actualidad, los métodos de modelamiento usados en ingeniería pueden ser agrupados en dos categorías: continuos y discretos. En aquellos que son de tipo continuo el dominio de interés no puede ser separado, preservando continuidad entre puntos. Por otro lado, en aquellos de tipo discreto, el dominio es separado individualmente en elementos continuos que interactúan entre ellos. Modelos del tipo discreto suelen ser usado en estudios de movimientos de cuerpos rígidos, mientras que los modelos del tipo continuo se privilegian en el estudio de deformación de sistemas (Nikolić, Roje-Bonacci, & Ibrahimbegović, 2016). En la Tabla 2 se resumen los métodos continuos y discretos más utilizados.

Tabla 2. Métodos de modelación comunes y sus siglas en ingles (Wagner H. , 2019).

Métodos Continuos	Método de diferencias finitas	FDM
	Método de volúmenes finitos	FVM
	Método de elementos finitos	FEM
	Método de elementos de borde	BEM
Métodos Discretos	Método de elementos discretos	DEM
	Método de redes discretas de fracturas	DFN

2.4. Método de Elementos Finitos (FEM)

Bustamante Herman & Centeno Werner (2011) y Frías Valero (2004), definen el método de los elementos finitos (MEF) como un método de aproximación de problemas continuos, utiliza los métodos numéricos para integrar ecuaciones diferenciales que resultan de la

aplicación de modelos de comportamiento físico, también conocidos como modelos constitutivos de cada problema en particular, los cuales son suplidos con parámetros representativos de la caracterización físico mecánica de cada uno de los elementos de tamaño finito en los que se divide una superficie, o de un volumen, ya sea que se trate de casos de deformación plana de tal forma que, el continuo se divide en un número finito de partes y elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos (ver Figura 3). Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes, las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.

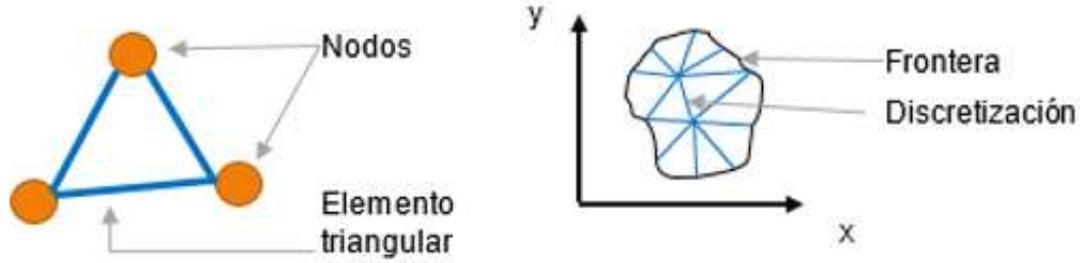


Figura 3. Sistema de nodos y elementos en MEF (Rubio & Romero, 2010).

El MEF, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo (ver Figura 5). El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Los programas computacionales basados en MEF logran calcular esfuerzos y desplazamientos para diferentes tipos de elementos. Los softwares bidimensionales con cálculos geotécnicos, se dividen en subprogramas, el programa de entradas, el programa de cálculo y el programa de salidas, en el cual lleva consigo las opciones de graficar diferentes especificaciones en diferentes posiciones en el suelo (Plaxis , 2017).

Si el problema es bidimensional, las divisiones serán triángulos o paralelogramos de lados rectos, o pueden ser triángulos o cuadriláteros de lados curvos. Para problemas tridimensionales las divisiones serán tetraedros, asimétricos o hexaedros (ver Figura 4). En cada elemento hay una serie de puntos marcados llamados nodos y el conjunto de ellos, considerando sus relaciones de adyacencia, se conoce como malla. Este conjunto de relaciones definirá una serie de incógnitas que se pueden escribir como un sistema de ecuaciones lineales o no lineales y serán proporcionales al número de nodos, se denominarán grados de libertad.

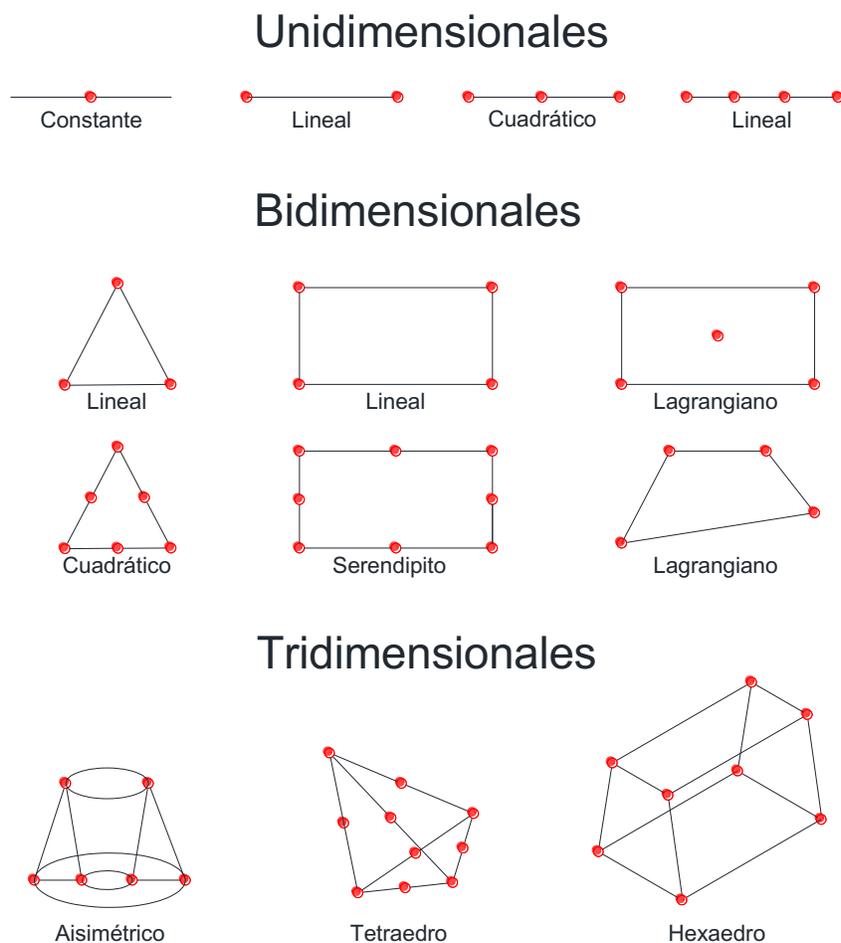


Figura 4. Tipos de elementos en la malla del MEF (Medina, Salas, Luco & Bertram, 2005).

Los softwares pueden utilizar diferentes modelos constitutivos para suelos y/o rocas, donde los comúnmente usados son el Mohr-Coulomb y el Hoek-Brown respectivamente, estos

modelos sirven para que el software pueda modelar el comportamiento del suelo como lo especifican los modelos; a lo referente con cargas externas de igual manera se puede definir de manera puntual, distribuida o por momentos externos. Cuando el modelo está definido con las propiedades de los materiales, restricciones y cargas, se procede al cálculo del medio y los resultados son obtenidos en términos de esfuerzos o desplazamientos (Svensson & Johan, 2010).

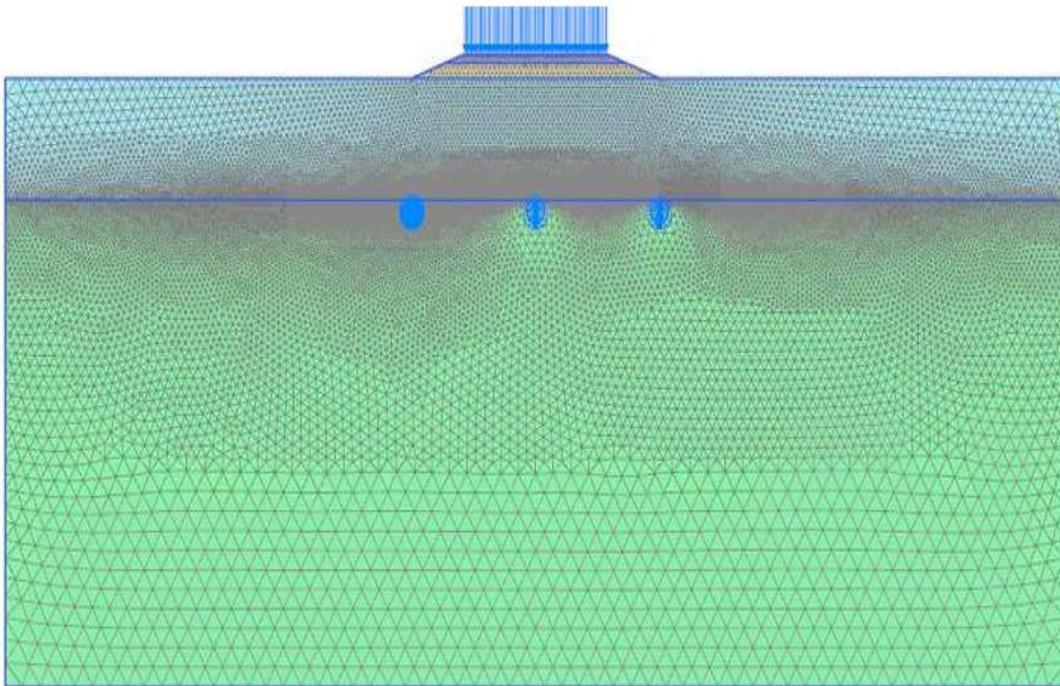


Figura 5. Ejemplo de un medio en MEF (Germán, 2020).

En la Figura 6 se explica que el modelado de los elementos finitos, es subdividir la geometría del modelo en elementos discretos, y asignar las propiedades del material y del elemento siendo el caso de la elección del tipo de malla a utilizar según el modelo, posteriormente, la definición del ambiente es aplicar las cargas y condiciones para simular el ambiente de la operación. El análisis, se trata de computar los resultados, a partir de análisis estáticos o dinámicos. La corroboración de los resultados consiste en compararlo con los criterios de diseño.

Se debe considerar que utilizar los softwares no implica la obtención de un resultado exacto y real, es solo una aproximación a la zona en estudio.

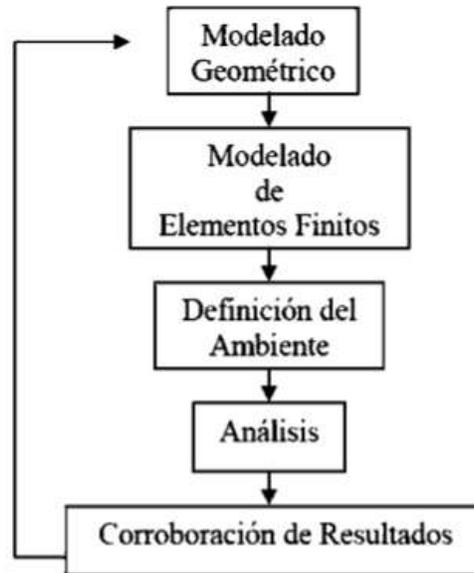


Figura 6. Proceso de análisis por medio de MEF (Pezzotti & Antico, 2007).

2.4.1. Importancia del estudio de los modelos

El proceso de modelación es un proceso complejo ya que son muchas las variables que influyen en su realización, puesto que simular en un modelo las condiciones que se presentan en la realidad se necesita de imaginación, conocimiento y habilidad por parte del constructor del modelo, para que así mismo éste llegue a ser representativo de las condiciones que se pretenden simular. Entre algunos de los factores que hacen el proceso de modelación, un método algo complicado, está la resistencia de los materiales, el tamaño, la forma, las limitaciones en la selección de los elementos constitutivos, procesos constructivos entre otros. La complejidad del modelo depende de la precisión y la exactitud con la que se quiera obtener información ya que pueden haber modelos de tipo cualitativo en donde solo se pueda apreciar un comportamiento físico, como los que hay de tipo cualitativo- cuantitativo que son los que permiten obtener un mayor y mejor provecho, ya que con la información que se recopile se podrán conseguir mejores diseños de las estructuras reales y facilita a los diseñadores poder crear obras con diseños más versátiles y muy bien refinados de alta calidad y estética.

2.5. Modelos Constitutivos

2.5.1. Hoek-Brown

El modelo constitutivo o criterio de falla “Hoek-Brown” ha sido adoptado como una herramienta confiable para analizar el comportamiento de macizos rocosos. Este criterio parte de las propiedades de la roca intacta y posteriormente se van agregando factores reductores en función de la geología y las características del macizo rocoso. Uno de los aportes de este método es la posibilidad de clasificación de macizos rocosos alterados e inalterados.

El criterio de falla “Hoek-Brown” es un ajuste no lineal de las envolventes de Mohr. Hoek sugirió que la resistencia cohesiva determinada al ajustar una tangente a la envolvente curvilínea de Mohr es un valor sobredimensionado y puede dar unos resultados optimistas en los cálculos de estabilidad. Consecuentemente, puede ser más apropiado un valor medio determinado al ajustar una relación lineal de “Mohr-Coulomb” por métodos de mínimos cuadrados de acuerdo a la ecuación (1).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m \frac{\sigma_3}{\sigma_1} + s} \quad (1)$$

Donde:

σ'_1 = esfuerzo principal mayor.

σ'_3 = esfuerzo principal menor.

σ'_{ci} = es la resistencia a compresión uniaxial del material intacto.

m y s = son las constantes del material, tomándose s=1 para roca intacta.

Mientras que en general el criterio se considera satisfactorio, existen algunas incertidumbres e inexactitudes que ha creado inconvenientes en su implementación a modelos numéricos y a programas de computación de equilibrio límite. En particular, la dificultad de encontrar un ángulo de fricción y resistencia cohesiva equivalentes para un

macizo rocoso dado, ha sido un inconveniente desde la publicación original del criterio en 1980. Por lo que se introdujo el concepto de Criterio de falla “Hoek-Brown Generalizado” en el que la forma de la curva de la tensión principal o la envolvente de Mohr podría ajustarse por medio de un coeficiente variable denominada a , en lugar del término de la raíz cuadrada de la ecuación. Además de los cambios en las ecuaciones, también se reconoció que el RMR de Bieniawski (Rock Mass Rating) no era adecuado como vehículo para relacionar el criterio de ruptura con las observaciones geológicas en campo, particularmente para macizos rocosos muy débiles. El RMR es un sistema de clasificación de rocas *in situ*, que permite evaluar varios aspectos sobre la competencia del material, a partir de inspección visual y algunas pruebas de laboratorio. Ello condujo a la introducción del Índice de Resistencia Geológica (GSI, Geological Strength Index) (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, 2002).

El criterio se expresa a través de la siguiente ecuación (2):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad (2)$$

Donde:

σ_{ci} = resistencia a la compresión uniaxial del material intacto.

m_b = valor reducido de la constante del material m_i , está dado por la ecuación (3).

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (3)$$

Donde:

s y a = constantes propias del macizo roco y están dadas por las ecuaciones (4) y (5).

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e - \frac{GSI}{15} - e^{-20/3} \right) \quad (5)$$

Donde:

D= factor que depende del grado de alteración que ha sufrido el macizo rocoso y varía desde 0 para macizos inalterados hasta 1 aquellos muy alterados.

GSI= toma valores desde 0 (para macizos rocosos muy frágiles) hasta 100 (macizos rocosos muy competentes) Incluida en el manual de usuario del software de Rocscience® (Rocscience, 2021). Dado que la mayoría de los softwares consideran el criterio de ruptura de “Mohr-Coulomb”, es necesario determinar los ángulos de fricción y las resistencias cohesivas para cada macizo rocoso e intervalo de esfuerzos. Esto se hace ajustando una relación lineal media a la curva generada a partir de la ecuación (1 para un intervalo de esfuerzo principal menor definido por $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$, tal como se ilustra en la Figura 7. El proceso de ajuste supone equilibrar las áreas por encima y por debajo de la curva de “Mohr-Coulomb” (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, 2002).

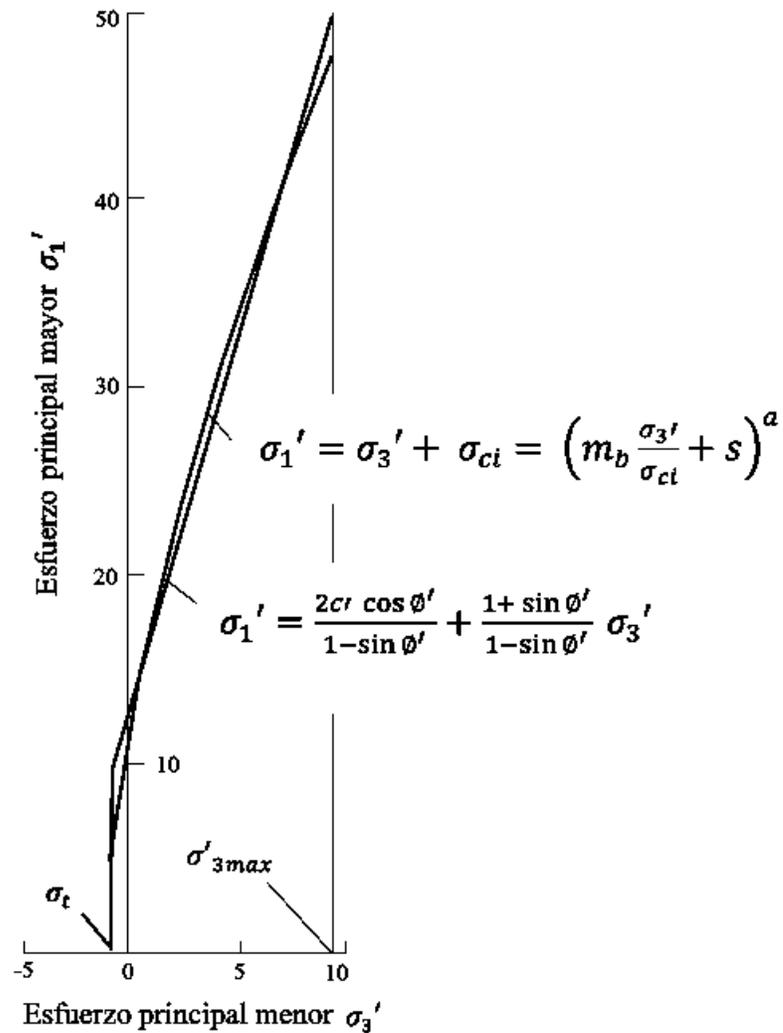


Figura 7. Relaciones entre los esfuerzos principales mayor y menor para el criterio de Hoek-Brown y el equivalente del criterio de Mohr-Coulomb (Hoek, Carranza-Torres, & Corkum, 2002).

2.5.2. Mohr-Coulomb

El modelo de falla de Mohr-Coulomb indica que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante, y no solo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante (Mohr , 1900).

$$\tau_f = f(\sigma') \tag{6}$$

La ecuación anterior (6) representa una curva, sin embargo, para la mayoría de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal, esto se realiza al combinarla con los parámetros establecidos en la teoría Coulomb (1776). Esta relación se describe como:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi' \quad (7)$$

Donde τ_f corresponde al esfuerzo cortante sobre el plano de falla, el cual es igual a la suma de la cohesión (c) y el producto del esfuerzo efectivo normal sobre el plano de falla σ' por la tangente del ángulo de fricción interna φ' (Braja, 1999).

De manera gráfica, el criterio de falla de Mohr-Coulomb (ver Figura 8) se representa a través de una envolvente de falla tangencial al círculo de Mohr. El diámetro de este círculo será el formado por los esfuerzos mínimo (σ_{min}) y máximo (σ_{max}) obtenidos por medio de pruebas triaxiales en la geotecnia. El valor donde hacen contacto con la envolvente de falla será el esfuerzo cortante máximo (τ_f).

La Teoría considera que los materiales en estudio son ideales, esto quiere decir, que se encuentran en un estado de continuidad, uniformidad, isotropía, y que son homogéneos. Este modelo tiene aplicación en el área de la geotecnia para conocer la resistencia de las partículas de suelos y rocas, encontradas en el terreno destinado a obras de infraestructura civil.

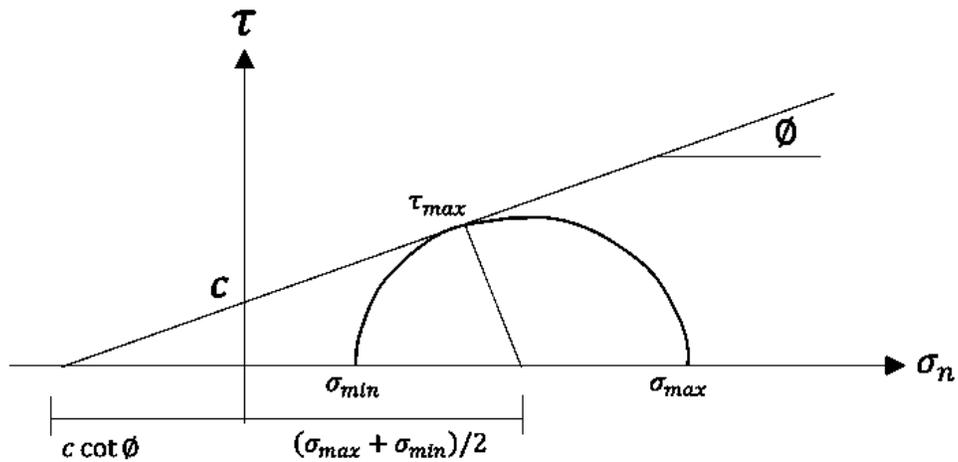


Figura 8. Envoltorio de falla de Mohr-Coulomb (Álvarez, 2020).

2.5.3. Barton-Bandis

González de Vallejo L. I. (2002), menciona que se trata de un criterio empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, que permite estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas, se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = \sigma'_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \varphi_r \right] \quad (8)$$

en donde:

τ y σ'_n = son los esfuerzos tangencial y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

φ_r = es el ángulo de rozamiento residual.

JRC = es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (joint roughness coefficient).

JCS = es la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (joint wall compresión strenght).

Según la ecuación anterior (8), la resistencia de la discontinuidad depende de tres componentes: una componente friccional, φ_r una componente geométrica dada por el

parámetro JRC, y una componente de aspersion controlada por la relación $\frac{JCS}{\sigma'_n}$. Esta aspersion y la componente geométrica representan la rugosidad i . Su valor es nulo para esfuerzos normales altos cuando $\frac{JCS}{\sigma'_n} = 1$. Los valores mas representativos suelen estar entre 3 y 100. La resistencia friccional total viene dada por $(\phi_r + i)$, y por lo general no es superior a 50° . A mayor valor de σ'_n menor valor de la resistencia friccional total.

Con la relación de Barton y Choubey se obtienen ángulos de rozamiento muy altos para tensiones de compresión muy bajas sobre la discontinuidad. Por ello no debe usarse para tensiones σ'_n tales que $\frac{JCS}{\sigma'_n} > 50$, debiendo tomarse en estos casos un angulo de rozamiento constante independiente de la carga, con un valor.

2.6. Breve descripción de los softwares utilizados

2.6.1. Programa computacional Slide

Tierra y tecnología (2016), menciona que Slide es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D desarrollado por la empresa Rocscience, que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Incluye análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario, e integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos.

Permite evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, etc.

Por otro lado, se puede seleccionar entre diversos métodos de análisis, tales como, Fellenius, Bishop simplificado, Janbú generalizado y corregido, Spencer, Morgenstem-Price, entre otros. Slide tiene dos subprogramas, Slide Compute y el Slide Interpret, el primero se utiliza para calcular el factor de seguridad (FS) una vez que se ingresaron todos los datos de entrada, mientras que el segundo permite identificar la superficie de falla crítica y el centro de giro (Mendoza , 2016).

2.6.2. Rock and Soil^{2D} (RS²)

Siendo uno de los principales productos de Rocscience, tanto en sus versiones en dos dimensiones como tridimensional, Rock and Soil ofrece un estudio de esfuerzos en material elasto-plástico mediante elementos finitos. Su campo de aplicación abarca un amplio espectro de opciones, tanto en suelo como en roca (Ali, Ahmed , Akhtar, Khan, & Hussain, 2015).

Se basa en los elementos finitos bidimensionales válidos para modelizar comportamientos en suelos y rocas. Analiza los esfuerzos y las deformaciones que se producen en torno a excavaciones superficiales, lo que permite la reproducción de problemáticas geotécnicas.

RS² proporciona el factor crítico de reducción al esfuerzo cortante (SRF), asimilable al factor de seguridad en los métodos de equilibrio límite. Este parámetro se obtiene a partir del método de “Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante” aplicando el criterio de comportamiento tenso-deformacional lineal de Mohr-Coulomb (Rodríguez Marqués, 2017).

2.6.2.1. Shear Strength Reduction Method (SSR)

Se basa en un proceso iterativo en el que los parámetros de resistencia de roca, se van reduciendo mediante un factor hasta que el modelo se vuelve inestable, el factor de reducción se conoce como SRF (Shear Reduction Factor).

El proceso se detiene cuando las soluciones matemáticas no convergen, es decir, cuando los desplazamientos en los nodos se vuelven muy altos. No existe una distribución de esfuerzos que se ajuste al criterio de resistencia o cuando se supera el máximo de iteraciones permitidas definidas por el usuario antes de llegar a una solución convergente, según la tolerancia definida, al llegar a este punto el proceso se detiene, lo que se considera como el colapso del talud. En este punto se define el factor de reducción crítico el cual el modelo falla, cuya interpretación es similar al factor de seguridad, pudiendo hacer uso de ambos términos para referirse al mismo resultado (Hammah, Yacoub, & Corkum, 2005).

2.7. Teoría de la prospección geoelectrica

Según Orellana (1982), la prospección geoelectrica tiene tres magnitudes que en principio podrían utilizarse para identificar los cuerpos situados en el subsuelo, estas magnitudes son la permeabilidad magnética μ , la constante dieléctrica o permitividad (ϵ) y la resistividad ρ .

Estas resistividades están directamente relacionadas con la composición mineralógica de las rocas, el contenido de fluidos, la porosidad y el grado de saturación de los poros.

Debido al comportamiento de resistividad que presentan los materiales, las técnicas de prospección geoelectrica, han proporcionado información de gran utilidad. Durante muchos años para diversas áreas de investigación como son la hidrogeología, minería, geotecnia y estudios ambientales (Loke, 2021).

2.7.1. Resistividad eléctrica

Para poder entender mejor los efectos de la resistividad, primero se define la resistencia, que se describe como la medida de la oposición de un material al paso de la corriente eléctrica y su unidad de medida es el Ohm, la resistencia se define por la ecuación:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (9)$$

Donde L y A representan la longitud y la sección transversal del cuerpo y la constante de proporcionalidad lineal es la resistividad ρ (*Rho*), que es un parámetro característico de cada material.

La magnitud ρ (*Rho*), es un coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo considerado y recibe el nombre de resistividad, su medida es Ohm-metro ($\Omega \cdot m$), y se define como una medida de dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado (Orellana, 1982).

El valor de resistividad, describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica en la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (10)$$

Donde ρ es la resistividad, que es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a la conductividad σ .

2.7.2. Sondeos eléctricos verticales

El método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), se conoce como una serie de determinaciones de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción, en cuyas mediciones de campo se mantiene fijo el punto central del dispositivo y se incrementan las separaciones entre electrodos para obtener información sobre sectores más profundos del subsuelo (Koefoed, 1979).

Durante la ejecución de un SEV, en las configuraciones de adquisición, dos electrodos son usados para energizar el suelo AB y dos electrodos para medir la diferencia de potencial MN, la correlación entre la corriente inyectada, la diferencia de potencial medida y un coeficiente geométrico relativo a la disposición de los 4 electrodos determina el valor de la resistividad aparente en el sitio (ver Figura 9). La finalidad del SEV es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado. Para su interpretación se asume normalmente que el subsuelo está constituido por capas horizontales, homogéneas e isotrópicas, en cuyo caso, la resistividad del subsuelo varía solo con la profundidad (Loke, 2021).

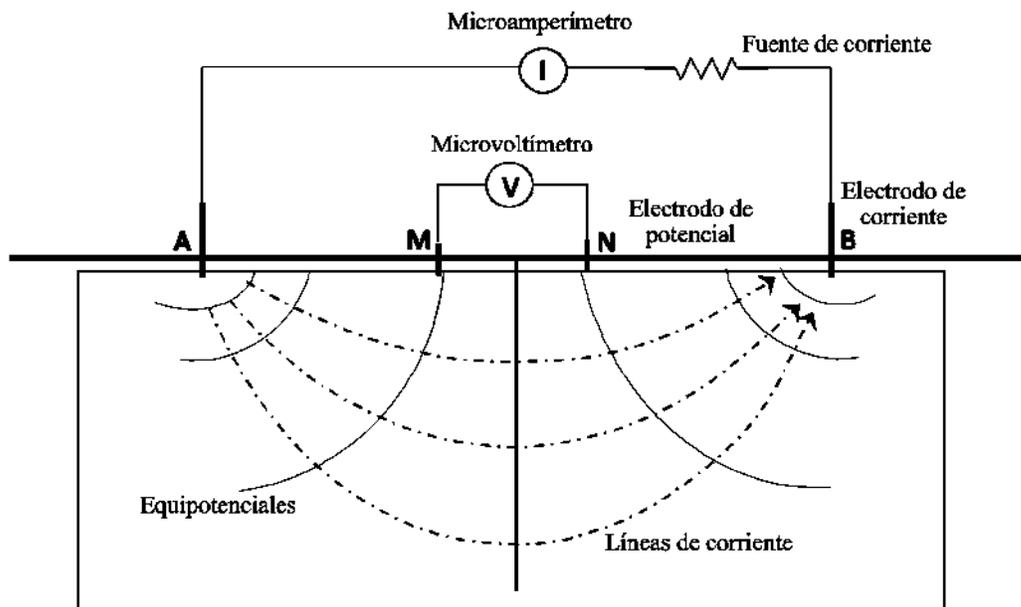


Figura 9. Procedimiento de un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV).

Capítulo III. Metodología

Este capítulo, describe la metodología de la investigación a desarrollar, para la obtención de los parámetros necesarios en la modelación.

La metodología en general consistirá, en la obtención de los diferentes parámetros a utilizar, que algunos serán retomados de investigaciones anteriores realizadas por Pola (2006), Chávez (1998) y Martínez (2020), luego se realizarán visitas de reconocimiento al área de estudio.

El desarrollo investigativo se divide en dos etapas. La primera consiste en el análisis y tratamiento de la información recopilada previo al desarrollo de la presente investigación y la obtención de los datos de entrada necesarios para el modelamiento numérico. Esta etapa contempla una salida a campo, para la toma de parámetros de caracterización geotécnicos faltantes. La segunda etapa contempla la construcción del modelo numérico a partir de los parámetros obtenidos en la primera etapa junto con los casos ya estudiados.

La metodología propuesta para la recopilación e identificación de la zona en estudio es la siguiente:

1. Identificar la zona de falla en el talud ubicado en “El temazcal”, Tzitzio.
2. Realizar un estudio geofísico en el deslizamiento el limón, ubicado en el municipio de Tzitzio.
3. Simular el deslizamiento “El Temazcal”, Tiztizio del Estado de Michoacán mediante el programa computacional Slide y RS2 para analizar la evolución del comportamiento de la ladera natural.

3.1. Caso en estudio

El deslizamiento en estudio se encuentra ubicado en el municipio de Tzitzio Michoacán, sobre la carretera estatal 49 El Temazcal – El limón en el km 8+430, con coordenadas UTM X=295897, Y=2169301 zona 14 (ver Figura 10). El tramo afectado tiene una longitud aproximada de 200 m de largo y se ubica en la ladera poniente de la elevación denominada “Mesa Tzitzio” (ver Figura 11).

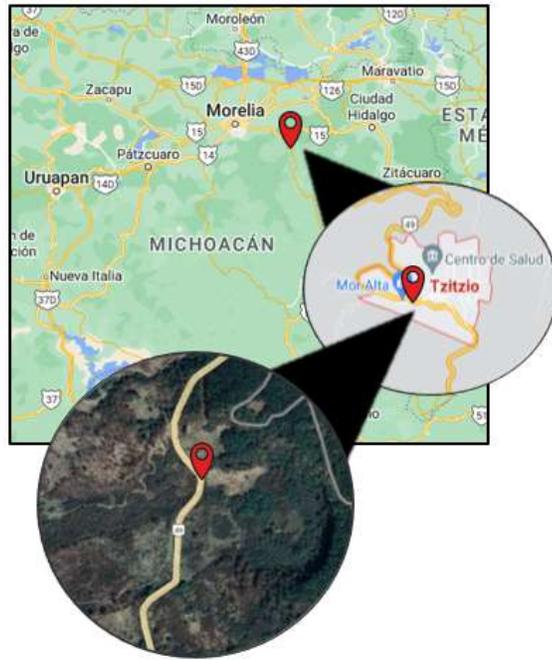


Figura 10. Ubicación de la zona de estudio.



Figura 11. Sección de la carretera afectada.

3.2. Perfil topográfico

Para llevar a cabo el perfil topográfico se realizó una visita a campo en donde se estudió el camino y por medio de fotografías se obtuvieron las coordenadas (ver Figura 12), las cuales posteriormente, se exportaron al programa computacional Google Earth para poder obtener el perfil en AutoCAD (ver Figura 13).



Figura 12. Estudio del terreno.

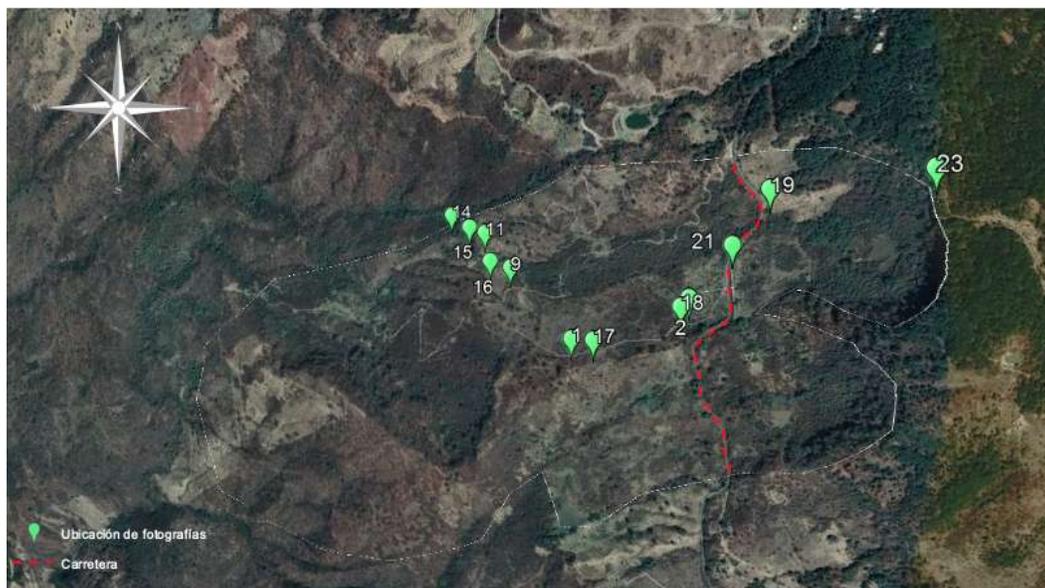


Figura 13. Puntos obtenidos del reconocimiento de zona en estudio.

3.3. Estudio geológico y geotécnico de la mesa de Tzitzio

Se considera que el estudio geológico de la región es de gran importancia, ya que en la actualidad se carece de información que permita evaluar la geología física de la zona y conocer detalladamente la evolución del área, así mismo, se obtuvo la información geológica del estudio realizado por Pola (2006).

El sector de Tzitzio forma parte de una extensión del elemento morfológico generado por conjuntos estructurales, denominado como Sierra Madre Occidental, la cual está limitada al sur por la Sierra Madre del Sur y superpuesta al norte por el Cinturón Volcánico Mexicano, así mismo está conformado por una combinación de varios elementos, tales como:

- a) Litológico: Una mesa de ignimbritas se encuentra descansando sobre arcillas provenientes de unidades volcánicas alteradas y de depósitos sedimentarios.
- b) Morfológicos: Existen contrastes morfológicos que condicionan la inestabilidad de varios tipos (Caídas de bloques de roca, flujos de suelo y expansiones laterales).
- c) Estructurales: Existen diferentes unidades, sometidas a varias fases de fracturamiento que posiblemente se correlacionan con la inestabilidad en la zona.
- d) Geomecánicos: Presencia de afloramientos para el estudio del macizo rocoso y arcillas comprometidas en flujos.
- e) Inestabilidad: Varios tipos PRM que afectan una de las vías principales de acceso a Tierra Caliente, activo y que está ocasionando pérdidas materiales anuales importantes.

3.4. Prospección geofísica

El tramo de la carretera Tzitzio-Temascal ha tenido problemas de movimiento en la carpeta asfáltica ya que se ha recubierto en varias ocasiones y el problema no se soluciona. Históricamente se han presentado movimientos o deslizamientos de las capas que conforman el talud de esta ladera, por lo tanto, con la llegada de las lluvias se desliza con mayor facilidad, por esta razón se hace necesaria la ejecución de estudios geofísicos para determinar las características estratigráficas y estructurales de la zona afectada y poder poner solución a esta problemática.

Con la finalidad de estimar las condiciones de subsuelo bajo la zona en estudio, se llevó a cabo un estudio geofísico indirecto de carácter eléctrico, denominado Geoeléctrico bajo la modalidad de Tomografía de Resistividad Eléctrica siguiendo la siguiente metodología:

1. **Implementar líneas de tomografía:** Inyectar una corriente eléctrica y mediante un dispositivo receptor observar la respuesta del subsuelo, siendo el resultado, datos de resistividades aparentes.
2. **Construcción de secciones geoeléctricas:** Sección en dos dimensiones que muestra una primera aproximación de los cambios en el subsuelo.
3. **Distribución real de resistividades:** Obtener una imagen que será un resultado interpretable desde un punto de vista físico y geológico, y que dará información sobre las características físicas del subsuelo (Griffiths, 1993).

3.4.1. Sondeo eléctrico vertical

La geología local de la zona de estudio se presenta en un ambiente de rocas ígneas extrusivas de tipo ácido como son las riolitas, las cuales se presentan en grandes fragmentos de hasta 5 m de diámetro derivados del desprendimiento de la zona alta de la meseta denominada Tzitzio y que se combinan con fragmentos de roca de menor dimensión intercalando en el subsuelo con tobas arenosas de la misma composición litológica.

El estudio geofísico consiste en aplicar el método de Tomografía de Resistividad Eléctrica ERT (Electrical Resistivity Tomography) para determinar las características estratigráficas del suelo. Dicho método permite investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente (Dahlin, 2001).

El equipo SuperSting R1/IP utilizado para el desarrollo del Sondeo Eléctrico Vertical se conforma de una consola la cual consta de un amperímetro y voltímetro, con un procesador para tomar las lecturas directas, dos fuentes de energía externa, cuatro carretes de cable monopolar (dos de corriente y dos de potencial), cuatro electrodos de acero inoxidable, una brújula, un geoposicionador satelital (GPS) y demás equipo de apoyo (ver Figura 14).



a) Equipo de resistividad SuperSting R1/IP

b) Electrodo SuperSting

Figura 14. a) Equipo de resistividad SuperSting modelo R1/IP, b) Electrodo SuperSting modo dual de acero inoxidable (Gómez Nicolás , 2014).

3.5. Modelación numérica

La modelación será realizada con el apoyo del paquete de software especializado denominado Rocscience®, del cual se utilizarán los softwares Slide y RS2.

El programa Slide está diseñado especialmente para el análisis de estabilidad de taludes. Se basa, principalmente, en el uso del método de equilibrio límite y permite modelar suelos homogéneos y estratificados, con superficies geométricas complejas, permite analizar la estabilidad del talud bajo diferentes modelos, tales como los propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer y Morgenstern-Price, entre otros.

El programa RS2 está diseñado específicamente para la estimación y representación matemática de modelos constitutivos del suelo para el modelado numérico posterior.

Debido a lo anterior, se analizará la información disponible, para tratar de representar lo mejor posible las condiciones de campo, en un modelo de análisis de elemento finito, generando una estratigrafía propuesta a partir de los sondeos previamente realizados y en base a ella realizar los análisis de estabilidad para obtener los factores de seguridad de la ladera.

Las condiciones por evaluar en las simulaciones 2D serán: (1) la estratigrafía con los parámetros de los materiales obtenidos de investigaciones pasadas y (2) la estratigrafía sujeta a valores de lluvia.

Por último, se generará una conclusión acerca de las condiciones de la ladera y los factores de seguridad obtenidos, de las diferentes condiciones evaluadas.

3.5.1. Parámetros utilizados con el criterio de Mohr-Coulomb

Se consideró que el conjunto de actividades que permiten obtener la información del terreno necesaria, se apoya en base a un conjunto de técnicas y conocimientos geológicos, ensayos de laboratorio e interpretación. Así mismo, los parámetros que se agregaron al modelo para la arena y arcilla se obtuvieron mediante la investigación de Martínez (2020), en la cual se realizaron pruebas de caracterización geotécnica, mencionado en el capítulo 1, apartado 1.1.2, arrojando los parámetros de peso específico, cohesión y el ángulo de fricción.

3.5.2. Parámetros utilizados con el criterio de Hoek-Brown

Los parámetros que se agregaron al modelo para la secuencia intrusiva, secuencia andesítica, flujo piroclástico y toba se obtuvieron mediante un estudio llevado a cabo por Hoek E. (1997), con el fin de obtener resistencias equivalentes en términos de peso específico, UCS, m y s , mediante el índice geológico de resistencia, posteriormente, se pueden calcular los parámetros que definen las características de resistencia del macizo rocoso de la siguiente forma:

$$m_b = m_i \times \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \quad (11)$$

Para un $GSI \geq 25$, o sea en el caso de macizos rocosos de una calidad no peor que mala, se aplica el criterio original de Hoek-Brown de la siguiente manera :

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad (12)$$

$$a = 0.5 \quad (13)$$

Capítulo IV. Resultados, Análisis y Modelación

En este capítulo se presentó una breve recopilación de la información disponible sobre la zona de estudio, enfocándose en las investigaciones realizadas por Pola (2006), Chávez (1998) y Martínez (2020), lo cual serviría como base para los análisis a realizar. Evaluando el marco geológico-geotécnico para la conformación del modelo geológico, completado con la elaboración de los sondeos geoelectricos verticales se obtuvieron las características estratigráficas del subsuelo.

Se muestra también, un análisis del tipo equilibrio límite en la ladera en estudio en el programa Slide, así como también el análisis en el programa RS2, con la técnica de reducción de esfuerzos de donde se puede derivar el comportamiento del suelo, con los desplazamientos y deformaciones que se generan.

Con base en lo anterior, se pretende llevar a cabo el análisis del movimiento y de esta manera concluir cuales son los factores desencadenantes del movimiento.

En la investigación bibliográfica se logró obtener teoría básica sobre la estabilidad de taludes, así mismo, al estudiar el comportamiento del talud, se determinó que este material cuando es sometido ante mecanismos de activación como son la lluvia, sismo, etc., se ha demostrado que generan fallas provocando diferentes problemáticas (movimientos de ladera, erosión, colapso de caminos, etc.) Los parámetros de resistencia al corte efectivos (cohesión y ángulo de fricción interna) se emplean para describir su comportamiento.

4.1. Perfil topográfico

De los mapas topográficos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1997) se extrajo la fotogrametría de la zona en estudio, de donde se obtuvieron las curvas de nivel, con las cuales se trazó el perfil topográfico longitudinal en el programa computacional AutoCAD (ver Figura 15), teniendo una elevación máxima de 2049.54 msnm y una elevación mínima de 1611.93 msnm, en 2505.86 m horizontales. De acuerdo con el cadenamiento establecido para el perfil longitudinal, la carretera se ubica en el km 0+940 con una elevación de 1941.29 msnm (ver Figura 16).

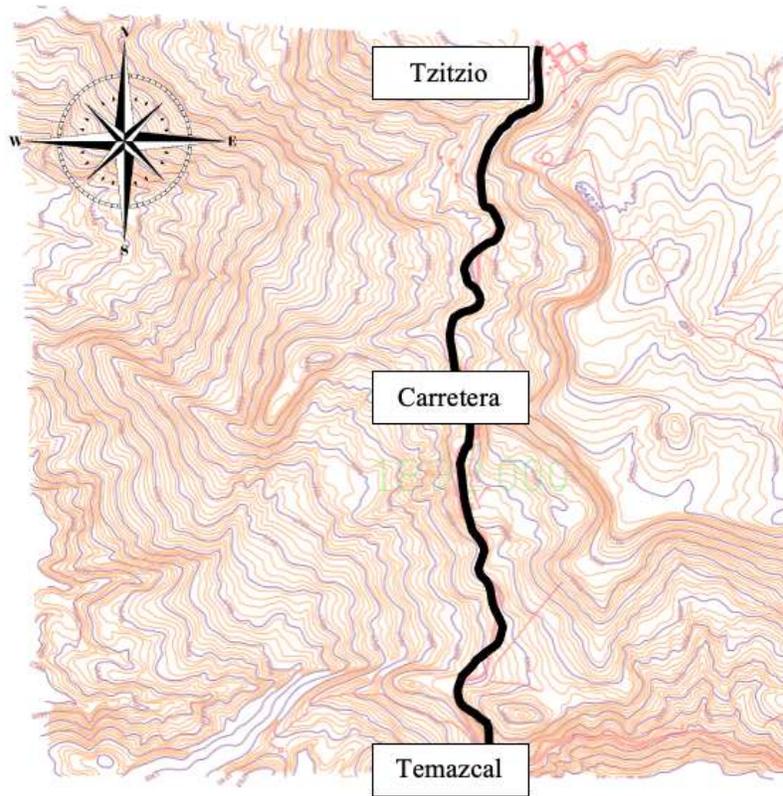


Figura 15. Restitución apoyada en carta topográfica del INEGI con escala 1:5000.

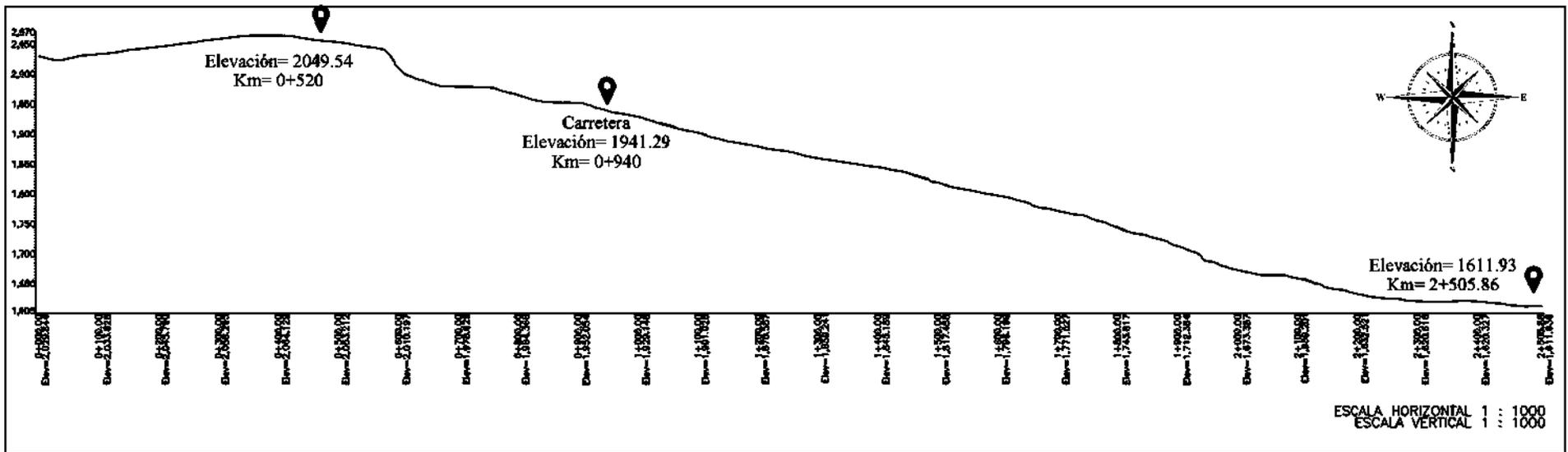


Figura 16. Perfil longitudinal con escala 1:1000 obtenido de AutoCAD.

4.2. Estudio geológico

El área delimitada por las coordenadas 291000 este, 2172000 norte y 301000 este en proyección UTM, de la carta topográfica número E14A24 (Tzitzio), se obtuvo de la investigación realizada por Pola (2006) referenciado en el apartado 1.1.2. Se logró como resultado una erosión transversal activa que corta dos grandes secuencias, conformado por flujo piroclástico, secuencia andesítica y secuencia intrusiva (ver Figura 17). A continuación, se describe las unidades mostradas en el mapa geológico.

- Flujo Piroclástico: esta unidad se encuentra en la cima de la columna litológica en la zona norte del mapa geológico, con una elevación que va desde 1950 hasta 2050 m.s.n.m. La unidad está conformada por grandes paquetes de ignimbritas vítreas muy compactadas de color blanco, con fragmentos subangulosos de andesitas y estructuras de fiammes hasta la cima.
- Secuencia Intrusiva: esta unidad se encuentra en el centro de la columna litológica, con una elevación que va desde 1750 hasta 1950 m.s.n.m. La unidad se presenta en forma de diques tabulares, sills y domos que conforman lomeríos.
- Secuencia Andesítica: esta unidad se encuentra al final de la columna litológica, con una elevación que va desde 1300 hasta 1750 m.s.n.m. Islas et al, (1989) definen esta unidad como el inicio del volcanismo en el sector de Tzitzio, el cual cubre de forma discordante a la unidad de las capas rojas.

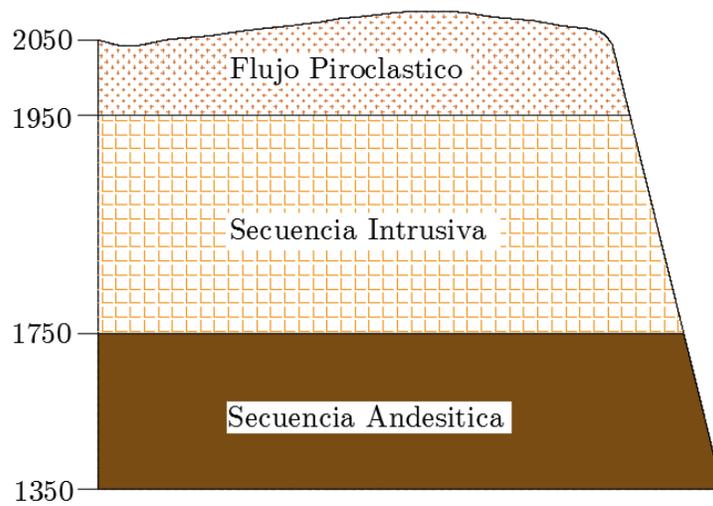


Figura 17. Columna litológica de la zona de estudio con unidad de M.S.N.M (Adaptado de Pola Villaseñor, 2006).

Para los valores utilizados en la Tabla 4 se obtuvieron mediante un estudio realizado por (Hoek & Brown, 1997), explicado en el capítulo 3, apartado 3.5.2.

Tabla 4. Parámetros del macizo rocoso con el criterio de Hoek-Brown (Hoek E. , 2007).

<i>Material</i>	<i>Peso específico (kN/m³)</i>	<i>UCS (kPa)</i>	<i>m</i>	<i>s</i>
Secuencia intrusiva	27.21	208.3913	4.25	0.02
Secuencia andesitica	22.31	256.8762	7.25	0.062
Flujo piroclástico	20.59	208.3913	4.5	0.02
Toba	20	29000	15.6	0.02

4.3. Estudio geotécnico

La clasificación de la zona de estudio se obtuvo con ayuda de los sondeos realizados por Martínez (2020), referenciado en el apartado 1.1.2, tomando los valores obtenidos in situ y en laboratorio para los materiales de arena y arcilla por medio de las pruebas de peso volumétrico, contenido de agua, análisis granulométrico, límites de consistencia y corte directo en suelos llevado a cabo con el criterio de falla de Mohr-Coulomb, (ver Figura 18). A continuación, se describe las unidades mostradas en el perfil topográfico.

- Arena: esta unidad se encuentra en la capa superficial del perfil topográfico, con una elevación que va desde 1916 hasta 2012 m.s.n.m. La unidad está conformada por arenas que intercalan con lentes de arcilla.
- Arcilla: esta unidad se encuentra en el centro de el perfil topográfico, con una elevación que va desde 1871 hasta 1916 m.s.n.m. La unidad está conformada por sedimentos arcillosos formados por la erosión y deslizamientos de masas a partir de la desintegración de unidades volcánicas.
- Toba: esta unidad se encuentra al final del perfil topográfico, con una elevación que va desde 1789 hasta 1871 m.s.n.m. La unidad esta conformada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos expelidos a partir de la desintegración de unidades volcánicas.

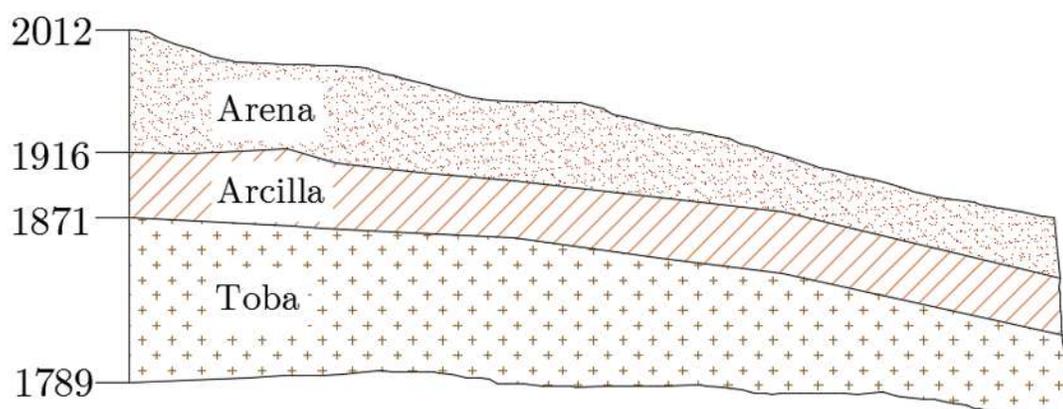


Figura 18. Clasificación de la zona de estudio con unidad M.S.N.M (Adaptado de Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).

Para los valores utilizados en la Tabla 5 se obtuvieron mediante la investigación realizada por (Martínez Rojas, 2020) mencionado en el capítulo 3 en el apartado 3.5.1.

Tabla 5. Parámetros del suelo con el criterio de Mohr-Coulomb (Martínez Rojas, 2020)

<i>Material</i>	<i>Peso específico (kN/m³)</i>	<i>Cohesión (kPa)</i>	<i>Phi (°)</i>
Arena	15.99	18.14	36
Arcilla	15.89	8.27	17.22

4.4. Estudios geofísicos

Con la finalidad de estimar las condiciones del subsuelo bajo la zona en estudio, se llevó a cabo un estudio geofísico indirecto de carácter eléctrico, denominado geoelectrico bajo la modalidad de tomografía eléctrica, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3, apartado 3.4 (ver Figura 19).



Figura 19. Equipo utilizado para tomografía eléctrica.

4.4.1. Estudio geoelectrico en 1998

Chávez (1998), realizó 6 sondeos geoelectricos verticales (sev's) ubicados estratégicamente en campo dentro del sitio de interés, con los cuales se construyeron dos secciones con orientación paralela a la carretera que queda en medio de las secciones como se muestra en la Figura 20 de ubicación de SEV's, posteriormente, se construyeron las secciones isorresistivas con los datos de campo. El análisis de la morfología de las curvas de resistividad se realizaron con el apoyo del programa "Surfer", así como también se utilizó el programa "Resixp" para construir las secciones geoelectricas.

La sección No. 1 se desarrolló con los sondeos 1, 2 y 3 quedando al límite oriente de la carretera con orientación N-S, mientras que la sección No. 2, se desarrolló con los sondeos 6, 5 y 4 quedando al oeste de la carretera con orientación N-S.

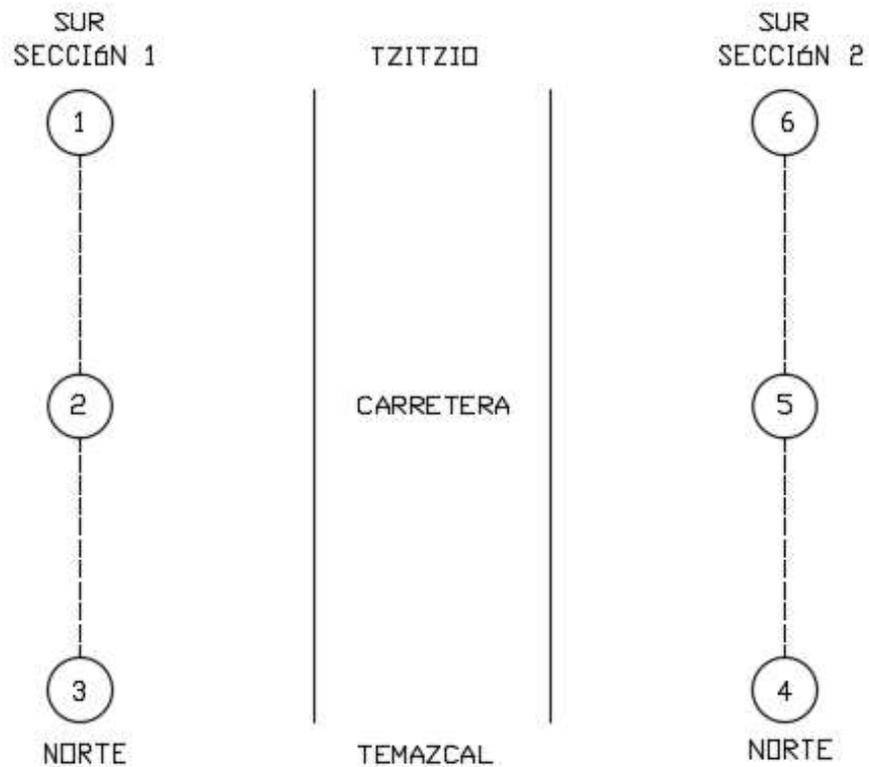


Figura 20. Croquis de localización de sondeos y secciones (Chávez, 1998).

a) Sección geoelectrica No.1

En el estudio previamente realizado por Chávez (1998), se detectaron valores electricos de 23 a 401 ohm-m, contando con capas superficiales constituidas por gravas y arenas con un espesor menor de 2 m; subyacente a esta capa se detectó un estrato de arcilla arenosa con un espesor variable de 5 a 15 m con una resistividad de 13 a 24 ohm-m, por ultimo en la base de la seccion se detecto la capa rocosa correspondiente a roca ígnea con valores electricos de 1638 a 92 ohm-m. En la Figura 21 se observa la conformación de los resultados obtenidos del sondeo geoelectrico vertical (sev's).

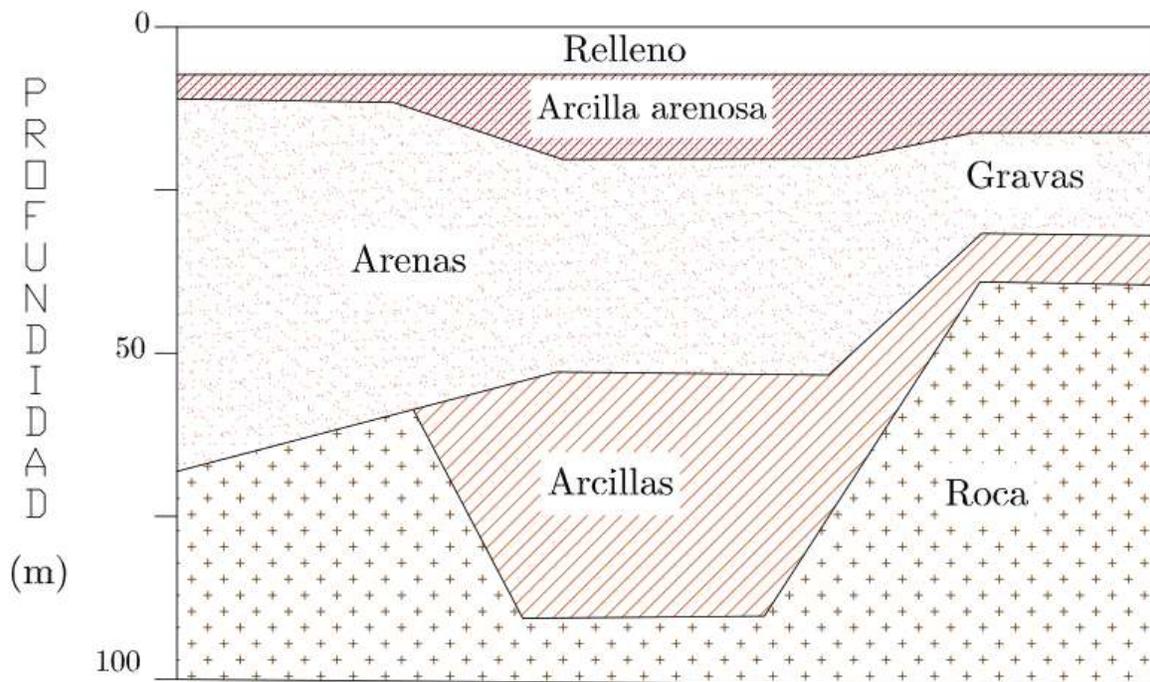


Figura 21. Estrato conformado por los materiales obtenidos de SEV1 (Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).

b) Sección geoelectrica No.2

Se encontraron capas superficiales constituidas por gravas, arenas y arcillas con un espesor menor de 2 m, teniendo valores electricos de 2 a 130 ohm-m; subyacente a esta capa se detectó un estrato de arcilla arenosa con un espesor variable de 16 a 60 m con una resistividad de 112 a 0.144 ohm-m, por ultimo en la base de la seccion se detecto la capa rocosa con valores electricos de 132 ohm-m correspondiente a roca ígnea. En la Figura 22 se observa la conformación de los resultados obtenidos del sondeo geoelectrico vertical (sev's).

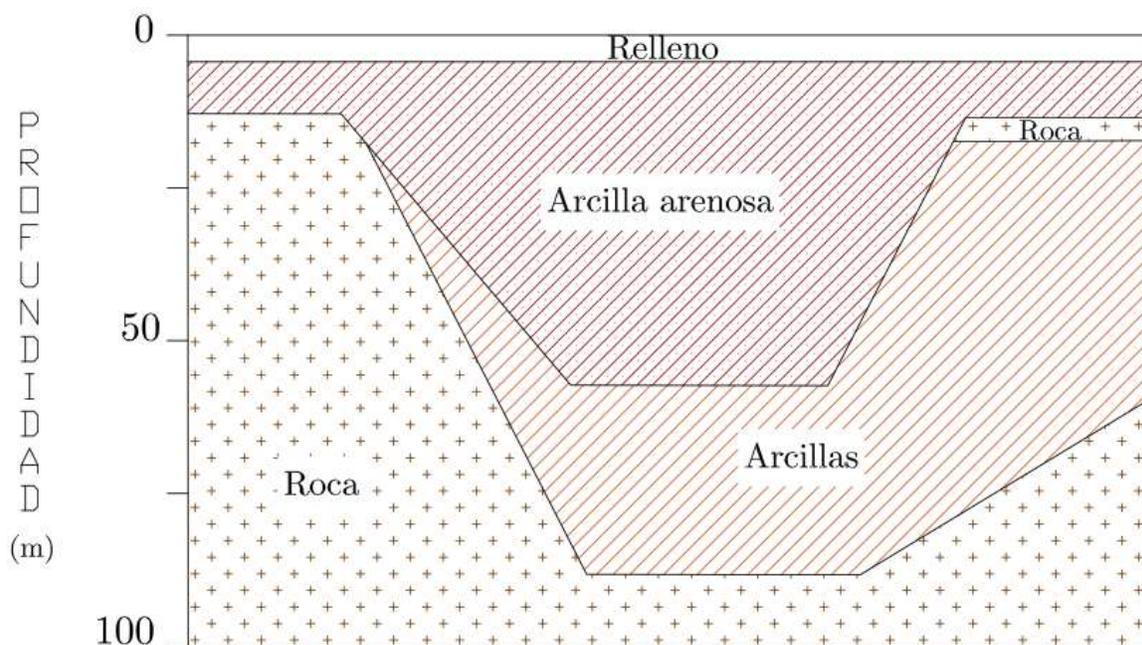


Figura 22. Estrato conformado por los materiales obtenidos de SEV2 (Tosca Delgado & Chávez Negrete, 1998).

Al finalizar el estudio se encontró que la estratigrafía se encuentra conformada a base de arcilla arenosa con gravas y en la base roca de tipo ígneo extrusivo.

4.4.2. Estudio geoelectrico en 2022

Para conocer las condiciones más recientes del subsuelo, se realizaron dos sondeos eléctricos verticales (SEV's) a una profundidad de 120 m, con el fin de estudiar las

características estratigráficas del subsuelo. Así mismo, se correlacionó la información recabada en campo con la información obtenida con anterioridad de la zona.

Los sondeos ejecutados con el método geoelectrico de resistividades (ver Figura 23) se realizan mediante la norma NRF 011 CFE 2004, utilizando el arreglo tetrapolar tipo Schlumberger simétrico, con espaciamiento máximo entre electrodos de corriente $AB/2=230$ m, fue el valor máximo permitido por el terreno.



Figura 23. Estudio geoelectrico realizado en uno de los puntos de estudio.

Las coordenadas UTM obtenidas de los dos sondeos realizados se muestran en la Tabla 6, así mismo, en la Figura 24 se observa la ubicación geográfica de los puntos extraídos del programa computacional Google Earth Pro.

Tabla 6. Coordenadas UTM de SEV'S.

<i>SEV No.</i>	<i>Eje X</i>	<i>Eje Y</i>	<i>Elevación msnm</i>
1	295, 738	2, 169, 112	1901
2	295, 606	2, 169, 135	1877



Figura 24. Ubicación de los sondeos geoelectricos verticales (SEV's).

Mediante el análisis de la curva de resistividad y su representación en el perfil de resistividad aparente, la campaña geofísica consistió en la elaboración de 3 líneas de tomografía eléctrica, formando una línea continua con una longitud de 150 m, dentro del área de afectación del tramo (ver Figura 25), así mismo se correlacionó la información recabada en campo con información obtenida en la exploración geofísica superficial de la zona realizada por estudios anteriormente realizados en el área de estudio. A continuación, se muestran los resultados de cada línea.

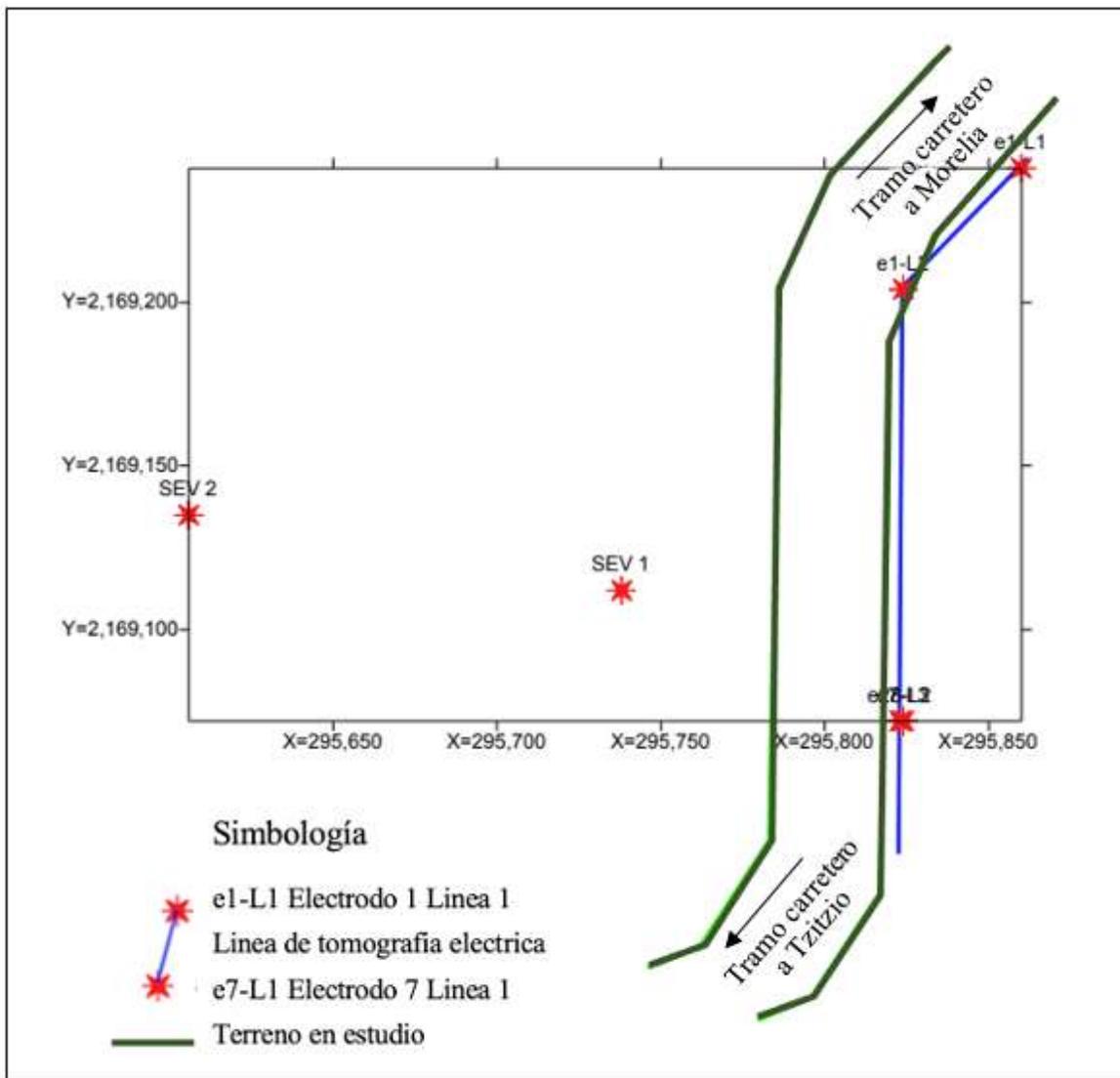


Figura 25. Ubicación de los trabajos de campo.

a) Sondeo Eléctrico No.1

Esta línea tiene su punto de origen con coordenadas UTM 14Q X=295, 378, Y=2, 169, 112, Z= 1901 msnm, con una orientación de SE-NW obteniendo una longitud total de 136 m entre los dos sondeos.

Se define una primer capa de relleno a base de fragmentos de roca en combinación con arenas y gravas en estado suelto y alcanzando una profundidad de 14 m en promedio, subyacente a esta capa se encuentran tobas arenosas con valor eléctrico de 20 a 25 ohm-m obteniendo una profundidad de 22 m en promedio, posteriormente, se encuentran unas arcillas con valor eléctrico de 13 y 6 ohm-m logrando una profundidad de 45 m, por último se encuentra material arenoso con un valor eléctrico de 18 ohm-m, alcanzando una profundidad de 70 m y se acuñan hacia el SEV 2 (ver Figura 26).

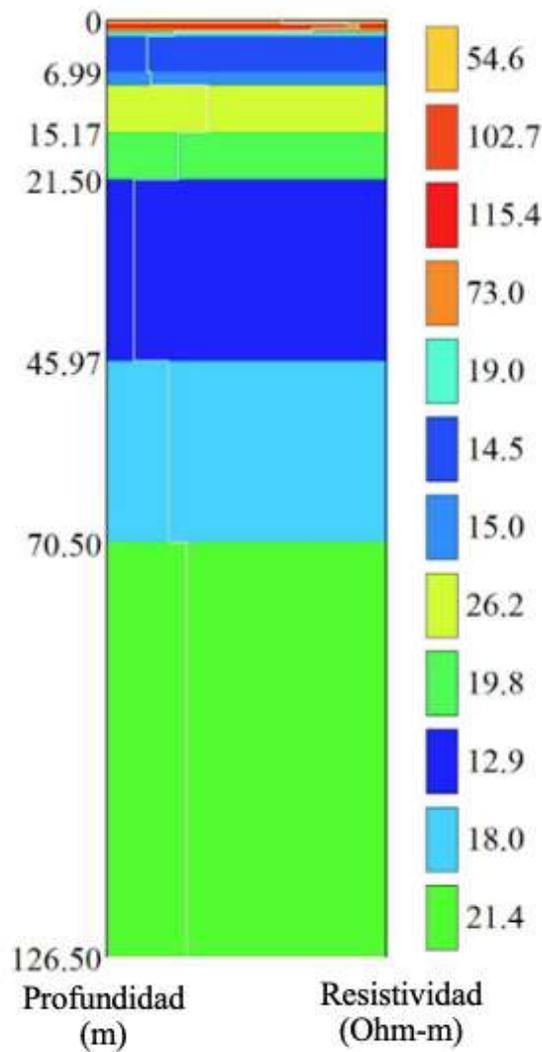


Figura 26. Perfil geoelectrico de SEV1.

Del resultado obtenido mediante la interpretación geológica del estudio geofísico se determinaron las 12 capas geoelectricas, constituida por arenas, gravas, arcillas y tobas, así mismo, se obtuvo su resistividad, espesor, profundidad y la elevación en la que se encontraba (ver Anexo 1 y Anexo 2).

b) Sondeo Eléctrico No.2

Esta línea tiene su punto de origen con coordenadas UTM 14Q X=295,606, Y=2, 169, 135, Z= 1877 msnm, con una orientación de SE-NW obteniendo una longitud total de 136 m entre los dos sondeos.

Se define una primer capa de relleno a base de fragmentos de roca en combinación con arenas en estado suelto y alcanzando una profundidad de 14 m en promedio, subyacente a esta capa se encuentran tobas arenosas con valor eléctrico de 20 a 25 ohm-m obteniendo una profundidad de 79 m en promedio, posteriormente, se encuentra una ultima capa arenosa de 18 ohm-n de resistividad electrica que va desde 79 a más de 126 m (ver Figura 27).

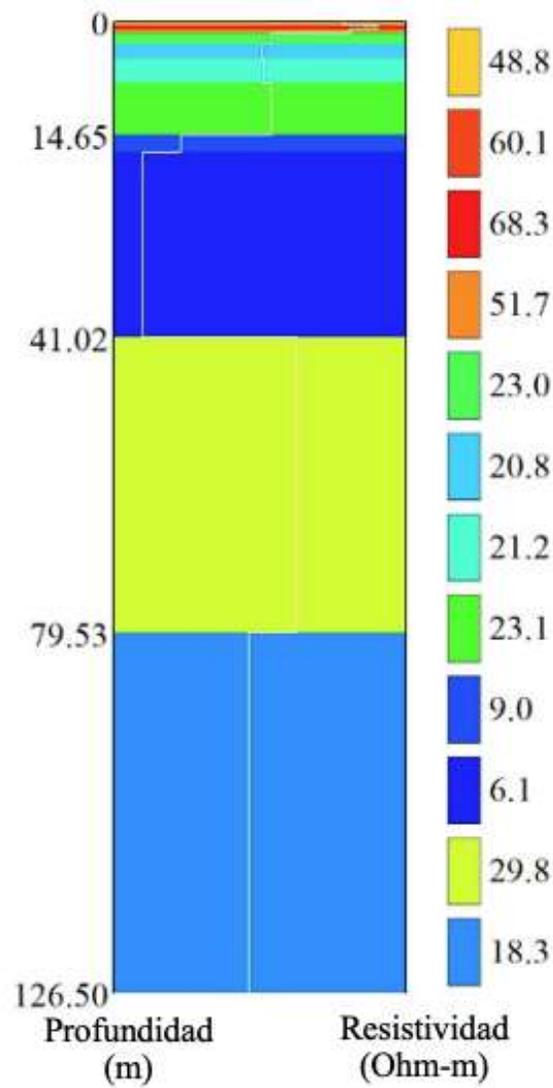


Figura 27. Perfil geoelectrico de SEV2.

Del resultado obtenido mediante la interpretación geológica del estudio geofísico se determinaron las 12 capas geoelectricas, constituida por arenas, gravas, arcillas y tobas, así mismo, se obtuvo su resistividad, espesor, profundidad y la elevación en la que se encontraba (ver Anexo 3 y Anexo 4).

4.4.3. Comparación de SEV's

Se realizó la comparación de los sondeos eléctricos verticales realizados en el año 1998 y 2022 en el programa computacional AutoCAD, esto con la finalidad de saber cuál fue el cambio del ambiente litológico y que condiciones geológicas presentó. La sección geoelectrica 1 y 2 tienen una elevación de 1946 y 1930 msnm respectivamente, mientras que el 3 y 4 tienen una elevación de 1901 y 1877 msnm respectivamente.

Se ubicaron los estudios sobre el perfil longitudinal mencionado en el apartado 4.1 con el objetivo de mostrarlos en un perfil, ya que cuentan con diferentes coordenadas, haciéndose la comparación del cambio que hubo del año 1998 a 2022, conformando la zona de estudio por materiales como arena, arcilla y toba (ver Figura 28).

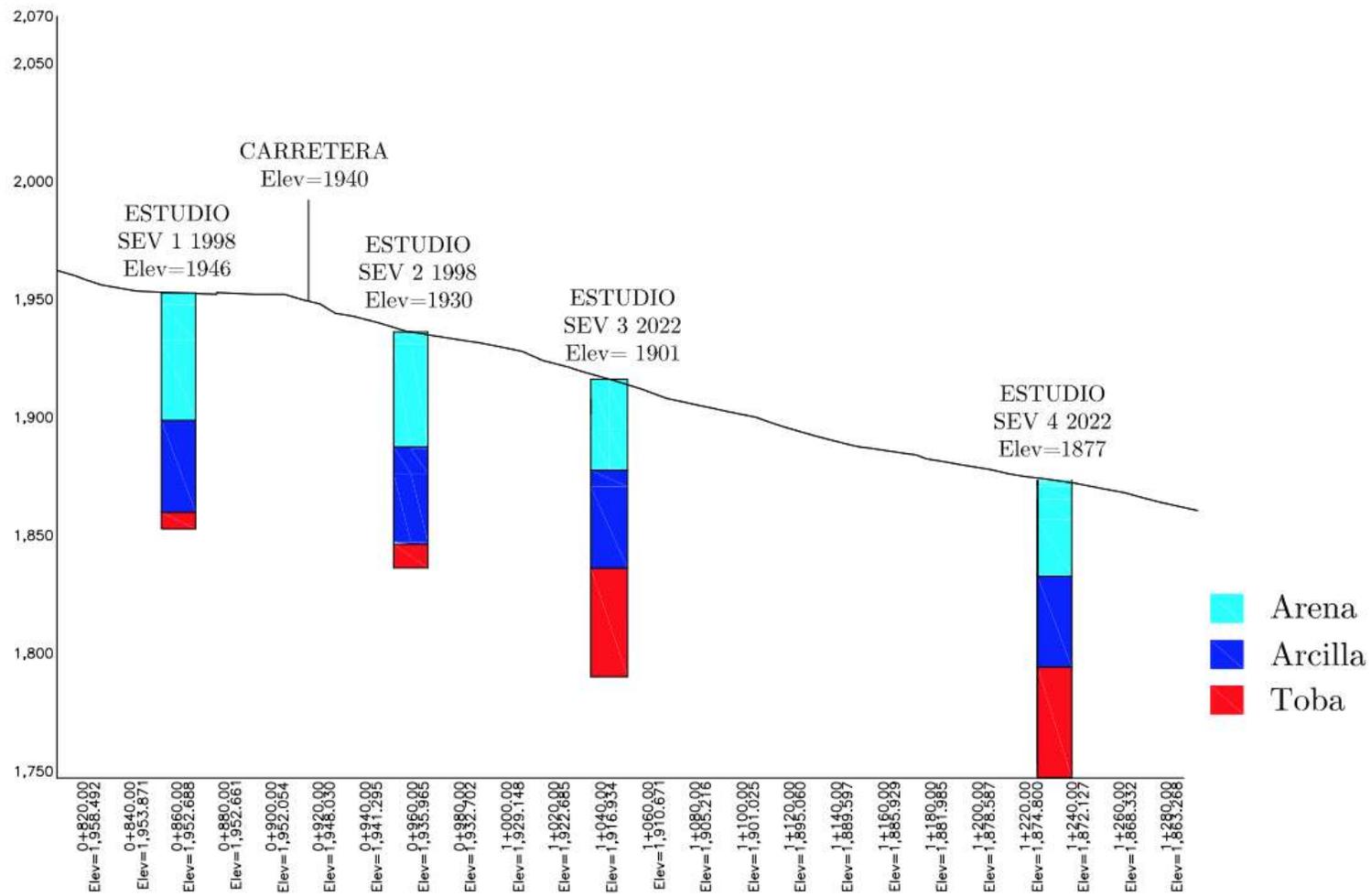


Figura 28. Ubicación de SEV's en un perfil longitudinal.

4.5. Conformación sección geotécnica

Para poder conformar el perfil topográfico, se estudió la información recabada por Pola (2006), quien obtuvo las alturas del material que se encuentra en la meseta de la ladera siendo el flujo piroclástico, secuencia intrusiva, secuencia andesítica y toba, así como también, su caracterización geológica. Se pudo obtener las resistencias equivalentes en términos de cohesión y ángulos de fricción, mediante las recomendaciones plasmadas por el estudio de Hoek E. (1997). Para complementar el perfil, con la ayuda de los sondeos realizados por Martínez (2020), se tomó los valores obtenidos in situ y en laboratorio para los materiales de arena y arcilla, por medio de las pruebas de peso volumétrico, contenido de agua, análisis granulométrico, límites de consistencia y corte directo en suelos, por lo tanto, la altura se obtuvo con el estudio geoeléctrico realizado en 2022 y con ayuda de un estudio previamente realizado por Chávez (1998) se pudo complementar, lo que nos permitió conocer cómo se encontraba recientemente la estratigrafía del suelo, con la finalidad de poder ajustar el perfil topográfico a la realidad.

En la Figura 29 se muestra la ladera completa con los estratos afinados, constituido por flujo piroclástico, secuencia intrusiva, secuencia andesítica, arena, arcilla y toba.

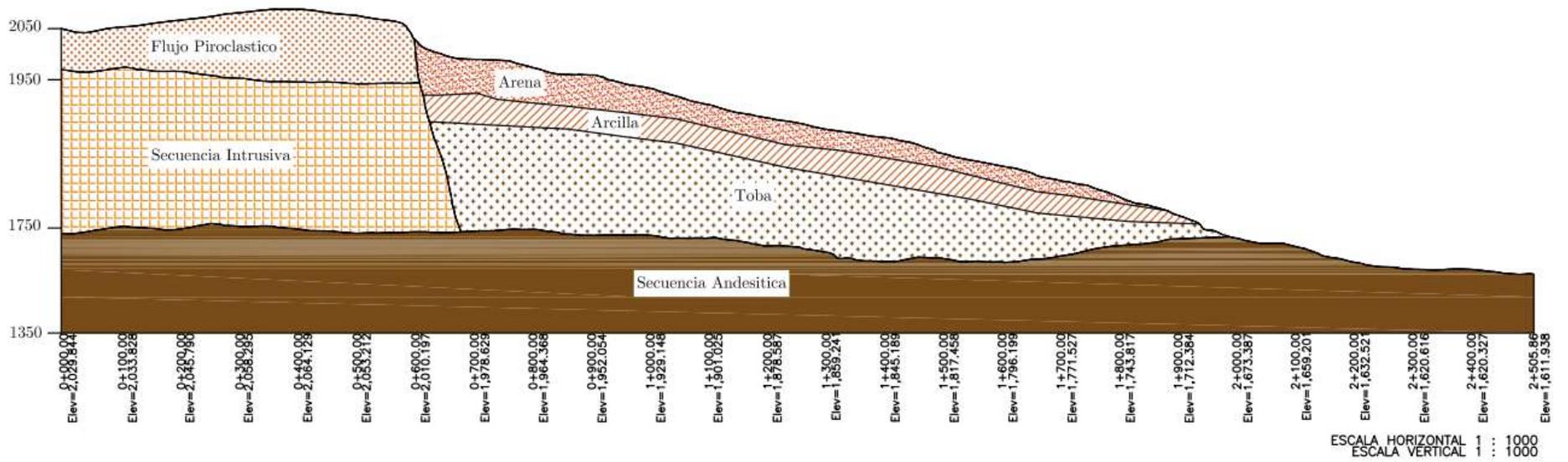


Figura 29. Distribución de estratos.

4.6. Modelación

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos de los programas computacionales Slide y RS2, mediante las simulaciones realizadas para cada caso de estudio y un análisis de estos. Para el estudio en RS2 se analizó el SRF crítico del modelo planteado y los esfuerzos principales, tanto vertical como horizontal, mientras que para el estudio en Slide, se determinó el factor de seguridad con el método de equilibrio límite y se realizó un análisis de sensibilidad.

4.6.1. Equilibrio límite

4.6.1.1. Determinación del factor de seguridad

Sobre la base de la información de investigación de campo y ensayos realizados para el análisis matemático del problema, se plantearon 2 modelos, considerando uno con nivel freático y el segundo sin nivel freático.

Se le asignaron las propiedades mecánicas para el modelado de la estabilidad del talud con los valores de los parámetros mencionados en el apartado Tabla 4 y Tabla 5, así mismo, se le agregó una polilínea de búsqueda de bloque la cual se especializa en un objeto de búsqueda, que le permite realizar fácilmente una búsqueda de superficie de falla no circular a lo largo de una capa débil conocida, utilizando solo un único objeto de búsqueda, por lo tanto, se le agregó en el área donde se encuentran los materiales que poseen comportamiento plástico con alto contenido de agua (ver Figura 30).

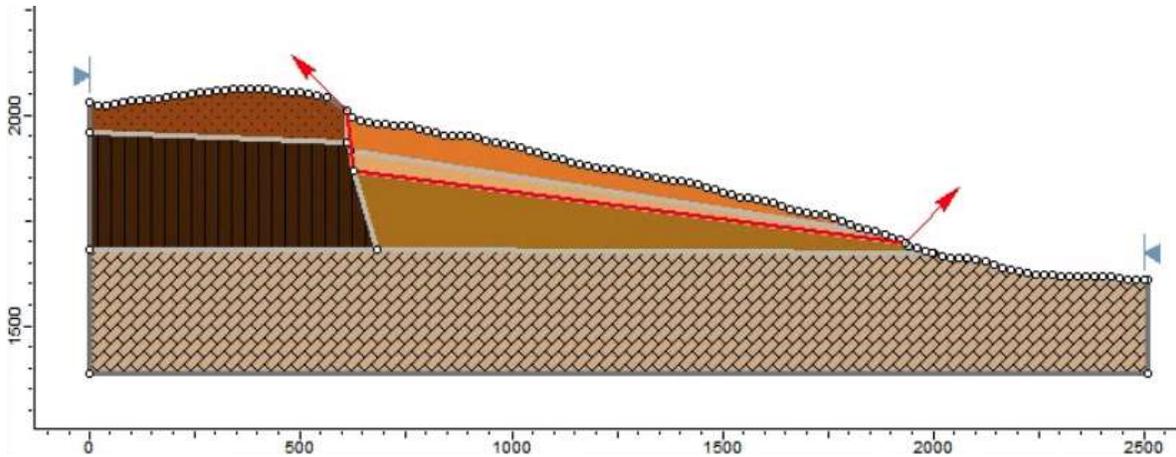


Figura 30. Estratigrafía de la ladera con polilínea de búsqueda de bloque en los materiales de arcilla, arena y toba.

El primer análisis que se realizó fue el de estabilidad general del talud en condiciones normales. Los métodos utilizados para el análisis presentado en esta sección fueron Bishop simplificado y Morgenstern-Price

Los resultados se presentan en la Figura 31, se puede observar que el factor de seguridad más bajo corresponde para la zona de la arcilla superficial con un factor de 1.21 con el método de Bishop simplificado.

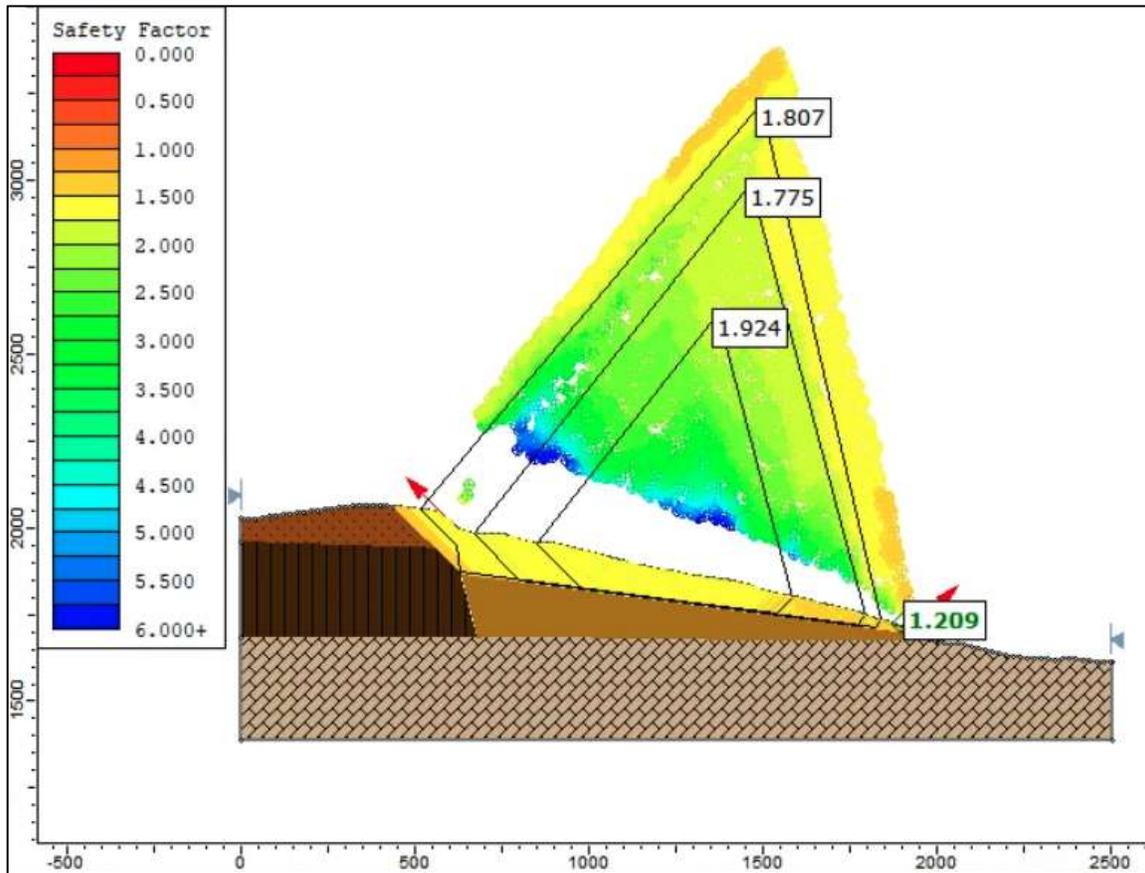


Figura 31. F.S. =1.21, obtenido en el perfil sin NAF con el metodo de Bishop simplificado.

Para el análisis con agua, se realizó con el método estadístico de nivel freático, el cual consiste en agregar una ubicación mínima y máxima del nivel freático dibujando la ubicación de los límites en el modelo, en la Figura 32 se muestran los límites teniendo como coordenadas el nivel máximo (W max) de 475.813, 2019.337 mientras que el nivel mínimo (W min) de 1994.417, 1617.728.

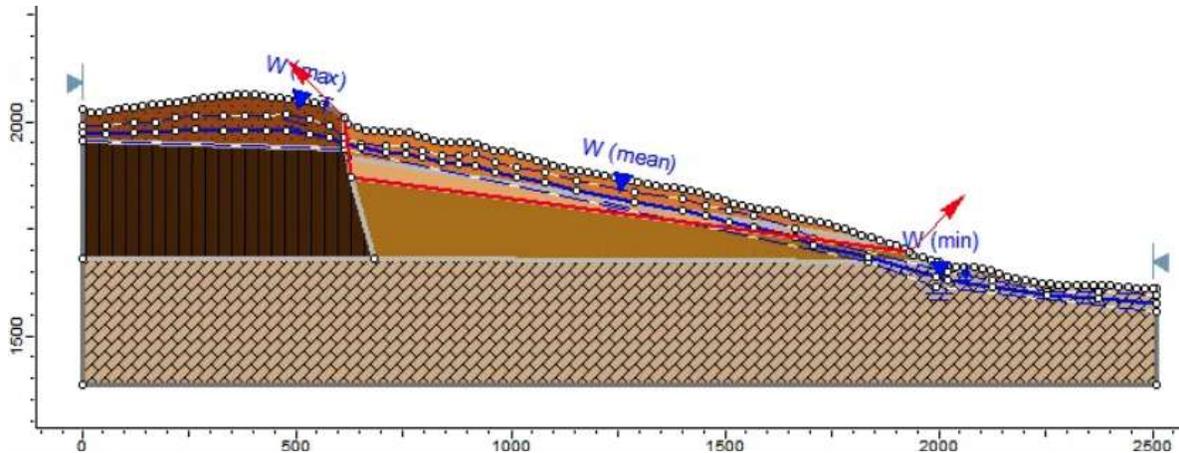


Figura 32. Estratigrafía de la ladera con niveles de agua mediante el método estadístico.

El segundo análisis que se realizó fue agregarle un nivel de agua freático al talud en condiciones normales. Los métodos utilizados para el análisis presentado en esta sección fueron Bishop simplificado y Morgenstern-Price.

Los resultados se presentan en la Figura 33, y se puede observar que el factor de seguridad más bajo corresponde para la zona de la arcilla superficial con un factor de 1.03 con el método de Bishop simplificado.

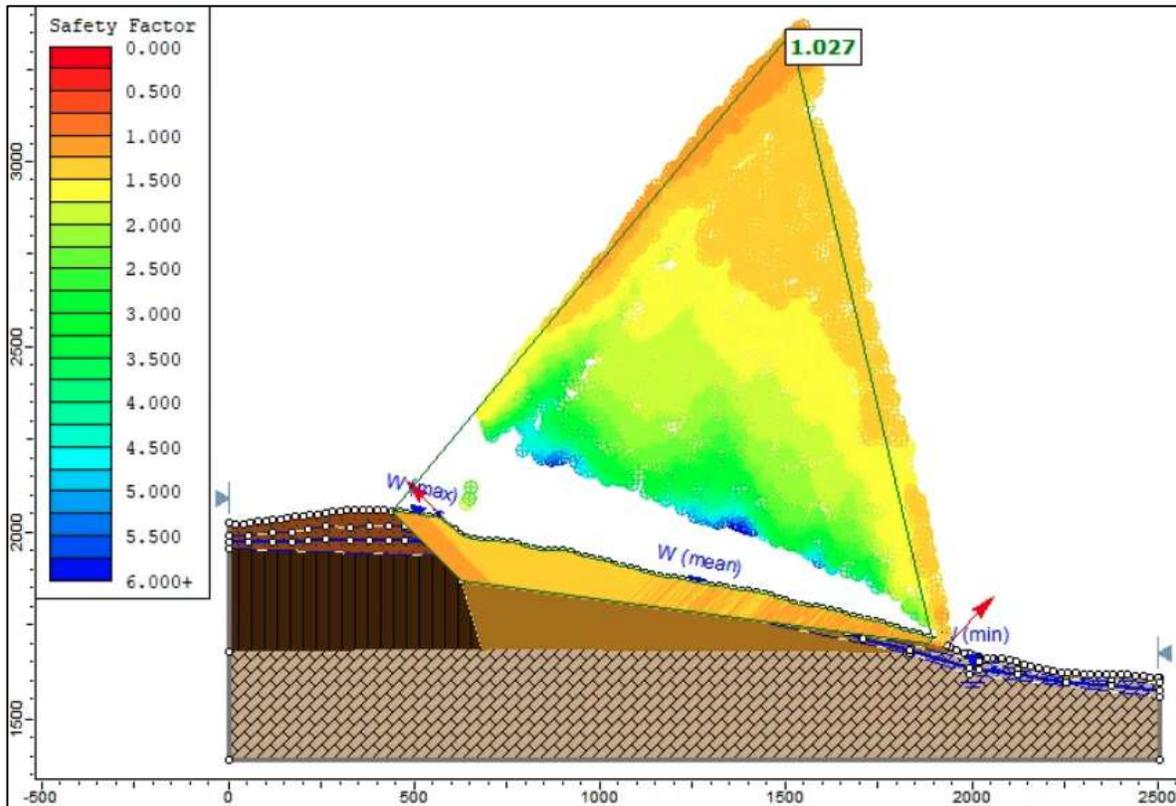
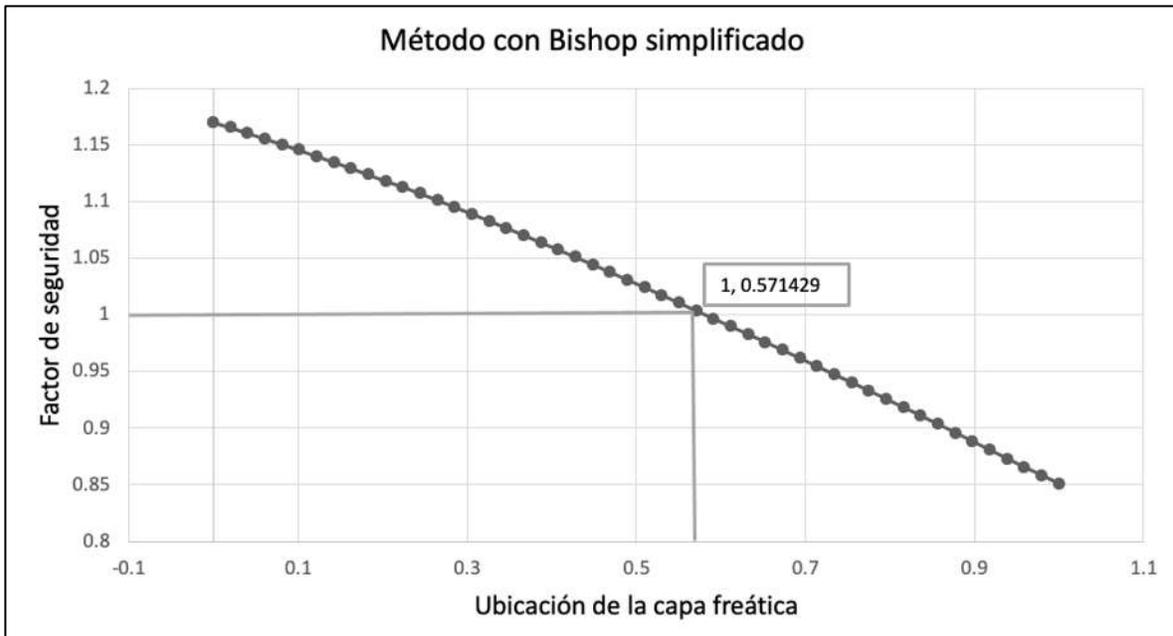


Figura 33. F.S. =1.03, obtenido en el perfil con nivel de agua freatico con el metodo de Bishop simplificado.

Mediante el estudio realizado por el análisis de sensibilidad agregándole el nivel de aguas freáticas con el método estadístico, se obtuvo una gráfica estadística en donde se compara el factor de seguridad contra el nivel de aguas freáticas, así mismo, nos podemos dar cuenta en qué momento el talud puede colapsar. En la Gráfica 1 se observa que cuando el factor de seguridad es igual a 1, la altura de porcentaje del nivel de agua freática se encuentra en 57.1429 %, lo que quiere decir que mientras más aumenta el porcentaje hay más riesgo de colapso por agua y el valor de factor de seguridad va disminuyendo gradualmente.



Gráfica 1. Análisis de sensibilidad mediante el metodo de Bishop simplificado con NAF.

Con las propiedades que se tienen de los estudios previamente mencionados, se observa que con el método de Bishop simplificado y Morgenstern-Price sin nivel de aguas freáticas el factor de seguridad es mayor a 1, mientras que con un nivel de aguas freáticas el factor de seguridad es cercano a 1, lo que quiere decir que hay un rango de amenaza alto.

Tabla 7. Comparación de los factores de seguridad de sin NAF y con NAF.

<i>Método</i>	<i>F.S. sin nivel de aguas freáticas</i>	<i>F.S. nivel de aguas freáticas</i>
Bishop simplificado	1.21	1.03
Morgenstern-Price	1.27	1.02

4.6.2. Strength reduction factor

Se realizó un modelo en el programa computacional RS2 ®, mediante el Strength Reduction Factor para poder comprender el comportamiento de la distribución de esfuerzos dentro del talud, reconocer zonas de concentración y relajación de estos y detectar puntos o zonas de inestabilidad.

4.6.4.1. Determinación del factor de reducción por resistencia (SSR)

El modelo se llevó a cabo con el tipo de deformación plana conformado por 6 tipos de materiales, los cuales se obtuvieron por estudios previos de Martínez (2020) y Pola (2006), siendo el flujo piroclástico, secuencia intrusiva, secuencia andesítica, arena, arcilla y toba, posteriormente, se le asignó a cada material los parámetros descritos en la Tabla 4 y Tabla 5 en el apartado 4.2 y 4.3 respectivamente. De igual manera, se estableció la opción de reducción de la resistencia al corte (SSR) en RS2, el cual permite realizar automáticamente un análisis de estabilidad de taludes de elementos finitos y calcular un factor crítico de reducción de la resistencia para el modelo, por lo tanto, el factor de reducción de la resistencia crítica es equivalente al factor de seguridad del talud. Así mismo, se obtuvo mediante el área de búsqueda de SSR el cual permite aplicar este análisis a una región en particular del modelo, siendo la zona donde se encuentra la arena, arcilla y toba siendo este el sector de interés (ver Figura 34).

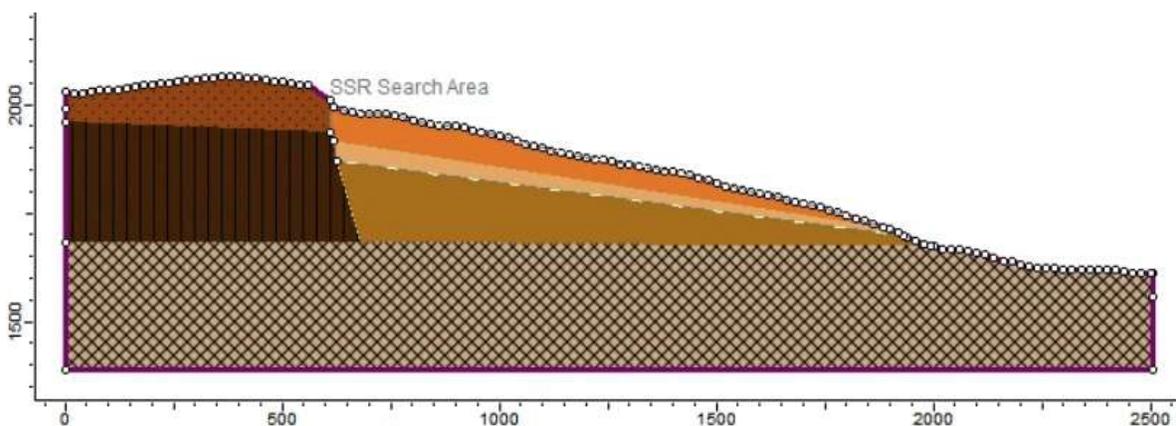


Figura 34. Estratigrafía de la ladera con la opción de área de búsqueda de SSR en el estrato donde se encuentra la arena, arcilla y toba.

Para formar el modelo como un elemento finito, se realizó un mallado uniforme con el tipo de elemento de 4 nodos cuadriláteros, dando este un resultado de 1213 nodos y 1119 elementos. Así mismo, para las condiciones de contorno de desplazamiento se le asignó en la base una restricción en Y, es decir, solo puede tener movimiento en dirección X. Así mismo, se le agregó una restricción en XY en los lados extremos y en la esquinas superiores e inferiores, es decir, se encuentra anclado, esto es con la finalidad de filtrar los desplazamientos que no son de interés y proporcionar un estado de referencia conocido (ver Figura 35).

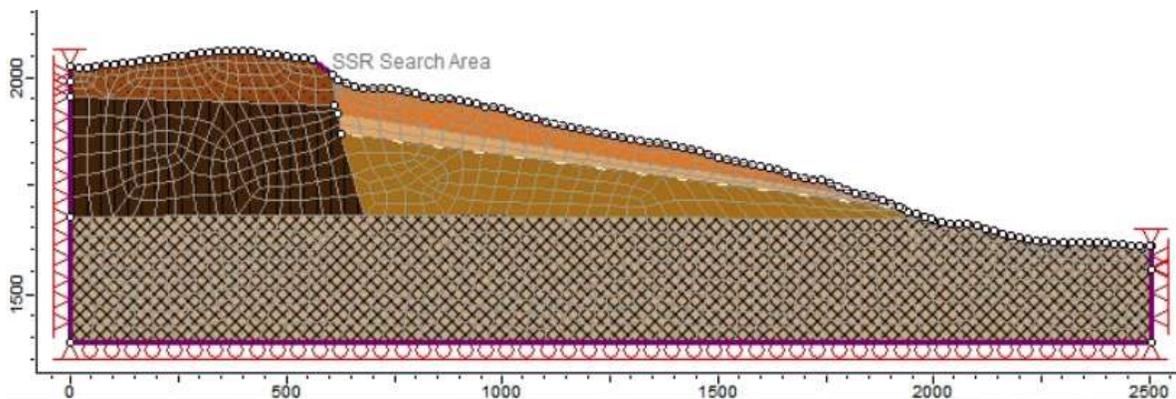


Figura 35. Mallado cuadrilátero y condiciones de contorno.

Para finalizar el análisis, se le agregó al modelo un valor de precipitación, el cual se adquirió mediante un estudio realizado por Martínez (2020), obteniendo como resultado una precipitación media anual de 215 mm, siendo Julio el mes más lluvioso del año. En base a esa precipitación, se convirtió el valor a una precipitación diaria, dando un resultado de 72.5 mm/día, por lo tanto, con la precipitación previamente mencionada, se le agregó al modelo esta condición de contorno hidráulica con la finalidad de obtener el análisis de filtración.

En la parte superior se le agregó el valor de la lluvia, mientras que en los extremos izquierda y derecha se estableció una altura total lineal de 1992.7 m y 1557.78 m, respectivamente, el cual permite definir condiciones de límite de altura total que varían linealmente a lo largo de un límite (ver Figura 36).

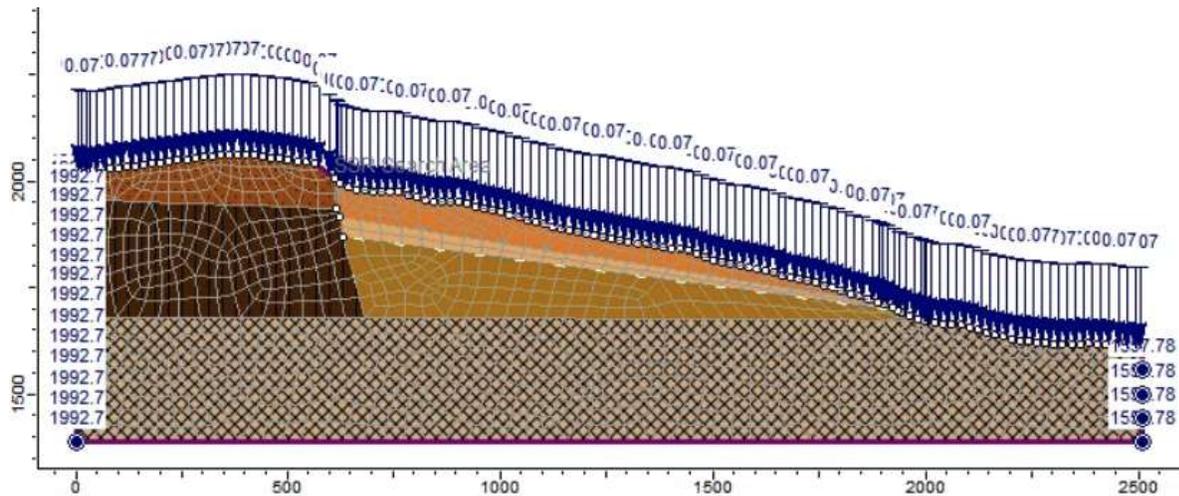


Figura 36. Valores de lluvia diaria y altura total lineal.

Se analizó el resultado de la presión del poro también conocida como la presión hidrostática, siendo un análisis drenado que usualmente se utiliza para suelos con grandes permeabilidades, como arenas o grava, o suelos bajo cargas a largo plazo, así mismo, se obtuvo con los valores de lluvia diaria con el valor de 72.5 mm/día. En la Figura 37, se puede observar que la línea morada representa el nivel de aguas freáticas, indicando su presencia con un SRF de 1.07.

Así mismo, la Gráfica 2, se obtuvo de la Figura 37 para poder obtener la gráfica de la presión del poro con un SRF=1.07 en la cual se muestra como la presión de agua en los poros va disminuyendo gradualmente, lo que indica que el agua genera una carga extra en el suelo, reduciendo la resistencia de los materiales que conforman la ladera, haciéndolos menos resistentes, ya que, el material arcilloso que se encuentra en la superficie tiene una gran capacidad de retención al estar en contacto con el agua, por lo tanto, como parte del suelo y por efecto de la lluvia, se convierte en un elemento favorecedor de inestabilidad.

Para entender mejor el desplazamiento que tiene el talud, se estudiaron los resultados de los desplazamientos horizontal y vertical absolutos, en donde se puede observar que el desplazamiento horizontal ocurre solo en la zona que se indicó con la opción de área de búsqueda, mostrando contornos de desplazamientos más altos (en color verde a rojo) en la zona donde se encuentran los materiales de arena y arcilla, con una longitud máxima de 5.32 m, en el cual solo se muestra el componente X del vector de desplazamiento total en cada nodo (ver Figura 38).

De la misma forma, en la Figura 39 se muestran los desplazamientos verticales que se encuentran concentrados mayormente en la zona del pie del talud con una altura máxima de 3.33 m, en donde solo se muestra la componente vertical del vector de desplazamiento total en cada nodo.

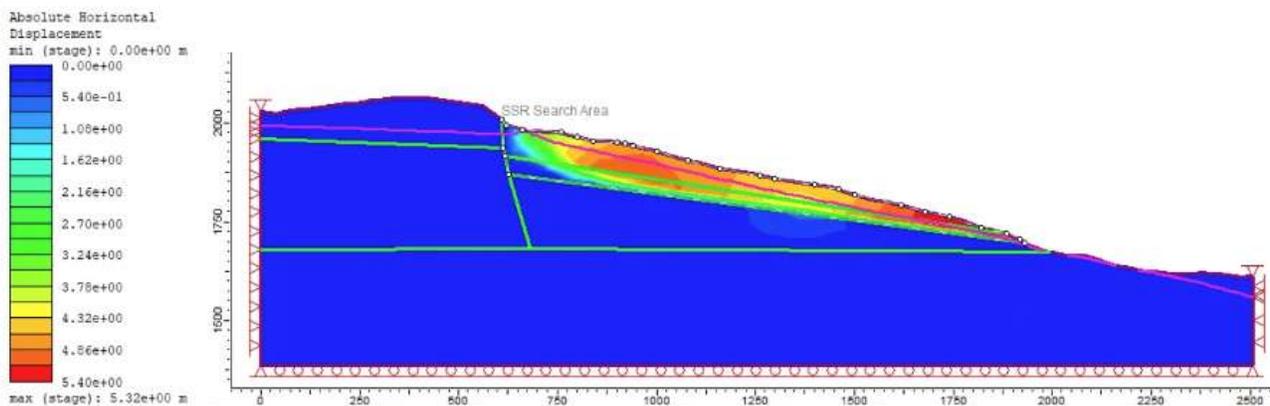


Figura 38. Desplazamiento horizontal con una longitud máxima de 5.32 m.

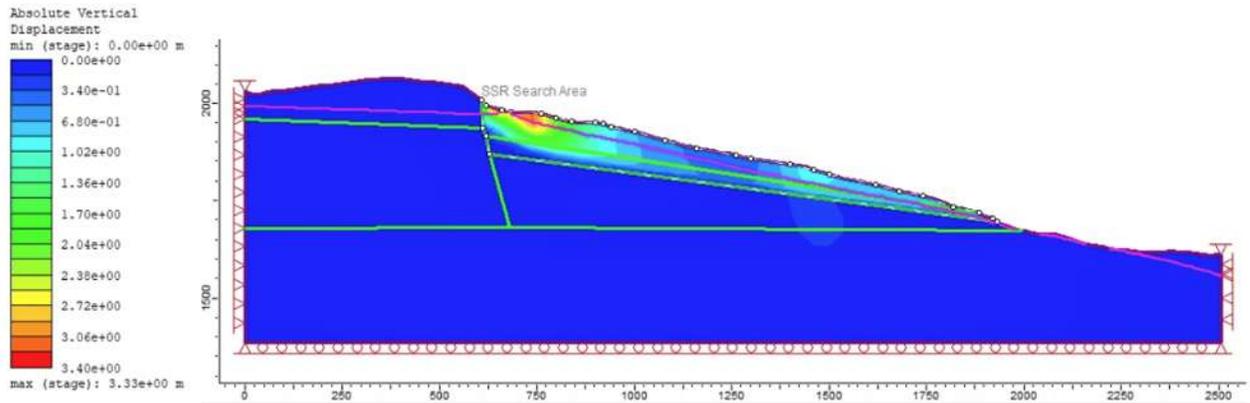


Figura 39. Desplazamiento vertical con una altura máxima de 3.33 m.

En la Figura 40, se muestran los desplazamientos totales obtenidos con el área de búsqueda, siendo los que generan diferentes condiciones de estabilidad, así mismo, se observa el desplazamiento total que se obtuvo en la zona del pie del talud, donde se encuentra el material de la arena y arcilla, siendo su valor de desplazamiento total máximo de 5.3629 m, dando un factor crítico de 1.07, el cual representa el último estado estable del talud.

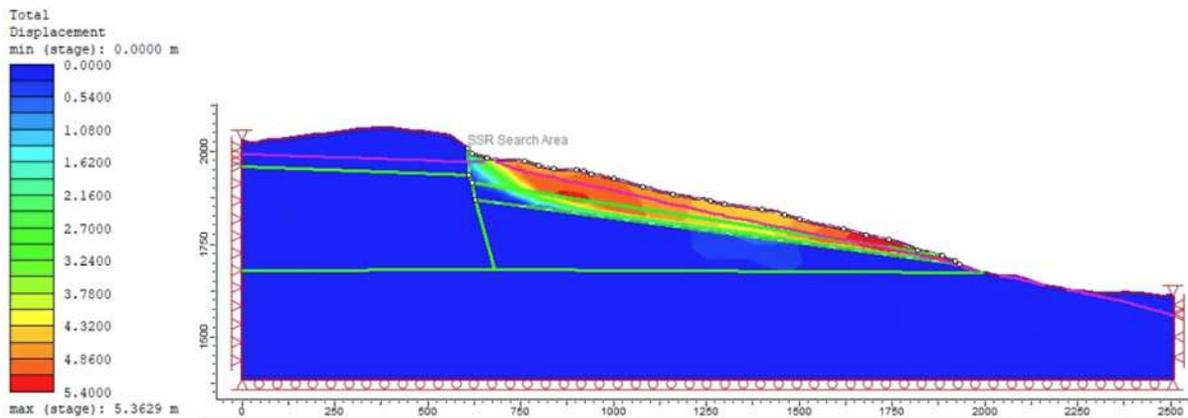


Figura 40. Desplazamiento total máximo de 5.3629 m.

Mediante los análisis realizados en el programa computacional RS2, se llevó a cabo una comparación de los factores de seguridad (SRF) sin nivel de aguas freáticas y con un valor de lluvia diaria, en donde el área de estudio sin nivel de aguas freáticas el SRF crítico dio un valor de 1.53 (ver Figura 41), lo que nos indica que el componente es capaz de soportar la carga real sin fallar, sin embargo, al momento de agregarle el valor de la lluvia diaria, el factor de seguridad crítico (SRF) dio un valor de 1.07 (ver Figura 42). Así mismo, para los casos estudiados, el talud es estable, lo que refleja que el talud no debe sufrir desplazamientos bajo las condiciones normales, es decir, cuando no se produzcan precipitaciones intensas, ya que, no dio un valor $FS > 1$. La estabilidad del talud en condiciones normales es adecuada y la zona más crítica se encuentra en la superficie, siendo los materiales de arena y arcilla los involucrados en la definición de su comportamiento.

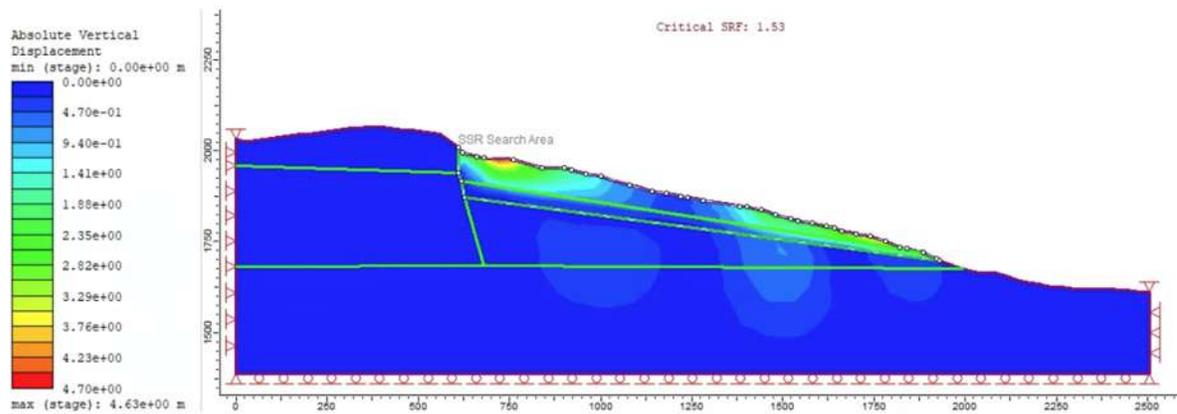


Figura 41. Desplazamiento vertical sin NAF con un SRF=1.53.

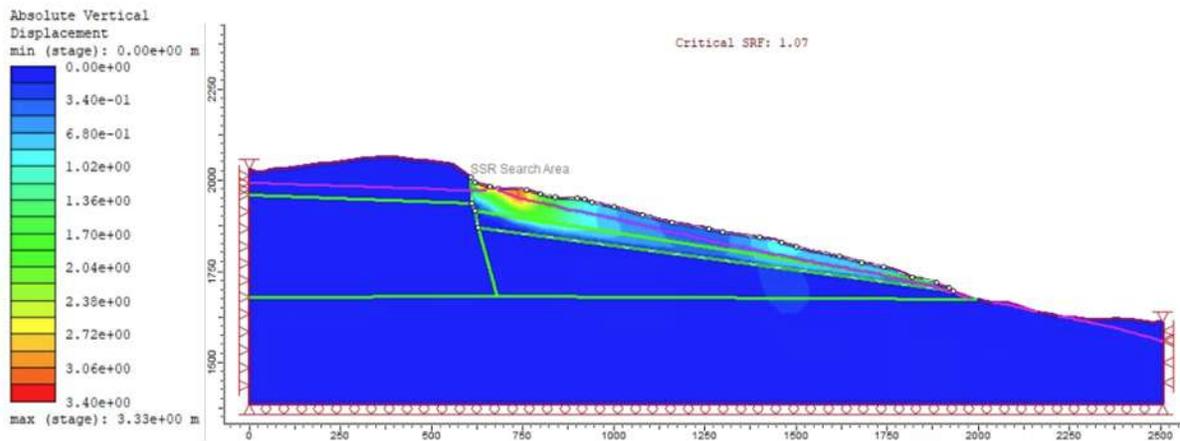
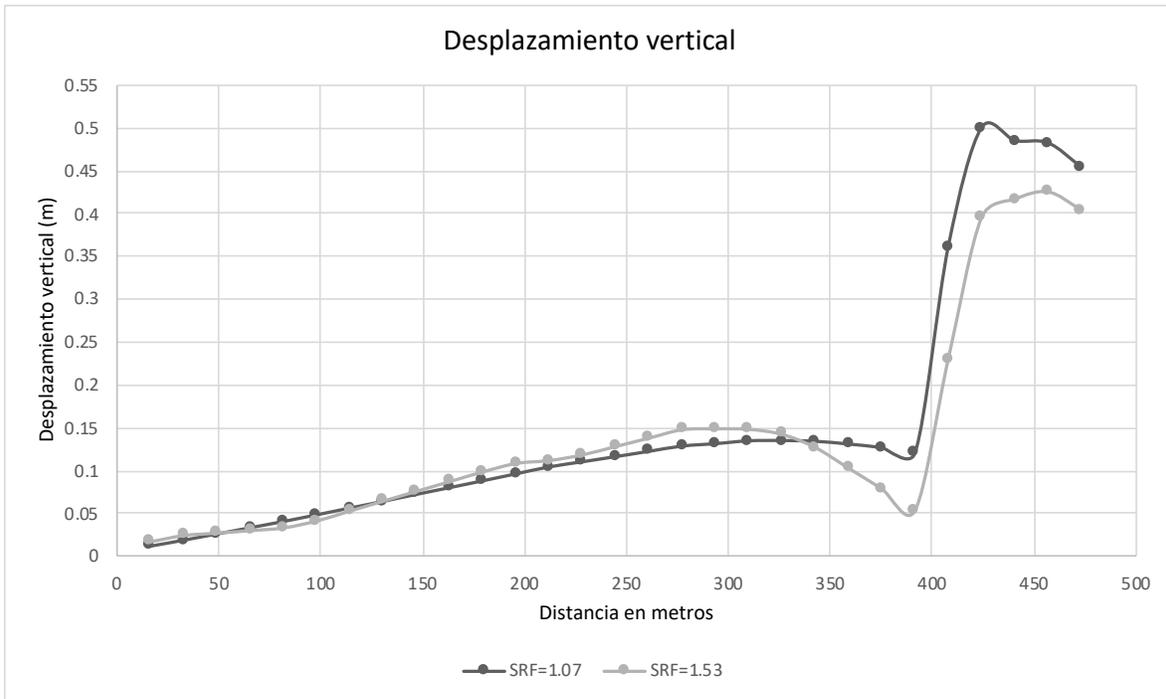


Figura 42. Desplazamiento vertical con lluvia con un SRF=1.07.

Se logró realizar la comparación del cambio que hay en las deformaciones al momento de agregarle un valor de lluvia por medio de una gráfica, obteniendo los valores del lugar central del talud con la funcionalidad de “Query”, la cual nos permite definir una consulta en cualquier lugar del modelo, para obtener datos dentro de la roca o masa del suelo, arrojando como resultado los desplazamientos verticales en metros.

En la Gráfica 3 se observan los SRF críticos en el terreno sin NAF y con lluvia, siendo de 1.53 y 1.07 respectivamente, en donde el SRF de 1.07 muestra desplazamientos mayores, ya que, es el que se encuentra saturado, siendo su mayor valor de 0.5 metros de altura, mientras que con el SRF de 1.53 su mayor valor es de 0.43 metros de altura.



Gráfica 3. Comparación de SRF críticos en un suelo sin NAF v.s. con lluvia.

V. Conclusiones y recomendaciones

En este apartado se presentan conclusiones y recomendaciones obtenidas de la presente investigación, en donde se realizó un análisis de estabilidad del deslizamiento ubicado en el municipio de Tzitzio, Michoacán, sobre la carretera estatal 49 El Temazcal-El limón en el km 8+430, cuyo objetivo fue estudiar el marco geológico-geotécnico de la zona para poder conformar el modelo geológico estructural y un estudio geofísico para conocer las características estratigráficas del subsuelo con el método geoelectrico de resistividades. Así mismo, en el análisis de estabilidad de taludes, se aplicaron los criterios de resistencia de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown. El análisis funcionó como complemento a los estudios realizados con anterioridad por Martínez (2020), quien sugirió realizar un estudio de estabilidad de taludes con ayuda de un modelo geológico-geotécnico utilizando modelaciones numéricas, alimentándolo con los parámetros obtenidos. Existe también una problemática social importante porque la zona de proyecto es inestable, respaldada por los pocos estudios de estabilidad de taludes en la zona.

Los métodos de equilibrio límite para el análisis de estabilidad usados para la investigación son muy importantes y prácticos con los cuales podemos adquirir de forma rápida el Factor de Seguridad mediante el software Slide. Las técnicas de reconocimiento geológico-geotécnico son en estos casos de gran ayuda para identificar zonas inestables y estimar los riesgos de deslizamiento.

Por la vulnerabilidad que presenta la zona, se evidencia por los constantes deslizamientos producidos especialmente en época de lluvia, como hace mención Martínez (2020) en su tesis “Caracterización geotécnica y monitoreo del deslizamiento ubicado en la carretera El Temazcal-Tzitzio”, cuyo objetivo es *“determinar los parámetros geotécnicos de los materiales involucrados en el deslizamiento en estudio, para dimensionar a nivel general la susceptibilidad del movimiento en el área”*.

La comparación de los resultados ha sido llevada a cabo mediante la obtención de los factores de seguridad de la superficie potencial de falla, a través del empleo del software Slide y RS2, empleando los modelos propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, y Morgenstern-Price para el caso de equilibrio limite y reducción de resistencia para el caso

de elementos finitos, en la investigación tenemos factores de seguridad desde 1.02 hasta 1.27 con dos métodos planteados (ver Tabla 7).

De acuerdo con el estudio geológico realizado en la zona de interés, se desprenden las siguientes conclusiones:

El ambiente litológico del predio presenta condiciones geológicas de roca ígnea extrusiva de tipo ácido, representadas por tobas arenosas y roca riolítica que se encuentra en la parte alta de la meseta denominada Tzitzio.

La roca riolítica que se encuentra en la parte superior de la meseta se ha visto fragmentada en grandes bloques de roca que se han depositado en la parte baja, por donde se encuentra la carretera, en combinación con las tobas arenosas que conforman la ladera y que también se comportan de manera inestable dado que el ángulo de inclinación de la pendiente es muy alto.

De los sondeos eléctricos verticales se concluye que, la capa estratigráfica base que conforma la ladera de la meseta es la toba arenosa, que se encuentra a una profundidad de 8 m en promedio y presenta un espesor de 8 a 10 m.

En los sondeos eléctricos verticales no se detectó un macizo rocoso, esto hasta la profundidad estudiada de 120 m, ya que los valores de resistividad eléctrica no son mayores de 30 ohm-m.

Se corroboró que la estratigrafía obtenida del estudio geofísico del año 2022, coincide con la estratigrafía del año 1998, verificando que la roca se trataba de una toba.

De acuerdo con el estudio geológico-geotécnico realizado con modelos numéricos, se desprenden las siguientes conclusiones:

Se llevó a cabo una comparación de factores de seguridad sin nivel de aguas freáticas y con nivel de aguas freáticas en el programa computacional Slide, dando como resultado que con un nivel de agua el factor de seguridad lo arroja menor a 1, siendo este un rango de amenaza alto. Por lo tanto, mientras mayor sea el aumento por lluvia de agua mayor es el riesgo de colapso, ya que, el factor de seguridad disminuye gradualmente, ya que, la superficie al contener material arcilloso tiene una gran capacidad de retención al estar al contacto con el agua, como parte del suelo y por efecto de las lluvias, puede convertirse en un elemento favorecedor de inestabilidad.

El modelo realizado en el programa computacional RS2, se comprueba que el deslizamiento ocurre mayormente en la zona donde se encuentra el estrato con arena arcillosa ya que son los que conforman la zona crítica. Por lo tanto, se puede llegar a la conclusión de que este comportamiento del suelo es mayormente común durante la temporada de lluvias, especialmente durante o después de tormentas severas o lluvias intensas.

Según algunas normas y autores consideran un factor de seguridad mínimo para terraplenes y presas en función del análisis realizado, así mismo, según Abramson et al.(2002), el factor de seguridad permisible considerado según el tipo de análisis debe estar usualmente entre el rango de 1.25 y 1.5, por lo tanto, con el método de Morgenstern-Price, si cumple con la afirmación de Abramson et al., estando en el rango que se considera sin un nivel de aguas freáticas, mientras que con nivel de aguas freáticas está por debajo del rango lo que indica una inestabilidad.

5.1. Recomendaciones

Una de las restricciones presentes para esta investigación es el limitado factor económico, ya que, para poder conocer su mineralogía y microestructura, se recomienda realizar estudios de difracción de rayos X (DRX), y de microscopía eléctrica de barrido (SEM).

Se propone incrementar estudios de sondeos eléctricos verticales con una mayor profundidad, para tener más certeza del tipo de material que se encuentra en el fondo.

Se recomienda realizar un modelo numérico con el fenómeno creep con los parámetros utilizados en esta investigación para conocer mejor su movimiento y en cuanto tiempo es lo que se logra desplazar.

Finalmente, se sugiere continuar con los trabajos de investigación en estabilidad de taludes en la zona de estudio, para poder anticipar los fenómenos naturales que posteriormente puedan afectar en el tramo, y evitar pérdidas materiales, económicas e impactos negativos para la población.

VI. Bibliografía

- Alcántara Ayala, I., & Murillo García , F. G. (agosto de 2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas*(66), 47-64.
- Ali, J., Ahmed , K., Akhtar, K., Khan, A., & Hussain, M. (2015). *Stability analysis of slopes using numerica simulation based on finite element method and limiting equilibrium approach* . Islamabad: Asian Academic Rsearch Journal of Multidisciplinary .
- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York, Estados Unidos : John Wiley and Sons, Inc.,
- Ausilio, E., & Zimmaro, P. (Julio de 2017). Landslide characterization using a multidisciplinary approach. *Measurement, 104*, 294-301.
- Ayala-Carcedo, F. (2002). Análisis de riesgos por movimientos de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* , 379-407.
- Bernal Villate , A. F. (2015). Caracterización de materiales para establecer profundidad de falla en deslizamientos traslacionales tipo creep o reptación. *L'esprit Ingéniux* , 55-70.
- Brabb, E., & Harrods , B. (1989). Landslides: Extent and economic significance. *28th International Geological Congress: Symposium on landslides*, 385.
- Braja, M. D. (1999). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Thomson learning.
- Bustamante Herman, A., & Centeno Werner, R. (2011). *Modelaje Geotécnico por elementos finitos y comprobación instrumental de la exactitud lograda*. Universidad Católica Andrés Bello, Facultad de Ingeniería civil . Venezuela : Universidad Católica Andrés Bello. Obtenido de <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/anexos/biblioteca/marc/texto/AAS0664.pdf>

- Cervantes-Ricalde, B. A., & Cuadros-León, T. L. (2017). Aportes de la aplicación de la tomografía eléctrica y del georadar en la investigación del deslizamiento de Lidecko en los Cárpatos Occidentales, República Checa. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 105-113.
- Coulomb, C. (1776). Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. *Memoires de Mathematique de l'Académie Royale de Science* 7.
- Coulthard, M. A. (1999). Applications of numerical modelling in underground mining and construction. *Geotechnical & Geological Engineering*, 17, 373-385.
- Coutinho, R., Pacheco, J., Wallenstein, N., Pimentel, A., Marques, R., & Silva, R. (2009). Integrating Geological Knowledge in Planning Methods for Small Islands Coastal Plans. *Coastal Education & Research Foundation, Inc., II*, 1199-1203.
- Cruden, D. (1991). A simple definition of a landslide. *IAEG Bull*(43), 27-29.
- D. M., & P. S. (2018). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. Australia : CSIRO Publishing.
- Dahlin, T. (2001). The development of DC resistivity imaging techniques. *Computers & Geosciences*, 27(9), 1019-1029.
- Frías Valero, E. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña. doi:10.5821/dissertation-2117-93606
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo , C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Education.
- Griffiths, D. H. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4), 211-226.
- Gómez Nicolás , M. P. (2014). *Análisis de la conectividad entre cenotes a través de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Teoría de Redes*. Mérida, Yucatán: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/321571467_Analisis_de_la_conectividad_entre_cenotes_a_traves_de_Tomografia_de_Resistividad_Electrica_y_Teoria_de_Redes/

Hammah, R., Yacoub, T., & Corkum, B. (2005). *The shear strenght reduction method for the generalized hoek and brown criterion*. Toronto: ON: ARMA, American Rock Mechanics Association .

Hoek, E. (2007). Estimación de la resistencia de macizos rocosos en la práctica . *Canada: Journal of Rock Mechanics and Mining Sciencies* .

Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proceedings of NARMS-Tac*, 267-273.

Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186.

INEGI. (octubre de 1997). *INEGI*. Obtenido de INEGI: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/mapas-topograficos-escala-1-50-000-serie-iii-michoacan-de-ocampo>

Islas de la vega, A., Ortiz-Ezqueda, A., Robles-Nolasco, J., & Sanchez-Escamilla, J. (1989). *Estudio estratigráfico estructural y tectónico de la parte norte del pliegue de fondo de Tzitzio*. Instituto Politécnico Nacional , Escuela superior de ingeniería y arquitectura . Ciencias de la tierra .

Koefoed, O. (1979). *Geosounding Principles 1: Resistivity Sounding Measurements*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company.

Loke, M. H. (27 de Agosto de 2021). *geotomosoft*. Obtenido de geotomosoft: <http://www.geotomosoft.com/>

Martin, D., & Stacey, P. (2018). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks* .

Martínez Rojas, A. (2020). *Caracterización geotécnica y monitoreo del deslizamiento ubicado en la carretera "El Temazcal-Tzitzio"*. Tesis para optar por el grado de Maestro en infraestructura del transporte en la rama de vías terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, División de estudios de posgrado , Morelia, Michoacán.

- Medina Sandoval, R. I. (2016). *Problemática de la estabilidad de taludes en un portal de salida de un túnel en una zona de deslizamientos antiguos*. Tesis para optar por el grado de maestría en infraestructura del transporte en la rama de las vías terrestres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Medina, R., Salas, M., Luco, R., & Bertram, V. (2005). *Análisis de Estructuras Navales Mediante el Método de Elementos Finitos* (Vol. V.2 N^o1). Sintesis tecnologica.
- Mendoza , J. (2016). *Análisis de Estabilidad de Taludes de Suelos de Gran Altura en la Mina Antapaccay*. Tesis para optar por el grado de Ingeniero Civil , Pontificia Universidad Católica del Perú , Lima.
- Mohr , C. O. (1900). Welche Umstände Bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materiales. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*.
- Monte Parra , I. A. (2020). *Análisis de estabilidad de taludes de roca mediante el método de elementos finitos*. Tesis para optar por el grado de ingeniero civil de minas , Universidad de Concepción , Chile .
- Nikolic, M. (2016). *Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems* (Vol. 23).
- Nikolić, M., Roje-Bonacci, T., & Ibrahimbegović, A. (2016). Overview of the numerical methods for the modelling of rock mechanics problems. *Tehnički vjesnik*, 23(2), 627-637. doi:[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(02\)00065-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(02)00065-5)
- Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua* (Segunda ed.). Madrid , España : paraninfo.
- Plaxis , 2. (2017). Reference Manual.
- Pezzotti, S., & Antico, F. (2007). *Introducción a la Teoría de Elementos Finitos (Elementos Resorte, Barra y Viga)*. . Buenos Aires , Argentina : Facultad de Ingeniería: Universidad de la Plata .
- Pola Villaseñor, A. (2006). *Análisis Geotécnicos y Procesos de Remoción en Masa de la Mesa de Tzitzio*. Tesis para optar por el grado de Maestro en Ciencias , Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, México, D.F.

- Rico Rodriguez , A., & Del Castillo , H. (1976). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. D.F, México: Limusa.
- Rodríguez Marqués, F. (2017). *Análisis de Estabilidad del Deslizamiento de Porciles (Asturias)*. Máster en Recursos Geológicos e Ingeniería Geológica , Universidad de Oviedo .
- Rubio, C., & Romero, V. (2010). *Método del elemento finito, fundamentos y aplicaciones con ansys*. España: Limusa.
- Sánchez Garibay , E. (2015). *Análisis geomecánico y aplicación de modelos a taludes de roca andesítica de la antigua carretera de mil Cumbres, Morelia-Cd.Hidalgo, tramo km. 29+000 al 30+000*. Tesis para optar por el grado de Maestro en infraestructura del transporte en la rama de las vías terrestres , Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo , Morelia, Michoacán .
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia : Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos .
- Svensson , H., & Johan, G. (2010). *Design of foundations for wind turbines*. Sweden: Division of structural mechanics , Lund University .
- Tierra y Tecnología. (17 de octubre de 2016). *Tierra y Tecnología*. Obtenido de Tierra y Tecnología: <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/>
- Tosca Delgado, A., & Chávez Negrete, C. (1998). *Exploraciones Geológicas y Geofísicas*. Morelia : Tosca Exploraciones.
- Vázquez Conde , M. T. (2002). El clima en la inestabilidad de laderas. *Centro Nacional de Desastres Naturales*, 20.
- Wagner, H. (2019). Deep mining: a rock engineering challenge. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 1417-1446. doi:doi.org/10.1007/s00603-019-01799-4
- Wyllie, C., & Mah, C. (2004). *Rock Slope Engineering*. Spoon Press.

VI. Anexos

Anexo 1. Interpretación geológica del SEV1.

<i>Capa No.</i>	<i>Resistividad (ohm-m)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Correlación Geológica</i>
1	54.57	0.383	0.383	1900.62	Arenas
2	102.67	0.220	0.603	1900.40	Gravas
3	115.36	0.399	1.002	1900	Gravas
4	72.95	0.622	1.624	1899.38	Gravas
5	18.96	0.467	2.092	1898.91	Arenas
6	14.51	4.897	6.989	1894.01	Arcillas
7	15.05	1.762	8.751	1892.25	Arenas
8	26.22	6.414	15.165	1885.84	Tobas
9	19.82	6.337	21.502	1879.50	Arenas
10	12.86	24.471	45.972	1855.03	Arcillas
11	17.96	24.529	70.501	1830.50	Arenas
12	21.43	?	?	?	Tobas

Anexo 2. Simbología de las 12 capas geoelectricas del SEV1.

<i>Capa No. y color</i>	<i>Resistividad (ohm-m)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Correlación Geológica</i>
1 Amarillo	54.57	0.383	0.383	Arenas
2 Rojo	102.67	0.220	0.603	Gravas
3 Rojo	115.36	0.399	1.002	Gravas
4 Naranja	72.95	0.622	1.624	Gravas
5 Azul	18.96	0.467	2.092	Arenas
6 Azul	14.51	4.897	6.989	Arcillas
7 Azul	15.05	1.762	8.751	Arenas
8 Verde	26.22	6.414	15.165	Tobas
9 Verde	19.82	6.337	21.502	Arenas

10	Azul	12.86	24.471	45.972	Arcillas
11	Azul	17.96	24.529	70.501	Arenas
12	Verde	21.43	?	?	Tobas

Anexo 3. Interpretacion geologica del SEV2.

<i>Capa No.</i>	<i>Resistividad (ohm-m)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Correlación Geológica</i>
1	48.79	0.334	0.334	1876.67	Arenas
2	60.13	0.189	0.523	1876.48	Gravas
3	68.33	0.355	0.878	1876.12	Gravas
4	51.69	0.611	1.489	1875.51	Gravas
5	22.97	1.367	2.856	1874.14	Arenas
6	20.81	1.898	4.755	1872.25	Arenas
7	21.22	3.208	7.963	1869.04	Arenas
8	23.13	6.692	14.654	1862.35	Tobas
9	9.05	2.256	16.911	1860.09	Arcillas
10	6.12	24.113	41.024	1835.98	Arcillas
11	29.79	38.507	79.531	1797.47	Tobas
12	18.27	?	?	?	Arenas

Anexo 4. Simbologia de las 12 capas geoelectricas del SEV2.

<i>Capa No. y color</i>	<i>Resistividad (ohm-m)</i>	<i>Espesor (m)</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Correlación Geológica</i>
1 Amarillo	48.78	0.334	0.334	Arenas
2 Rojo	60.13	0.189	0.523	Gravas
3 Rojo	68.33	0.355	0.878	Gravas
4 Naranja	51.69	0.611	1.489	Gravas
5 Verde	22.97	1.367	2.856	Arenas
6 Azul	20.81	1.898	4.755	Arenas
7 Verde	21.22	3.208	7.963	Arenas
8 Verde	23.13	6.692	14.654	Tobas
9 Azul	9.05	2.256	16.911	Arcillas

10	Azul	6.12	24.113	41.024	Arcillas
11	Amarillo	29.79	38.507	79.531	Tobas
12	Azul	18.27	?	?	Arenas