



Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra

ANÁLISIS GEOTÉCNICOS Y PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA DE LA MESA DE TZITZIO

TESIS

Maestría en Ciencias

Antonio Pola Villaseñor

México, D.F. 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
1.-INTRODUCCIÓN.....	01
1.1.- Justificación.....	01
1.2.- Objetivo.....	02
2.- METODOLOGÍA.....	04
2.1.- Geología.....	04
2.2.- Análisis Morfo-estructural regional.....	04
2.3.- Análisis morfológico para la definición de los cuerpos inestables (PRM).....	05
2.4.- Estudio Geomecánico.....	06
2.4.1.- Propiedades de los suelos.....	06
2.4.2.- Separación de fracciones minerales finas en sedimentos, mediciones por difracción de rayos-X.....	07
2.4.3.- Mecánica de Rocas y Macizo rocoso.....	07
2.4.3.1.- Análisis de estabilidad del macizo rocoso.....	08
2.4.3.2.- Simulación de trayectoria de los bloques inestables.....	15
2.5.- Análisis estabilidad y factor de seguridad por falla circular en unidad CTiVaT.....	16
3.- RESULTADOS.....	17
3.1.- Geología.....	17
3.2.- Análisis morfológico y clasificación de los cuerpos inestables (PRM).....	22
3.3.- Patrones de fracturamiento.....	26
3.4.- Estudio Geomecánico.....	32
3.4.1.- Propiedades y mineralogía de suelos.....	32
3.4.2.- Mecánica de Rocas.....	36
3.4.2.1.- Prueba de resistencia de carga Puntual (PLT).....	36
3.4.2.2.- Grado de fracturamiento RQD.....	37

3.4.2.3.- Prueba de resistencia a carga triaxial en muestra de roca.....	38
3.4.3.- Macizo rocoso	38
3.4.3.1.- Clasificación geomecánica del macizo rocoso.....	38
3.4.3.2.- Descripción de fracturamiento a nivel afloramiento y definición de mecanismo de deslizamiento.....	40
3.4.3.3. - Simulación de trayectoria para caída de bloques.....	51
3.5.- Análisis estabilidad y factor de seguridad por falla circular en unidad CTiVaT.....	53
4.- DISCUSIONES.....	56
4.1.- Características de los deslizamientos, descripción y ejemplos.....	56
4.2.- Características de los materiales no consolidados.....	57
4.3.- Patrones de fracturamiento.....	57
4.4.- Análisis de estabilidad.....	58
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS	
Anexo 1. Ensayos de carga uniaxial y carga triaxial en suelos.....	66
Anexo 2. Preparación de muestras para pruebas mineralógicas.....	68
Anexo 3. Levantamiento de fracturas en macizos rocosos.....	69
Anexo 4. Pruebas de mecánica de rocas.....	78
Anexo 5. Clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR).....	80
Anexo 6. Análisis de falla y sustitución numérica de los factores de seguridad..	82

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras

<i>Figura 1.1.- Localización del área en estudio.....</i>	<i>03</i>
<i>Figura 2.1.- a). Análisis cinemático con red estereográfica. b). Modelo de falla en cuña.....</i>	<i>09</i>
<i>Figura 2.2.- Diagrama esquemático para la obtención de las dimensiones angulares (mecanismo de falla en cuña).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3.- a). Análisis cinemático con red estereográfica. b). Modelo de estabilidad al volteo.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.4.- Condiciones para el deslizamiento y vuelco de bloques sobre un plano. (Modificado de Hoek y Bray, 1981) (in Suárez-Díaz, J., 1998).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.5- Representación de fuerzas que actúan en un bloque, bajo condiciones de vuelco. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.1.- Columna litológica a detalle de la zona en estudio, se incluyen los procesos de remoción en masa actuales y la ubicación de las muestras de suelo.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3.2.- Carta geológica del área de estudio, escala 1:50000. En esta carta se ubican las estaciones de fracturamiento de la mesa de Tzitzio.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.3.- Alternancia sedimentaria de limonitas y areniscas, afectadas por un sistema de fallas normales con direcciones (N80°/70°S y N85° /80S) en unidad de capas rojas (CTo-mCR).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.4.- Canales en contacto erosivo conformado por una alternancia de limonitas y areniscas de grano grueso en unidad de capas rojas (CTo-mCR).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.5.- Secuencia volcánica compuesta por lavas, secuencia sedimentaria, flujos piroclásticos y paleodeslizamientos, en unidades de secuencia de flujos piroclásticos (CTsTpO).....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.6.- Sección geológica, donde se explican los PRM a nivel regional (movimientos laterales).En la parte superior de la figura se representan los diferentes frentes de avance del flujo y los grandes bloques de roca que son transportados en superficie.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.7.- Frente de avance del flujo de arenas arcillosas. En esta figura se pueden ver los grandes bloques de roca que son transportados en superficie.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.8.- Trayectorias y dimensiones de los flujos de arcillas presentes en la zonal. Los círculos azules representan la ubicación de las cuatro estaciones de fracturamiento y de los tres muestreo de suelos. El círculo negro representa la ubicación del tramo carretero 8 + 500 de la carretera El Temazcal Tzitzio.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.9.- a). Imagen sombreada más representativa de la zona b). Mapa de lineamientos marcados sobre cuatro imágenes sombreadas a diferente proyección de luz c). Mapa de densidades elaborado en</i>	

<i>base al mapa de lineamientos d). Diagrama de rosetas general de la zonal, elaborado en base a un análisis estadístico de los lineamientos.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.10.- Rosetas de lineamientos para cada unidad geológica, las cuales definen las direcciones preferentes de lineamientos.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.11.- a). Imagen sombreada más representativa de la zona b). Mapa de lineamientos marcados sobre cuatro imágenes sombreadas a diferente proyección de luz c). Mapa de densidades elaborado en base al mapa de lineamientos d). Diagrama de rosetas general de la zonal, elaborado en base a un análisis estadístico de los lineamientos.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.12.-Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 1.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.13.-Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 2.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.14.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 3.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 3.15.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 4.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 3.16a.- Análisis de la trayectoria de los bloques inestables de 300 kg de peso.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.16b.- Análisis de la trayectoria de los bloques inestables de 3 tn de peso.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 3.17.- Sección geológica. Análisis de estabilidad y factor de seguridad a lo largo del plano de falla crítica. Se incluye la ubicación de las muestras de suelo.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 3.18.- Deformaciones, movimientos y asentamientos en la superficie de rodamiento (carretera El Temazcal-Tzitzio) generados por el flujo de arenas arcillosas.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura A.1- Representación gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación (círculos de Mohr).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura A.2a.- Representación gráfica de la disminución de las fuerzas c y decremento de la resistencia al esfuerzo cortante.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura A.2b.- Representación gráfica del aumento de la cohesión en conjunto con el aumento de la resistencia del esfuerzo normal.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura A.2c.- Representación gráfica del aumento del ángulo de fricción en conjunto con la disminución de las fuerzas de cohesión, bajo la historia de los esfuerzos.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura A.3.- Perfiles estándar de rugosidad. Rango de 1 a 10 m. (ISRM,1981).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura A.4.- Perfiles estándar y valores de JRC. (Barton y Choubey, 1977).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura A.5.- Ejemplo de cálculo de los parámetros de resistencia c y ϕ, a partir de ensayos triaxiales. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002).....</i>	<i>79</i>

Tablas

<i>Tabla 3.1.- Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio de mecánica de suelos.....</i>	<i>34</i>
---------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

<i>Tabla 3.2.- Resistencia a compresión simple de la roca para la zona uno (estaciones 1 y 4), en base a la prueba PLT (D= Diámetro de la muestra, P= Carga de rotura, Is= Índice referido a muestras de 50 mm, σ_c= Compresión simple de la roca). Los resultados marcados en color rojo son los valores máximos y mínimos que se descartaron para realizar el promedio.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3.3.- Resistencia a compresión simple de la roca para la zona uno (estaciones 2 y 3), en base a la prueba PLT (D= Diámetro de la muestra, P= Carga de rotura, Is= Índice referido a muestras de 50 mm, σ_c= Compresión simple de la roca). Los resultados marcados en color rojo son los valores máximos y mínimos que se descartaron para realizar el promedio.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.4 .- Término RQD para las dos porciones del macizo rocoso.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.5.- Valores de esfuerzos de los ensayos triaxiales en muestras de roca y Datos geotécnicos de las estaciones de fracturamiento 2 y 3.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3.6.- Parámetros de clasificación y características geotécnicas atribuidas en base a RMR.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla A.1.- Descripción de espaciamiento en discontinuidades.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla A.2.- Clasificación de la persistencia de discontinuidades.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla A.3.-Descripción y rasgo de la apertura de discontinuidades.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla A.4.-Descripción de las filtraciones de agua en discontinuidades con relleno y sin relleno.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla A.5.- Términos de los tamaños de bloques en base al valor Jr.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla A.6 - Parámetros de clasificación geomecánica RMR del macizo rocoso, propuesto por Bieniawski en 1989, (González de Vallejo et al., 2002).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla A.7- Parámetros de corrección por orientación de las discontinuidades. (González de Vallejo et al., 2002).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla A.8- Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR. (González de Vallejo et al., 2002).....</i>	<i>81</i>

AGRADECIMIENTOS

Los estudios de maestría se desarrollaron gracias al apoyo económico otorgado por CONACYT. Sin duda no hubiera podido estudiar sin este apoyo.

Este trabajo fue desarrollado bajo la tutela del Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, agradezco enormemente el apoyo académico y económico incondicional, así como su siempre humano trato.

Agradezco sobremanera a la Dra. Aline Concha Dimas por haberme dedicado el tiempo necesario en la organización de mi proyecto, agradezco su empeño, su disposición y su revisión detallada que sin duda mejoraron enormemente el manuscrito.

Este trabajo fue enriquecido por los comentarios, observaciones y discusiones del Dr. Armando García Palomo, agradezco su amistad y su apoyo logístico.

Agradezco enormemente a la Dra. Lucia Capra Pedol por haberme dado un espacio de estudio en el instituto de geología, por el apoyo logístico y por las observaciones y comentarios hechos para este trabajo.

Los trabajos de campo se realizaron con herramientas proporcionadas por el Dr. Eleazar Arreygue Rocha, agradezco sus atenciones y su siempre gentil apoyo.

La parte mineralógica de este trabajo fue elaborada con la atenta ayuda del Dr. Jacinto Robles Camacho, agradezco enormemente la metodología descrita y sus comentarios brindados.

El modelo digital de elevaciones en escala 1:5000 fue proporcionado por el Ing. Jaime Saavedra Rosales. Agradezco su apoyo.

Agradezco la amistad y grata compañía de mis amiguitos del posgrado, ellos fueron los responsables de que mi estancia en el DF, fuera inolvidable. Un abrazo muy cariñoso para: Ricardo Vázquez, María Rodríguez, Giovanni (El Giovias), Rafael Cabrera (Lord Sith), Elisa Fitz, Mario Alfredo (El compa), Rosalva Pérez, Yann, Edgar (El chilango), Lucy Mora, Ewa, Wendy's, Liz y Zoila. Un abrazo fuerte para Esaúl (El apático) y Carlos (El Tarzán).

Los trabajos de laboratorio y las salidas a campo no hubieran podido ser realizadas sin la ayuda del Ing. Jorge Calderón (Georgina). Agradezco su trabajo, su amistad y su siempre agradable compañía.

A mi amigo Daniel Tena (Zeus patillas) que a pesar de ser el mero, mero y estar siempre ocupado en la tutoría de alumnos y en la composición de rolas, me ha brindado su ayuda en los trabajos de laboratorio.

A la banda de gorilas que sin duda me han hecho pasar momentos inolvidables. Mauricio Cervantes (El chimpa), Alfonso Alcántar (Ponchito), Guillermo Avilés (La Morsa), Victor Garduño (El Vito-ques), Antonio López (El Dougi) y Mauricio Estrada (El Max).

A mis amiguitos de toda la vida. Una abrazo muy cariñoso para: Carlos Rogelio González (Gordo), Jorge Alfredo Huerta (El Negro), Sergio Bravo (La Garza) y Octavio Cervantes (La Manzanita).

Expreso una gran admiración y gratitud, además envió un abrazo muy cariñoso a la familia tío Leo, tía Meche, tía Coco, tía Naya, tío Paco y tío Rafa. Los quiero mucho, ustedes saben que han sido parte fundamental en el desarrollo de mi vida.

A la dulce, cariñosa y siempre agradable compañía de mis primos. Un abrazo especial para Alex y Ángel.

Dedico este trabajo a la amorosa compañía de mi novia Ivonne. Su brillo especial da forma y dirige nuestra relación. Expreso mi más grande amor y envió un beso muy sincero, agradezco también por siempre estar conmigo. Te quiero.

Quiero dedicar este trabajo a mis hermanos Carlos y Sandra y a mi mamá que ha logrado formar una atmósfera llena de amor y armonía entre nosotros, les expreso mi más grande admiración y les agradezco por siempre estimular mi vida.

RESUMEN

Durante los últimos 13 años en la región de Tzitzio se han generado constantemente Procesos de Remoción en Masa (PRM). Las condiciones geológicas de la zona, han sido un factor determinante en el comportamiento de estos fenómenos, cuyo complejo global, corresponde a la sobreposición de unidades con características mecánicas y físicas muy diferentes: En la cima de la columna se tienen grandes paquetes de Ignimbritas vítreas muy compactas y fragmentadas por fallas normales con dirección NE-SW. Subyaciendo a este paquete encontramos una secuencia de sedimentos arcillosos formados por la erosión y deslizamientos de masas a partir de la desintegración de unidades volcánicas.

En este trabajo se elaboró un mapa geológico-estructural de la zona, donde se describen los diferentes PRM. Así mismo, se realizaron estudios mecánicos, físicos y pruebas mineralógicas de suelos con la finalidad de reconocer relaciones directas entre causa y efecto. Se realizaron también pruebas mecánicas en muestra de roca y un análisis de fracturamiento, además de la simulación de las diferentes trayectorias de los bloques inestables. Finalmente se realizó un análisis de estabilidad y factor de seguridad a lo largo del plano de falla crítica en suelos arcillosos no consolidados, la cual se proyectó en una sección geológica base.

En base al análisis de los resultados obtenidos, resulta evidente que las características litológicas han estado determinando el tipo de fenómeno de remoción en la zona. En particular, los suelos arcillosos no consolidados que dan origen a flujos densos, sucesivos de grandes volúmenes y de larga trayectoria, cuyos cambios volumétricos y movimientos son responsables en gran parte de la inestabilidad estructural del macizo rocoso suprayacente, donde más de tres familias de fracturamiento buzcan a favor del talud o escarpe de la mesa de Tzitzio. Es claro que la dinámica de este proceso complejo, no ha sido estudiado con la finalidad de entender y proponer un escenario que nos ayude a mitigar el peligro. La caracterización del fenómeno, en conjunto con estudios geológicos y cartográficos, así como análisis geotécnicos de la zona, pretenden ser un antecedente base en la propuesta de reducción o mitigación del riesgo en la zona.

1.-INTRODUCCIÓN.

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos del terreno de diversas características, magnitudes y velocidades. Los más frecuentes y extendidos son los movimientos de ladera o procesos de remoción en masa (PRM) que son igualmente denominados procesos gravitacionales o en sentido general, se conocen también como deslizamientos de tierra (Alcántara-Ayala 2000). Debido a las diferentes características que presentan estos procesos, el peligro generado es variable; sin embargo, ciertos fenómenos catastróficos han ocasionado gran cantidad de pérdidas humanas y económicas, relacionándose principalmente con mecanismos desencadenantes tales como las lluvias torrenciales y los sismos (Alcántara-Ayala 1999). La interacción de los factores ambientales juega un papel muy importante en el control de los fenómenos de inestabilidad, por esta razón su entendimiento es fundamental para la identificación de zonas susceptibles, lo cual permitirá la elaboración de estrategias específicas y adecuadas en su prevención.

En la zona de Tzitzio se combinan aspectos de una morfología con grandes pendientes, una litología donde se alternan formaciones competentes e incompetentes y una precipitación pluvial importante. Estos factores han logrado que tan solo en los últimos cinco años en las cercanías del poblado de Tzitzio y al interior del mismo se presenten grandes PRM. Uno de los procesos que se encuentra afectando a una de las carreteras mas importantes que beneficia a las poblaciones de Tierra Caliente en el estado de Michoacán, corresponde a un movimiento complejo de grandes dimensiones, compuesto por caída de grandes bloques y flujos de arcillas. Es claro que la dinámica de este proceso complejo, no ha sido estudiado con la finalidad de entender y proponer un escenario que nos ayude a mitigar el peligro. La caracterización del fenómeno, en conjunto con estudios geológicos y cartográficos, así como análisis geotécnicos de la zona, pretenden ser un antecedente base en la propuesta de reducción o mitigación del riesgo en la zona.

El área de estudio se localiza en la parte centro-occidente de la República Mexicana, en la porción nororiental del estado de Michoacán, partiendo del km 8+500 de la carretera el Temazcal-Tzitzio, perteneciente al mismo municipio (Figura 1.1), cubre una superficie de 906.58 km² del estado y limita al norte con Charo e Indaparapeo, al este con Hidalgo, Jungapeo y Tuzantla, al sur con Tiquicheo y al oeste con Madero y Morelia (Flores-Rosas, 1998). La superficie en estudio cubre un total de 50 km² aproximadamente, expuestos en un recorte delimitado por las coordenadas 291000 este, 2172000 norte y 301000 este, 2165000 norte, en proyección UTM (Universal Transversal de Mercator), de la carta topográfica número E14A24 (Tzitzio) en escala 1:50000, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

1.1.-Justificación.

Los problemas de inestabilidad de taludes o de procesos de remoción en masa en México solo parecen ser objeto de estudio en los casos de ocurrido el desastre. Sin embargo, existen problemas concretos que están causando daños a las vías de comunicación que anualmente hacen un desvío de recursos imperceptible pero que seguramente los merma en este campo. Casos concretos son los ocurridos durante la presencia de huracanes (Mitch,..) en Chiapas, Puebla y Veracruz donde las vías de comunicación fueron severamente dañadas, sin

mencionar los casos de desastres en las zonas urbanas de Zacapuaxtla, Zacatlán, Meztlán, Tapachula, Orizaba. En Michoacán durante los últimos diez años varias poblaciones y vías de comunicación han sido afectadas, presentando con ellos, además de las pérdidas materiales, pérdidas humanas, es el caso de las regiones de Arteaga y Aguililla. En las vías de comunicación la inestabilidad de taludes ha generado daños enormes en tramos de autopista, como es el caso de Morelia-Zacapu, Pátzcuaro-Uruapan, Nueva Italia-Infiernillo. No obstante esta problemática, no existe un grupo de técnicos o investigadores que estén realizando este tipo de trabajos y que hagan actividades sistemáticas sobre este argumento. Es por este motivo que investigadores de la Universidad Michoacana han empezado a realizar trabajos sobre este problema.

Los estudios hasta ahora realizados en México solo han abordado la inestabilidad de taludes en base a aspectos más morfológicos, meteorológicos, de suelos y vegetación. En el presente estudio se dará más peso a los aspectos físicos (geotécnicos) y químicos de las rocas (alteración-arcillas), con la finalidad de conocer los parámetros que están influyendo en la inestabilidad en la región de Tzitzio. Se ha considerado prioritaria esta zona debido a que cada año, los movimientos son más perceptibles y no solo ahora afecta a las vías terrestres, también han iniciado movimientos en la zona urbana de la población de Tzitzio, comprometiendo a varias casas. Otra de las razones por las que se hace atractivo el estudio en esta zona, es la combinación de varios aspectos, 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.

Con lo anteriormente expuesto, se ha planteado realizar un trabajo de investigación que ayude a caracterizar, a entender y a mitigar un problema de inestabilidad de taludes y que sea la base de un proyecto de tesis de maestría que reafirme mi formación teórica.

1.2.-Objetivo.

Los estudios realizados en este trabajo de tesis, pretenden ser sin duda un antecedente base en la propuesta de reducción o mitigación del peligro por procesos de remoción en masa en la zona de Tzitzio, para ello se presentan los siguientes objetivos específicos:

- Se realizará un análisis regional de fracturamiento.
- Se caracterizarán geológica y geomecánicamente los materiales involucrados en la inestabilidad.
- Con estudios geológicos, morfológicos y geotécnicos en conjunto, se realizarán un análisis de estabilidad bajo las condiciones naturales a las que la ladera esta sometida.

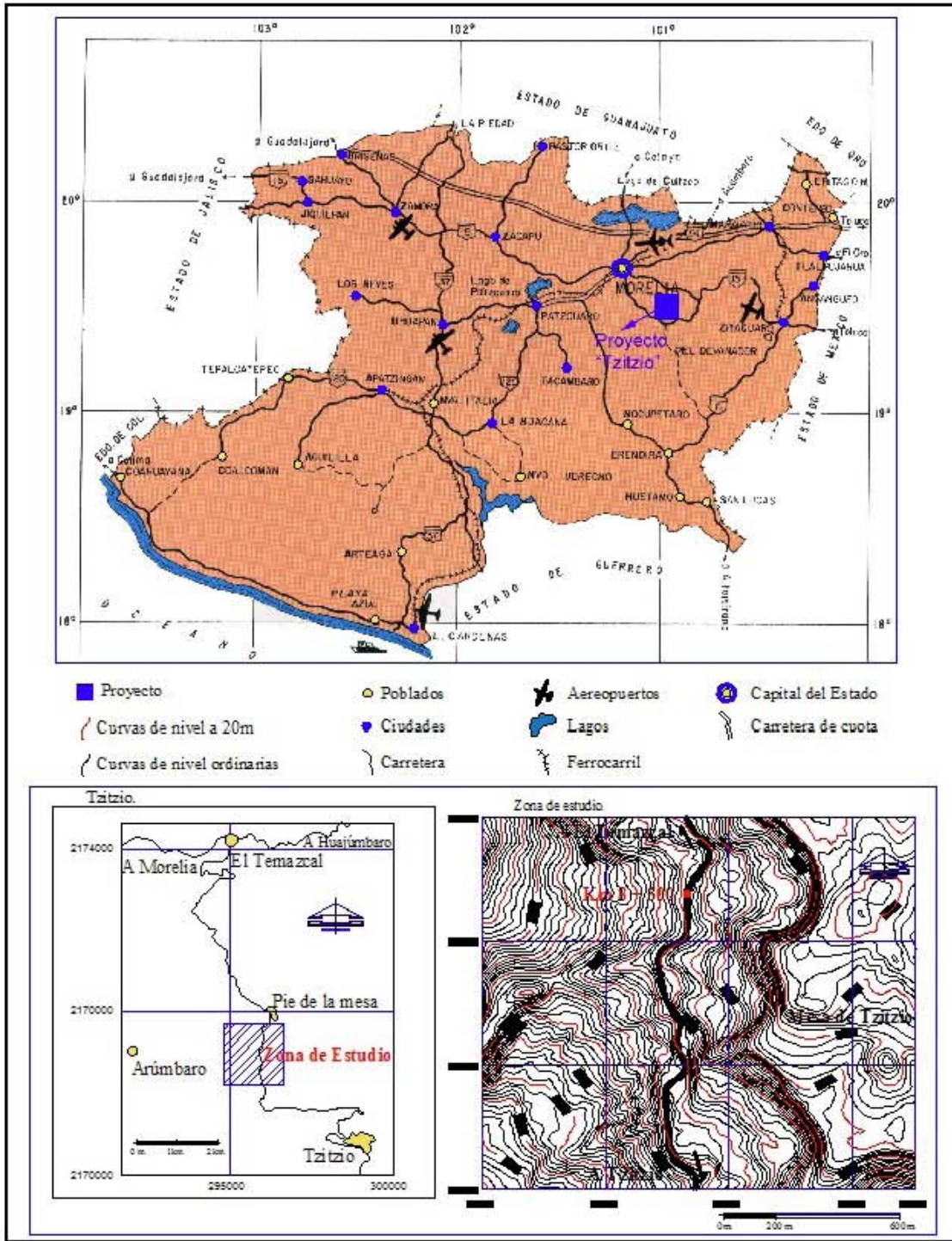


Figura 1.1.- Localización del área en estudio.

2.- METODOLOGÍA

2.1.- Geología

Para realizar la carta geológica del sitio, fue necesario iniciar con una interpretación de fotografías aéreas, proyectadas en escalas 1:75000 y 1:25000 y elaboradas en blanco y negro y toda la gama de grises. En ellas se marcaron de manera provisional las unidades geológicas y los rasgos estructurales que afloran en la zona. Posteriormente, se realizó el trabajo de campo, el cual consistió en verificar los rasgos geológicos-estructurales que se marcaron en el trabajo de fotointerpretación y realizar la toma de datos estructurales, los cuales se vaciaron en los plano topográfico base, proyectados en escala 1:50000 y 1:5000. Finalmente, en el gabinete se analizaron los datos, observaciones y descripciones litológicas realizadas en campo, con la finalidad de construir un mapa geológico, estructural y columna litológica de la zona.

2.2.- Análisis Morfo-estructural regional

La morfología del sitio se definió, en grandes dominios, en base a un análisis topográfico y de perfiles. Los mapas topográficos base se obtuvieron de procesar los modelos digitales de elevación (MDE) a diferentes escalas. El primer modelo base cubre aproximadamente 70 km² que son expuestos en un recorte digital de elevaciones, delimitado por las coordenadas 291000 este, 2172000 norte y 301000 este, 2165000 norte, en proyección UTM, de la carta topográfica número E14A24 (Tzitzio) en escala 1:50000, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

El segundo modelo base cubre aproximadamente 29 km², expuestos en un modelo digital de elevaciones, delimitado por las coordenadas 294459 este, 2167259 norte y 296842 este, 2169647 norte, en proyección UTM, en una escala de 1:5000, el cual fue elaborado y proporcionado por el departamento de vías terrestres de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Los MDE, fueron procesados para obtener imágenes de relieve sombreado con cuatro proyecciones de luz (h47v51, h48v46, h100v37 y h125v49). En ellas se identificaron los rasgos estructurales de la zona, los cuales corresponden a lineamientos formados por escarpes y extensiones rectas de ríos y arroyos.

La sumatoria de los datos obtenidos sobre las imágenes sombreadas se representó en mapas de densidades y diagramas de rosetas, que fueron base para elaborar una interpretación que expresara las diferentes orientaciones preferentes de lineamientos en la zona.

Para obtener las diferentes correspondencias geométricas de lineamientos a nivel regional y a nivel local, fue necesario analizar los (MDE) a diferentes escalas.

Los mapas de tendencias fueron realizados en base a lineamientos, marcados sobre imágenes sombreadas. El área total de los modelos digitales se fragmento en áreas de 1 km² para el primer MDE a escala 1:50000 y 200 m² para el segundo MDE a escala 1:5000. Los lineamientos se contaron para cada fragmento de área, para posteriormente interpolarlos y graficarlos por medio de líneas que representan un mismo valor de densidad.

2.3.- Análisis morfológico para la definición de los cuerpos inestables (PRM).

La clasificación de los procesos de remoción en masa más aplicada a nivel mundial se basa en el mecanismo de movimiento (Alcántara-Ayala, I., 2000). Arreygue-Rocha *et al*, (2002) definen cinco tipos principales de inestabilidad: Caída de bloques, vuelcos o desplomes, deslizamiento rotacional y traslativo, expansiones laterales y flujos o coladas.

Adicionalmente al tipo de movimiento es importante definir las características que poseen en cuanto al tipo de material que es trasladado, contenido de humedad de la masa deslizada, distribución, estado de actividad, estilo y estructura geológica. (Suárez-Días J., 1998).

Según la clasificación de movimiento redefinida por Alcántara-Ayala (2000) los fenómenos se subdividen de acuerdo con los materiales formadores, los cuales pueden ser: Rocas, detritos o derrubios y suelo. Existe una clasificación por contenidos de humedad, Suárez-Días J., (1998) propone cuatro términos para definir estas condiciones: Seco, fresco, húmedo, muy húmedo. Otro concepto muy importante es la distribución del movimiento, el cual se refiere a movimientos que inician en un área local y progresan o se repiten en una determinada dirección. De esta manera la progresión de movimiento se divide en los siguientes conceptos (Turner *et al*, 1996): Progresivo, retrogresivo, de ensanche, de disminución, de movimiento.

El estado de actividad de los fenómenos con respecto al tiempo transcurrido de un movimiento a otro, se describe por medio de cuatro conceptos: Activo, reactivado, suspendido, inactivo (Suárez-Días, 1998). Por otro lado, existe una clasificación que diferencia cuando aparecen conjuntamente diferentes tipos de movimiento: Se le llama movimiento complejo cuando aparecen por lo menos dos tipos diferentes de movimiento, se le llama compuesto cuando ocurren simultáneamente varios tipos de movimiento, un movimiento múltiple será aquel que presente movimientos repetitivos y sencillo corresponderá a un solo movimiento.

La características geológicas del sitio son factores que determinan el mecanismo de falla y el comportamiento de un movimiento (González de Vallejo *et al*., 2002), un claro ejemplo sería un ambiente de escarpes inclinados, donde la estructura geológica, definiera la inestabilidad.

Por lo tanto, la clasificación y descripción de los PRM de la zona, se realiza en base al glosario anteriormente citado en conjunto con las observaciones realizadas en campo y un análisis morfológico que se realizó en fotografías aéreas, donde se delimitaron escarpe y cuerpos de deslizamiento. Así mismo se elaboraron secciones, sobre mapas topográficos con la finalidad de apoyar nuestra descripción. Las secciones se trazaron a lo largo y ancho de los cuerpos inestables, a los cuales se atribuyeron características geológicas de la zona.

2.4.- Estudio Geomecánico.

Una vez delimitados los cuerpos inestables en fotografías aéreas, se visitó el sitio con la finalidad de realizar un muestreo en los suelos involucrados. El muestreo se realizó por medio de pozos a cielo abierto (PCA), los cuales se clasifican según su procedimiento como de tipo alterado. Con el fin de reproducir las condiciones del terreno natural, se efectuaron pruebas de humedad natural y peso volumétrico del lugar. Además, se realizaron pruebas de resistencia y clasificación del suelo con las que se atribuyeron características de consistencia, de resistencia y textura a los suelos muestreados. En la fracción fina ($>20 \mu\text{m}$) se realizaron pruebas mineralógicas a favor de reconocer relaciones directas entre causa y efecto.

El muestreo de roca se realizó en cuatro zonas del macizo, las cuales fueron delimitadas en base a la variación de las características de matriz rocosa y discontinuidades que presentaba cada zona. El muestreo consistió en obtener fragmentos de roca no menores a 20 cm, los cuales se sometieron a ensayos de compresión triaxial, con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia de la roca.

Para escala de macizo rocoso se realizó la toma sistemática de las diferentes características físicas y geométricas de fracturamiento, así como valores de martillo Schmidt y valores de carga puntual. Finalmente y en base a las características anteriormente mencionadas se obtuvo una clasificación RMR que se aplicó, dividiendo el macizo en estaciones que presentaban características geológicas más o menos uniformes, basadas en observaciones hechas en campo. Para la toma sistemática de los datos de campo se empleó una tabla que agrupa los seis parámetros de clasificación, la cual se adjunta en el anexo 3.

2.4.1.- Propiedades de los suelos.

Una de las pruebas para la clasificación ingenieril realizada, fue la de granulometría simplificada, la cual separa la muestra en suelos cohesivos (finos) y suelos no cohesivos (gruesos), utilizando únicamente las mallas de diámetro 4, 40 y 200, se representa el peso en porcentaje retenido de cada malla con respecto al peso total de la muestra (Braja, M.D., 1999).

Con las pruebas de límite líquido e índice plástico, en conjunto con resultados de granulometría, se obtuvo una clasificación global del suelo. Así mismo, se atribuyeron características de plasticidad muy particulares de cada muestra, en base a resultados de índice de liquidez, consistencia relativa, límite de contracción, contracción lineal y límite plástico (Crespo-Villalaz, 1980). El suelo se clasificó de manera global en base a la carta de plasticidad de Casagrande, en conjunto con la carta propuesta por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (Braja, M.D., 1999).

Pruebas de relaciones gravimétricas del suelo se elaboraron con la finalidad de interpretar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos: Grado de compresibilidad de la muestra, grado de saturación (capacidad del material para absorber agua) y Porosidad (resultado muy ligado a la deformación que podría sufrir el suelo, bajo esfuerzos significativos).

Los resultados mecánicos de los suelos, se obtuvieron en base a pruebas de compresión simple y compresión triaxial. En el ensayo de compresión triaxial se intento reproducir las condiciones reales a las que el suelo esta sometido, aplicando así presiones de confinamiento semejantes a las existentes en campo. Para nuestro caso se utilizó la prueba rápida no drenada, llevando a la muestra rápidamente a la falla La metodología en detalle y los resultados de cada prueba se presentan en el anexo 1.

2.4.2.- Separación de fracciones minerales finas en sedimentos, mediciones por difracción de rayos-X.

En este trabajo se utilizó una metodología que ha sido adaptada y aplicada para el estudio de materiales arcillosos y parcialmente consolidados limo-arcillosos. Esta, ha sido mejorada en el Laboratorio de Rayos-X del Instituto Nacional de Antropología e Historia, por ser requerida constantemente para el estudio de cerámicas y pigmentos prehispánicos principalmente. Sin embargo, su aplicación en estudios paleoambientales y vulcanológicos, por ejemplo, ha sido demostrada.

Específicamente en el presente caso, relacionado con la caracterización mineral de materiales susceptibles de promover deslizamiento de masas rocosas en ambientes naturales, se ha recurrido dicha metodología, con las consideraciones que se describen en el anexo 2.

Las mediciones por difracción de rayos-X de la fracción arcillosa o de minerales arcillosos en muestras de taludes o de terraplenes de deslizamiento de la zona de estudio, fueron realizados en un difractómetro marca SIEMENS, modelo D-5000, con condiciones de excitación del haz de electrones de 20 Kv - 30 mA y emisión de radiaciones de $Cu_{\lambda=1.54 \text{ \AA}}$ y monocromador de Ni.

2.4.3.- Mecánica de Rocas y Macizo rocoso.

Dentro de la mesa de Tzitzio, en lo que corresponde al área de interés para este trabajo, se seleccionaron cuatro taludes que presentaban fracturas claras y desprendimientos de bloques de roca, por lo que se definieron como taludes potencialmente inestables. En cada talud se recopilaron datos de fracturamiento en base a una tabla y manual previamente elaborados, los cuales se incorporan en el apartado de anexos (anexo 3). En ellos se agrupan datos mecánicos y geométricos de fracturamiento: Orientación, espaciamiento, continuidad, rugosidad, relleno y apertura entre sus planos, así como lecturas de rebote del martillo Schimidt y pruebas de carga puntual (PLT, por sus siglas en inglés: *Point Load Test*), pruebas base para realizar la clasificación del macizo rocoso. La metodología usada y características de las pruebas se presentan en el anexo 4.

En base a los resultados de los ensayos y características anteriormente mencionadas se realizó la clasificación geomecánica RMR (Rock mass rating) del macizo rocoso de

acuerdo a lo propuesto por Bieniawski en 1973 (*in* González de Vallejo *et al.*, 2002). Esta clasificación permitió correlacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y sostenimiento de taludes de una forma sencilla, bajo los siguientes parámetros: Resistencia a compresión simple de la roca, grado de fracturamiento en términos RQD, espaciamiento de las discontinuidades, estado de las discontinuidades (Abertura, rugosidad, longitud, relleno, alteración), condiciones hidrogeológicas y la orientación de las discontinuidades con respecto al talud. La metodología usada para la clasificación RMR, se presenta en el anexo 5.

2.4.3.1.- *Análisis de estabilidad del macizo rocoso.*

Para el análisis de estabilidad del macizo fue necesario llevar a cabo dos procesos. El primer proceso fue analizar la fábrica estructural de los taludes existentes en la mesa para determinar si la orientación de las discontinuidades podría resultar desfavorable con respecto a su orientación. Para esta determinación, fue necesario obtener una representación gráfica proyectada en redes estereográficas de los planos de discontinuidades, plano del talud y ángulo de fricción interna de la roca. Esta representación estereográfica, se obtuvo en base al programa Geoplot, el cual permite la representación geométrica y de orientación de planos y líneas sobre el hemisferio inferior de la red de áreas iguales. Una vez graficados los planos de discontinuidades en base al programa, se incluyeron datos geométricos del talud y ángulo de fricción interna de la roca, así mismo se realizó el análisis de orientaciones desfavorables con respecto al talud, bajo las condiciones expuestas más adelante.

Ya que ha sido determinada la cinemática de falla del talud, el segundo paso requiere un análisis de estabilidad por el método del equilibrio límite. En este método se compara las fuerzas resistentes contra las fuerzas causantes de la falla del talud. El rango entre estos dos sistemas de fuerzas se denomina *Factor de Seguridad (FS)*. Dado que el deslizamiento de los bloques se realizará a lo largo de los planos de las discontinuidades, existen fuerzas de rozamiento que se oponen al movimiento. Estas fuerzas son consecuencia de la cohesión de una superficie a la otra y por la trabazón de las irregularidades en las superficies de roce. De esta manera, la rugosidad en los planos de discontinuidades, juega un papel muy importante en el análisis de estabilidad y factor de seguridad de los diferentes mecanismos de falla. De esta manera se realizó el siguiente análisis para obtener el ángulo de fricción pico de las diferentes juntas, involucradas en la inestabilidad.

El ángulo de inclinación entre las ondas de rugosidad (i), en conjunto con el ángulo de fricción interna base (ϕ), forman el ángulo de fricción pico ($\phi + i$), entre los planos de las fracturas. El ángulo de fricción (ϕ) se obtuvo en base a la clasificación RMR y el ángulo (i) se atribuyó en base a los valores JRC obtenidos en campo y comparando los valores numéricos expuestos en los perfiles estándares.

Condiciones de Inestabilidad.

b).- Falla en cuña.

(Controlada por dos discontinuidades)

La rotura en cuña ocurre cuando un bloque de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud. El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la línea de intersección de dos planos (Figura 2.1). Las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

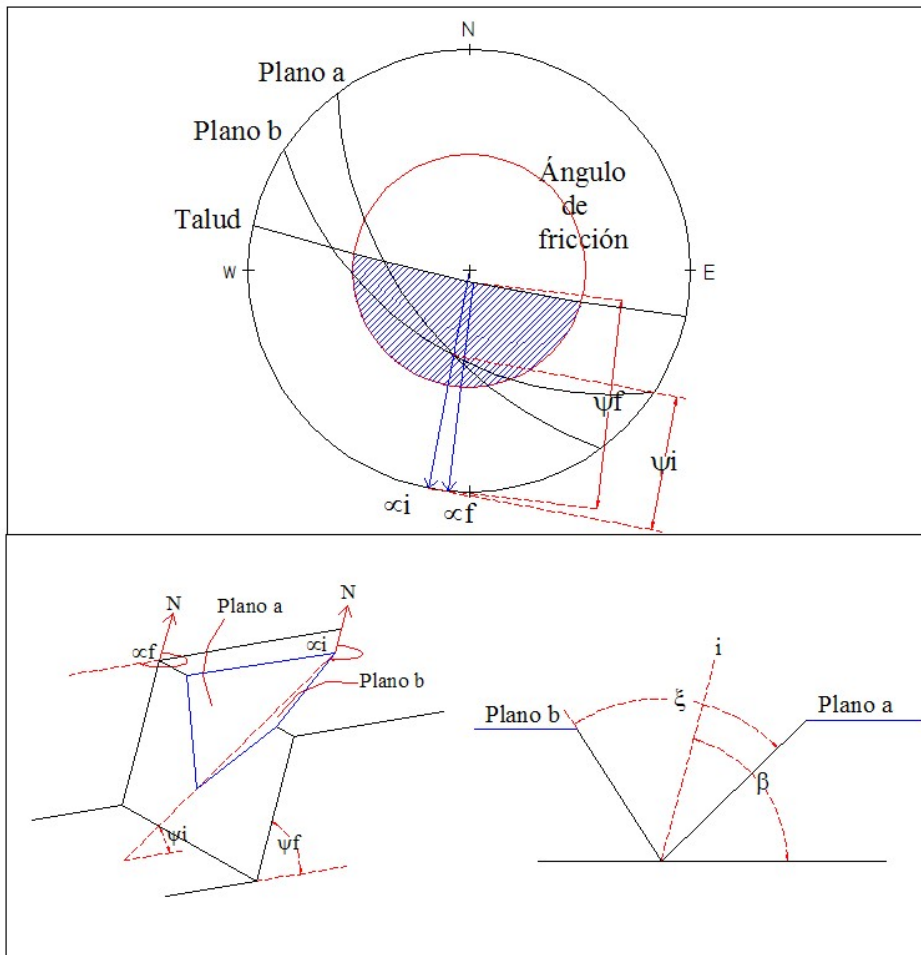


Figura 2.1.- a). Análisis cinemático con red estereográfica. b). Modelo de falla en cuña.

1. La dirección de la línea de intersección debe ser cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.

$$\alpha_i \text{ cercana a } \alpha_f$$

2. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.

$$\Psi_i < \Psi_f$$

3. El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies.

$$\phi_p < \Psi_i$$

Donde:

- ω_i = Dirección de la línea de intersección.
- ω_f = Dirección del echado de la cara del talud.
- Ψ_i = Buzamiento de la línea de intersección.
- Ψ_f = Buzamiento del talud.
- ϕ_p = Ángulo de fricción interna.

- *Factor de seguridad para mecanismos de falla en cuña.*

En 1981, Hoek y Bray (in Turner, A.K., *et al*, 1996), propusieron un análisis cinemático para mecanismos en cuña por medio de valores angulares correspondientes a las líneas de intersección de los planos que la delimitan. El tamaño de la cuña está definido por la distancia vertical, que inicia en la cresta del talud hasta la línea de intersección de los planos de fracturas que afloran hacia la cara del talud.

Un factor que se considerará en nuestro análisis es la presión intersticial, de esta manera se asume que la cuña es impermeable y la filtración del agua se producirá a lo largo de los planos de fracturas A y B, alcanzando sus valores máximos a lo largo de la línea de intersección. Las condiciones de presión intersticial anteriormente mencionadas, representan las circunstancias extremas provocadas por precipitaciones densas o prolongadas.

1.-Considerando las hipótesis anteriormente mencionadas tenemos que: El factor de seguridad, considerando terreno saturado, pero sin fractura de tensión, estará regido por la siguiente ecuación:

$$FS = (3/\gamma_r H)(C_A * X + C_B * Y) + [(A - (\gamma_w/2\gamma_r) * X) \tan \phi_A] + [(B - (\gamma_w/2\gamma_r) * Y) \tan \phi_B]$$

Donde:

- γ_r = Peso específico de la roca.
- γ_w = Peso específico del agua.
- H = Altura total de la cuña, medida por la línea de intersección.

X, Y, A, B = Factores adimensionales que dependen de la geometría de la cuña, los cuales se obtienen, en base a la proyección estereográfica de los polos y círculos máximos del talud y fracturamiento (Figura 2.2) en conjunto con las siguientes expresiones:

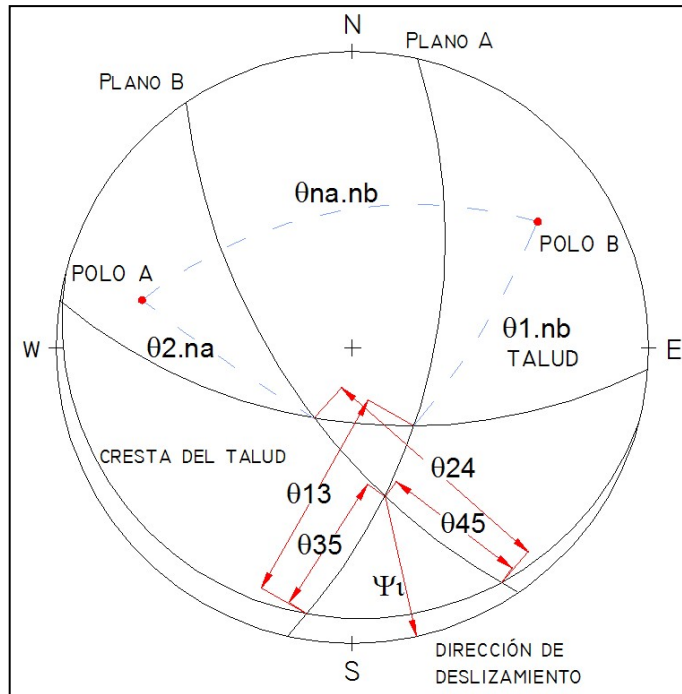


Figura 2.2.-Diagrama esquemático para la obtención de las dimensiones angulares (mecanismo de falla en cuña).

$$X = (\text{sen } \theta_{24}) / (\text{sen } \theta_{45} * \text{cos } \theta_{2na})$$

$$Y = (\text{sen } \theta_{13}) / (\text{sen } \theta_{35} * \text{cos } \theta_{1na})$$

$$A = [\text{cos } \Psi_a - (\text{cos } \Psi_b * \text{cos } \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

$$B = [\text{cos } \Psi_b - (\text{cos } \Psi_a * \text{cos } \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

Donde:

Ψ_a, Ψ_b = Echados de los planos de fracturamiento.

Ψ_i = Inclinación de la línea de intersección.

2.-En caso de que se considere el terreno seco y cohesión 0, la expresión del factor de seguridad será independiente de la altura de la cuña y de las dimensiones de los planos de la cara y cresta del talud:

$$FS = (A * \tan \phi_A) + (B * \tan \phi_B)$$

3.-En caso de considerar el mismo ϕ_p , para los dos planos que delimitan la cuña, la ecuación será la siguiente:

$$FS = (\text{sen } \beta / \text{sen}(\xi/2)) * (\tan \phi / \tan \Psi_i)$$

Donde:

β = Ángulo entre la línea de intersección de los planos y el plano horizontal.

ξ = Ángulo entre los planos de fracturamiento.

ϕ = Ángulo de fricción interna de los dos planos.

Ψ_i = Echado de la línea de intersección de los dos planos de fracturamiento.

4.-En caso de considerar saturado el talud, con diferente fricción entre los dos planos que delimitan la cuña, la ecuación será la siguiente:

$$FS = (A - (\gamma_w/2\gamma_r) * X) \tan \phi_A + [(B - (\gamma_w/2\gamma_r) * Y) \tan \phi_B]$$

c).-Falla al volteo:

(Controlada por discontinuidades de buzamiento de gran magnitud)

Las fallas al volteo ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud. Este movimiento implica una rotación de unidades, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por bloques adyacentes o por inclusión de agua en las discontinuidades. Existen diferentes tipos de vuelcos que dependen de la disposición estructural y de los aspectos geológicos del material involucrado.

En el presente trabajo, los bloques susceptibles al volteo son delimitados por sistema de fallas ortogonales, que originan una geometría de columnas divididas en bloques (Figura 2.3).

Las condiciones estructurales que se deben cumplir en una falla al volteo son las siguientes:

1. El rumbo de las capas debe ser aproximadamente paralelo a la superficie del talud. En ningún caso la diferencia debe ser mayor a 20° .
2. El echado de las capas debe tender hacia el interior del talud. La dirección del echado de las capas, entre la dirección de la cara del talud debe estar entre 160° y 200° .

$$\infty_p = (\infty_f \pm 180^\circ) \pm 20^\circ$$

3. Para que el deslizamiento intercapas ocurra, el polo del círculo máximo de la discontinuidad a volcarse debe tener una inmersión menor que la inclinación de la cara del talud menor que el ángulo de fricción. Esta condición esta formulada de la siguiente forma:

$$(90^\circ - \Psi_p) \leq (\Psi_f - \phi_p)$$

Donde:

∞_p = Dirección del echado del plano.

∞_f = Dirección del echado de la cara del talud.

Ψ_p = Buzamiento de las capas.

Ψ_f = Buzamiento de la superficie del talud.

ϕ_p = Ángulo de fricción a lo largo de los planos.

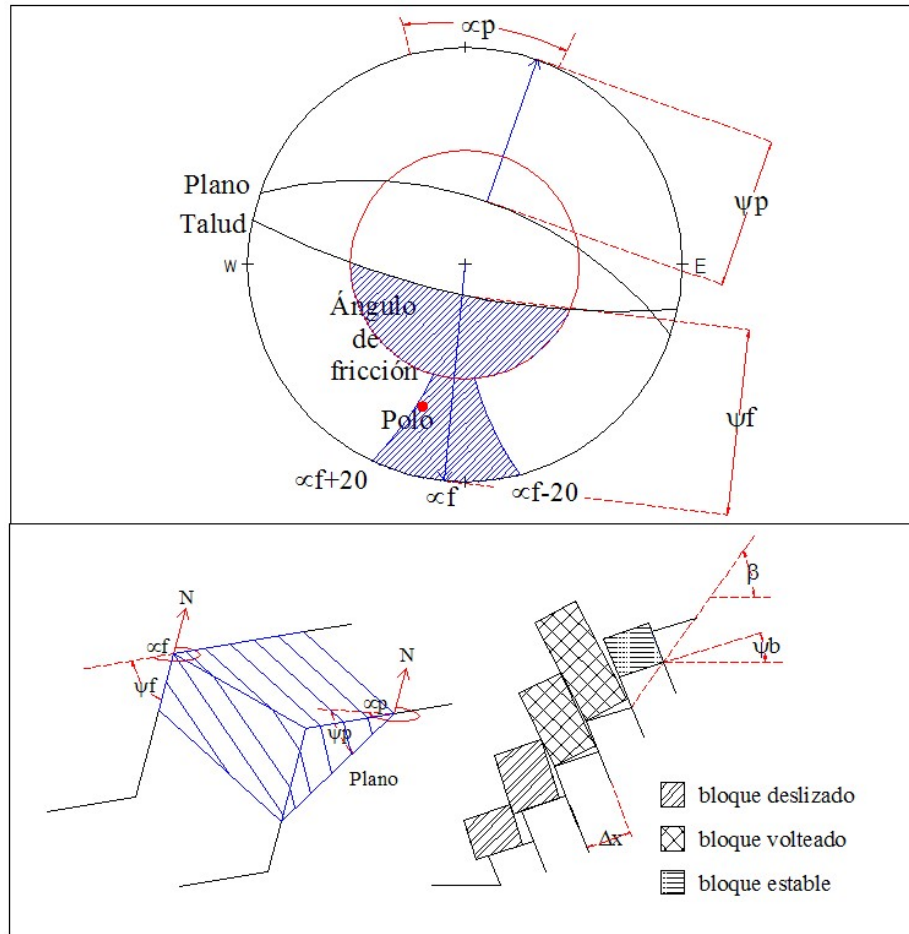


Figura 2.3- a). Análisis cinemático con red estereográfica. b). Modelo de estabilidad al volteo.

• Análisis de estabilidad.

El volteo es posible cuando un sistema de discontinuidades bien desarrollada tiene un echado en forma escalonada hacia la cara del talud. Las condiciones básicas para el deslizamiento y/o el volteo de un bloque a lo largo de un plano, fueron descritas por Hoek y Bray en 1981 (in Suárez-Díaz, J., 1998). Los autores representan las condiciones de volteo en una gráfica, donde se relaciona las dimensiones de los bloques inestables y el echado del plano sobre el que descansan. (Figura 2.4).

Los diferentes mecanismos de falla estarán regidos por dos factores: la relación de esbeltez ($\Delta x/h$) y el echado de la base plana a lo largo de la cual descansan los bloques (β).

La gráfica esta dividida en cuatro regiones de estabilidad definidas de la siguiente manera:

- Región 1.- $\beta < \phi_p$ y $(\Delta x/h) > \tan \beta$
El bloque es estable, no tenderá a deslizarse ó volcarse.

- Región 2.- $\beta > \phi_p$ y $(\Delta x/h) > \tan \beta$

El bloque se deslizará, pero no será inestable al volcamiento.

- Región 3.- $\beta < \phi_p$ y $(\Delta x/h) < \tan \beta$

El bloque volcará, pero no será inestable al deslizamiento.

- Región 4.- $\beta > \phi_p$ y $(\Delta x/h) < \tan \beta$

El bloque puede deslizarse y volcarse simultáneamente.

El factor que gobierna el vuelco de un bloque es la ubicación del vector de su peso, con respecto al punto pivote del mismo (Figura 2.5). Si el rango $(\Delta x/h)$ es menor que $(\tan \beta)$, entonces la fuerza resultante debida al peso del bloque se situará fuera del pie del bloque y un momento volcador estará presente sobre el punto pivote. Así mismo, el factor gobernante para el deslizamiento, será la relación $(\beta > \phi_p)$.

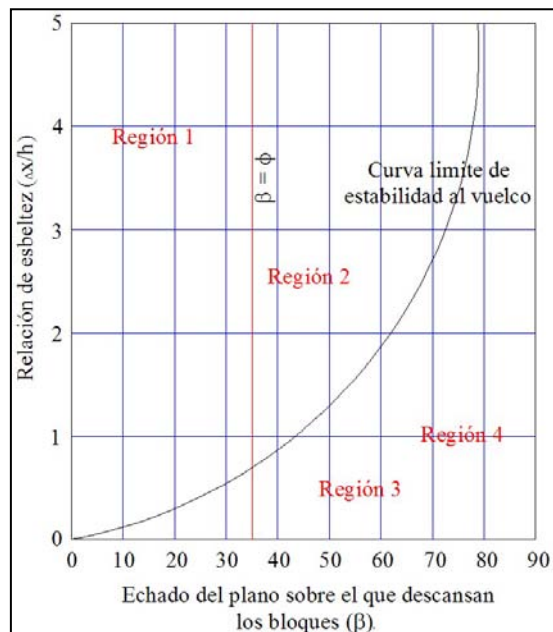


Figura 2.4.- Condiciones para el deslizamiento y vuelco de bloques sobre un plano. (Modificado de Hoek y Bray, 1981) (in Suárez-Díaz, J., 1998)

- Factor de seguridad para mecanismos de falla al volteo.

Para que cinemáticamente sea posible el vuelco, deben presentarse las siguientes condiciones:

- Debe existir un juego de discontinuidades perpendiculares a la superficie inclinada que delimiten los bloques.
- $\beta < \phi_p$ y $(\Delta x/h) < \tan \beta$

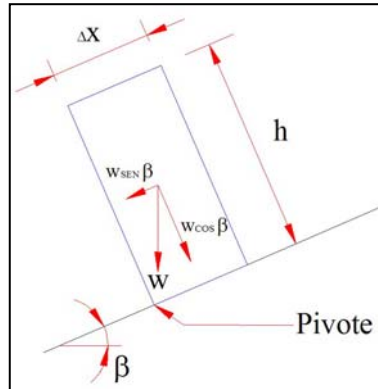


Figura 2.5- Representación de fuerzas que actúan en un bloque, bajo condiciones de vuelco. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002).

El factor de seguridad se obtiene tomando en consideración los momentos que actúan sobre el punto pivote:

$$\Sigma M_o = W \cos \beta * (\Delta x/h) - W \sin \beta * (\Delta x/h)$$

De acuerdo a esta expresión, el factor de seguridad se puede definir de la siguiente manera:

$$FS = \Sigma \text{ Momentos que resisten} / \Sigma \text{ Momentos que resisten}$$

$$FS = W \cos \beta * (\Delta x/h) / W \sin \beta * (\Delta x/h)$$

$$Fs = (\Delta x/h) / \tan \beta$$

3.4.3.2. - Simulación de trayectoria de los bloques inestables.

La simulación de la trayectoria ladera abajo de los bloques inestables, se aplicó con la finalidad de delimitar un radio de riesgo, del punto de caída al punto máximo de reposo de los bloques.

Para analizar la trayectoria se utilizó el programa slide 5.0, RocFall (Risk Analysis of Falling Rocks on Steep Slopes) 1998-2002, el cual busca y analiza por medio de análisis estadísticos 50 posibles trayectorias de bloques de roca a lo largo de la ladera. Para este análisis el programa necesita parámetros que dependen del peso de los bloques delimitados por la geometría del fracturamiento y características geotécnicas y geométricas del perfil. Los parámetros, se seleccionaron en base a los datos de laboratorio y características observadas en campo. Cabe mencionar que será muy importante usar el juicio ingenieril, para ajustar los datos con respecto a los efectos producidos por el tamaño y geometría de los bloques inestables, todo esto con la finalidad de obtener una simulación de trayectoria más real.

En base a los parámetros y características anteriormente mencionados. El análisis de las trayectorias de los bloques, se obtendrán en base a los siguientes pasos:

- 1.- Definir la geometría del perfil.
- 2.- Definir las características geotécnicas de los materiales involucrados.
- 3.- Asignar los materiales a cada segmento del perfil.
- 4.- Definir los puntos iniciales de los bloques inestables de roca.
- 5.- Correr el análisis.
- 6.- Graficar los resultados de trayectoria y longitud máxima de reposo de cada bloque.

Finalmente, obtendremos como resultado: Una sección geológica con trayectorias de bloques inestables, puntos máximos de reposo y una gráfica (no. de rocas – longitud de reposo), que estará sujeta a su interpretación.

3.5.- Análisis estabilidad y factor de seguridad por falla circular en unidad CTiVaT.

El análisis de estabilidad de la ladera, se aplico con la finalidad de delimitar la masa inestable por medio de un plano de falla crítica que tuviera un valor de factor de seguridad mínimo igual a uno.

Para analizar el plano de falla crítica se utilizó el programa slide 5.0, Rocscience Inc. 1998-2002., el cual busca y analiza 400 posibles superficies de deslizamiento a lo largo de planos circulares. En la búsqueda de los planos el programa utiliza los métodos de Jambu y Bishop. Para nuestro caso, se utilizo el método de Jambu, al cual separa la masa deslizante por medio de una superficie de falla curva, no circular, ajustándose mejor al tipo de falla presente en la zona de estudio.

El método de Jambu divide la masa deslizada en “n” rebanadas verticales y establece el equilibrio de las fuerzas actuantes en cada rebanada con respecto al centro de la curva o plano de falla.

Para hacer la modelación, fue necesario obtener una sección topográfica donde se delimitaran contactos litológicos y se atribuyeran parámetros y propiedades mecánicas de los materiales involucrados. El perfil en estudio se trazo de las coordenadas 296377, 2169011 a las coordenadas 295682, 2168949 a lo largo de una superficie inestable delimitada en base a fotografías aéreas y modelos de elevación. Las unidades geológicas se ubicaron en base al mapa geológico y columna litológica de la zona.

Una vez dibujada la sección del talud a escala, conjuntamente con la geología y escurrimientos de agua, así como fuerzas externas y valores geotécnicos. Se obtendrá el valor del factor de seguridad graficado en la posición de la superficie deslizada.

3.- RESULTADOS

3.1.- Geología

El sector de Tzitzio forma parte de una extensión del elemento morfológico generado por conjuntos estructurales, denominado como Sierra Madre Occidental, la cual esta limitada al sur por la Sierra Madre del Sur y superpuesta al norte por el Cinturón Volcánico Mexicano. La morfología del área es el resultado de una erosión transversal activa que corta dos grandes secuencias, una detrítica continental conformada por conglomerados, areniscas y lutitas y otra volcanoclástica de derrames andesíticos, conglomerados y areniscas volcánicas. Las unidades de roca que afloran en el área constituyen una columna litológica, dentro de la cual se tienen rocas que se depositaron en ambientes de cuenca (marginal) y continentales, así como rocas volcánicas e ígneas intrusivas (Islas *et al*, 1989).

Islas *et al*, (1989) definen una estratigrafía compuesta por un basamento de rocas sedimentarias metamorizadas de edad Triásico Jurásico-Medio. Sobreyaciendo a este basamento, a través de un contacto discordante, tenemos la presencia de capas rojas del Eoceno-Oligoceno, que a su vez son coronadas, discordantemente por secuencias volcano-sedimentarias con edad radiométrica en la base de 20 m.a. (Mioceno). Las rocas que afloran en la zona de estudio se dividieron respecto a sus características litológicas y morfológicas, en 5 unidades cartográficas, las cuales se describen con apoyo de la carta geológica y columna litológica. (Figura 3.1, 3.2) de la siguiente manera:

Unidad de Capas Rojas (CTo-mCR)

Esta unidad se encuentra en la zona sureste del mapa geológico (Figura 3.2), con una elevación que va desde 1350 hasta 1750 m.s.n.m. y forma la base de la columna litológica de la zona (Figura 3.1).

Islas *et al*, (1998) definen esta unidad como una secuencia detrítica continental de capas rojas, dividida por sus características de la base a la cima en tres miembros. La zona de estudio toma lugar en lo que los autores describen como miembro c, correspondiente a la cima de la unidad de capas rojas. Este miembro está compuesto por una alternancia de areniscas y limolitas bien estratificadas en capas que varían de 5 a 20 cm de espesor; las areniscas están compuestas por granos de cuarzo y fragmentos líticos de granulometría que varía de gruesa a fina hacia su base que son soportados por un matriz limo arcilloso de color rojizo. Estudios petrográficos realizados por los mismos autores, definen granos de cuarzo bien clasificados, subredondeados y posibles líticos no identificables en su composición.

En base a la descripción de los afloramientos estudiados en el área de estudio, la unidad de capas rojas consiste de las siguientes características: Esta unidad está compuesta por una alternancia detrítica bien estratificadas de limolitas con espesores máximos de 1.60 m y areniscas de grano fino cuyos espesores varían de 5 cm a 10 cm (Figura 3.3). La secuencia sedimentaria presenta un color rojizo y está basculada 05° hacia el SW, además de estar afectada por fallas normales N80/70°S y fallas conjugadas N85°/80°S (Figura 3.3). En

contacto erosional se encuentran canales conformados por paquetes masivos de areniscas de grano grueso y limonitas con espesores máximos de 30 cm (Figura 3.4).

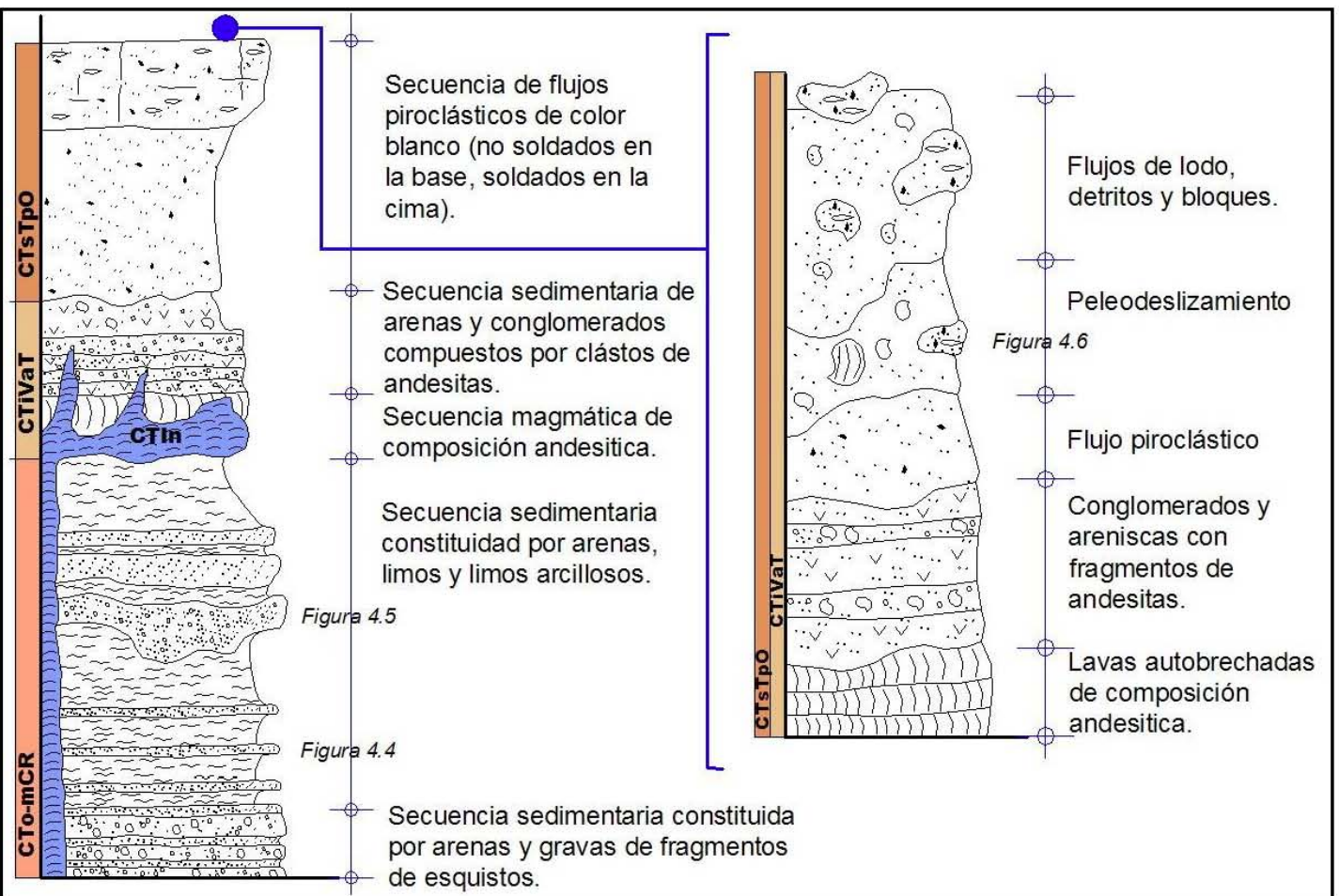


Figura 3.1.- Columna litológica a detalle de la zona en estudio, se incluyen los procesos de remoción en masa actuales y la ubicación de las muestras de suelo.

Figura 3.2.- Carta geológica del área de estudio, escala 1:50000. En esta carta se ubican las estaciones de fracturamiento de la mesa de Tzitzio.

Unidad de Intrusivo (CTIn)

Esta unidad se encuentra en la zona sur del mapa geológico (Figura 3.2), con una elevación que va desde 1750 hasta 1950 m.s.n.m.

La secuencia sedimentaria de capas rojas (CTo-mCR) y parte de la secuencia volcánica andesítica (CTiVaT) se encuentran afectada por intrusivos de composición dacítica y diorítica, los cuales se presentan en forma de diques tabulares, sills y domos que conforman lomerios (Figura 3.2).



Figura 3.3.- Alternancia sedimentaria de limonitas y areniscas, afectadas por un sistema de fallas normales con direcciones ($N80^{\circ}/70^{\circ}S$ y $N85^{\circ}/80^{\circ}S$) en unidad de capas rojas (CTo-mCR).

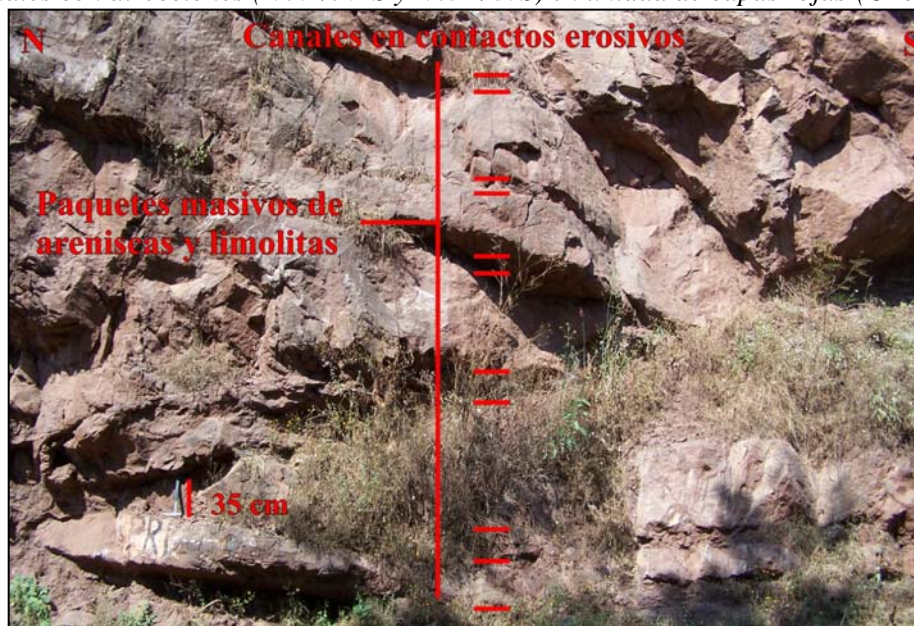


Figura 3.4.- Canales en contacto erosivo conformado por una alternancia de limonitas y areniscas de grano grueso en unidad de capas rojas (CTo-mCR).

Unidad de Secuencia Volcánica andesítica (CTiVaT)

Esta unidad cubre la mayor zona del mapa geológico (Figura 3.2), 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. Los paquetes lávicos que conforman esta unidad presentan un color gris claro de textura fanerítica con minerales observables de feldespatos, cuarzo y micas. Subyaciendo a los paquetes lávicos, se encuentran niveles de areniscas de color rojizo poco compactadas y bien estratificadas. La columna es seguida con un nivel de derrame de rocas volcánicas de color gris de textura fanerítica con minerales observables de feldespatos, anfíboles y clorita. Sobreyaciendo al derrame se encuentran paquetes de brechas volcánicas de color café, poco compactados, coronados por niveles de ignimbritas vítreas soldadas de color claro con fragmentos de vidrio y pómez envueltos en una matriz vítrea.

En base a la descripción de los afloramientos estudiados en el área de estudio, la unidad volcánica se agrupa en cuatro litologías principales, las cuales presentan las siguientes características:

Como base encontramos lavas autobrechadas de composición andesítica, coronada por una secuencia sedimentaria de conglomerados masivos y areniscas. Los conglomerados tienen un espesor de hasta 3 m, conformado por diferentes clastos andesíticos soportados por una matriz arenosa, mientras que las areniscas presentan espesores que van de 10 a 20 cm, también con clastos de la misma composición. Sobreyaciendo se encuentra una unidad intermedia compuesta por flujos piroclásticos de color gris muy alterados.

Afectando a toda la secuencia se localizan grandes cuerpos intrusivos de composición diorítica en forma de diques (CTIn).

Secuencia de flujos piroclásticos (CTsTpO)

Esta unidad se encuentra en la cima de nuestra columna litológica en la zona norte del mapa geológico (Figura 3.2), con una elevación que va desde 1950 hasta 2050 m.s.n.m. (Figura 3.1). La unidad está conformada por grandes paquetes de Ignimbritas vítreas muy compactadas de color blanco, con fragmentos subangulosos de andesitas y estructuras de fiammes hacia la cima. Fallas normales con dirección NE-SW en la parte sur y centro de la mesa separan grandes porciones de roca. En la base de esta unidad se encuentran paleodeslizamientos conformados por grandes bloques de lavas autobrechadas e ignimbritas soldadas, los cuales fueron transportados dentro de una densa matriz arcillosa (Figura 3.5).

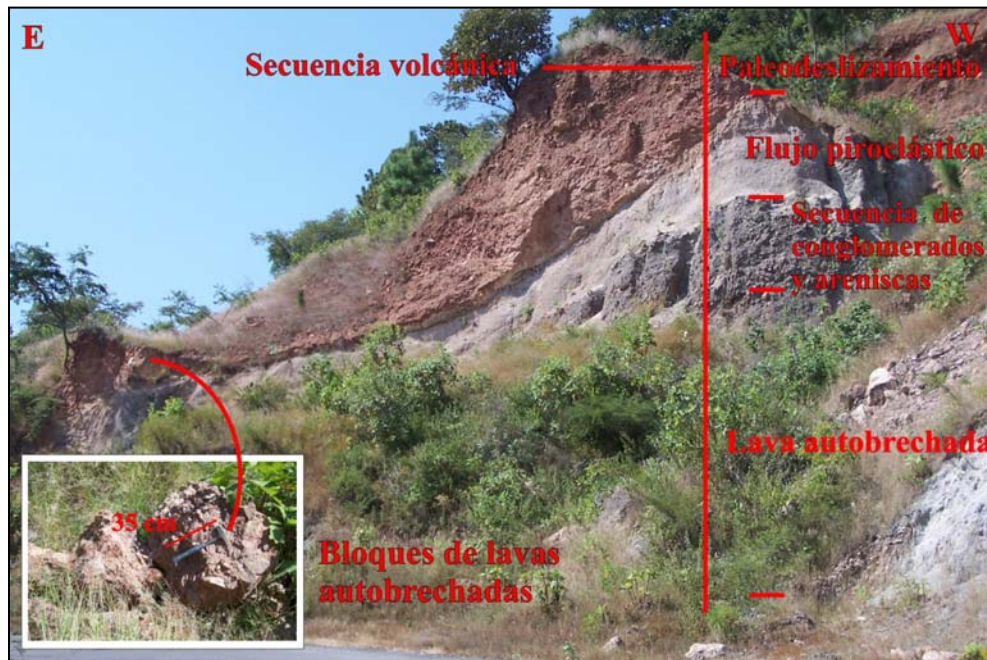


Figura 3.5.- Secuencia volcánica compuesta por lavas, secuencia sedimentaria, flujos piroclásticos y paleodeslizamientos, en unidades de secuencia de flujos piroclásticos (CTsTpO).

3.2.- Análisis morfológico y clasificación de los cuerpos inestables (PRM)

La formación geológica y estructura presente en la región de Tzitzio, es el factor determinante en el comportamiento de los PRM de la zona, a razón de la sobreposición de unidades mecánica y físicamente muy diferentes. Este factor influye en el mecanismo de falla y comportamiento de la masa en movimiento a lo largo del talud. Otro factor importante es la percolación y escurrimiento de agua constante, a lo largo del contacto litológico, que crea altos niveles de presión de poro en los materiales involucrados. La evidencia más notable es el alto porcentaje de humedad natural del suelo en toda la época del año, cabe resaltar que la zona es el inicio de la región de Tierra Caliente.

La topografía de la región está controlada por dos unidades litológicas importantes (Figura 3.1 y 3.2):

Unidad CTsTpO: Donde la geometría del fracturamiento, provoca la caída, el deslizamiento y el volteo de grandes bloques de roca.

Unidad CTiVaT: En esta unidad encontramos suelos susceptibles a movimientos bajo la influencia de esfuerzos aplicados por el agua. Esta unidad esta conformada por sustratos volcánicos de brechas y flujos piroclásticos constituidas por arenas arcillosas.

De manera global y tomando en cuenta la estructura geológica y características geotécnicas de las unidades descritas anteriormente, la inestabilidad en la zona corresponde a movimientos o extensiones laterales profundas. A razón de que la geometría del fracturamiento y la geomorfología presente en la unidad volcánica (CTsTpO) situada en la

cima de nuestra columna, se piensa está siendo controlada por la actividad del material subyacente bajo la influencia de saturación y peso del macizo rocoso (Figura 3.6).

De manera local, podemos describir los PRM que se presentan en el Km 8 + 500 de la carretera El Temazcal-Tzitzio. El cual se ha caracterizado como un movimiento complejo, compuesto por dos tipos de movimientos principales:

1).- Caídas y Volcamientos de roca: Este tipo de fenómenos se presentan a lo largo de la mesa de Tzitzio en escarpes de 86° de inclinación, dentro de la unidad geológica CTsTpO. Las superficies que provocan la inestabilidad corresponden a las diferentes familias de discontinuidades, que se orientan adversamente a la cara del talud, mismas que separan bloques de roca con pesos de hasta 3 tn, los cuales al caer en el flujo de arcillas, son transportados en superficie, debido a la diferencia de densidades (ver capítulo de propiedades geomecánicas de rocas y suelos)(Figura 3.6 y 3.7).

2).- Flujos de arcillas: Generados por un gran volumen de material que se desplaza a lo largo de la ladera, bajo condiciones de saturación. El movimiento de la masa lo componen diferentes frentes de avance que no comparten planos de deslizamiento (Figura 3.6).

De acuerdo a lo anteriormente descrito, el mecanismo de falla corresponde al fenómeno de movimiento o extensión lateral a razón de la definición propuesta por Suárez-Díaz (1998), este fenómeno consiste en el fracturamiento de unidades rígidas, seguidas de hundimientos y deformaciones en la cima, separación, caídas, vuelcos y desplomes de roca, los cuales son generados por la actividad plástica de las unidades subyacentes que saturadas se comportan como un flujo denso que trasportara los bloque de roca ya separados.

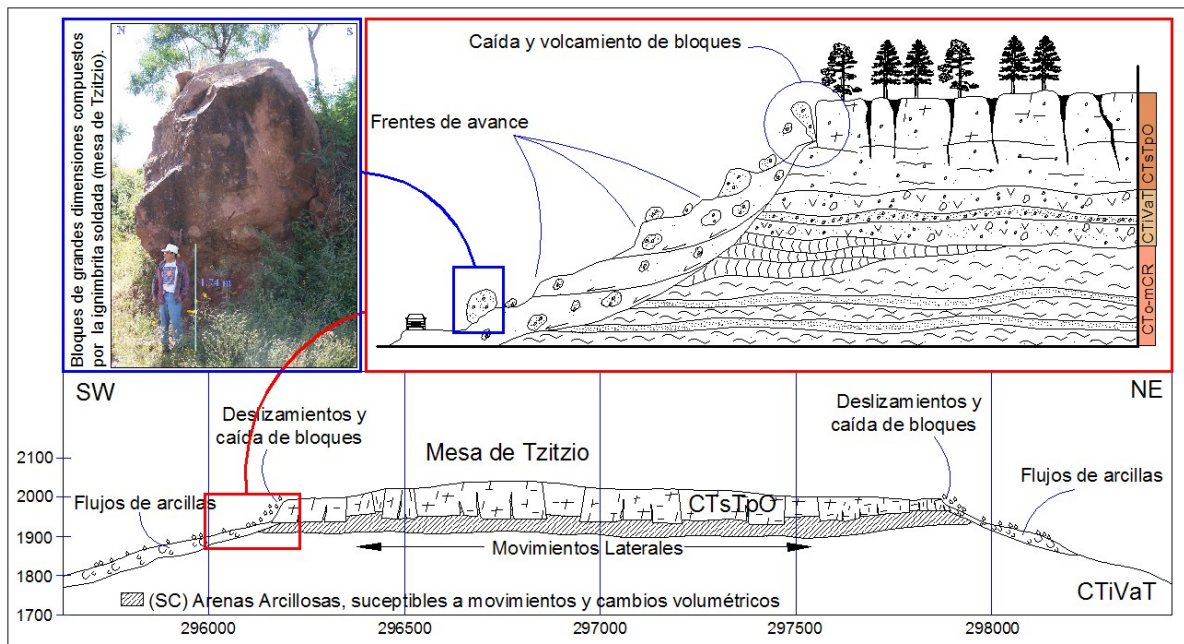


Figura 3.6.- Sección geológica, donde se explican los PRM a nivel regional (movimientos laterales). En la parte superior de la figura se representan los diferentes frentes de avance del flujo y los grandes bloques de roca que son transportados en superficie.



Figura 3.7.- Frente de avance del flujo de arenas arcillosas. En esta figura se pueden ver los grandes bloques de roca que son transportados en superficie.

En la carta geológica de la zona se identifican dos procesos compuestos, cuya trayectoria y dimensión es la siguiente: El PRM número 1 (Figura 3.8), corresponde a un cuerpo compuesto por diferentes flujos de arcillas y bloques de roca que no tienen un plano de deslizamiento en común. La extensión total de la masa desplazada corresponde a 4000 m ladera abajo, un ancho máximo de 560 m y un ancho de corona de 400 m que se encausa a lo largo de cañadas con orientación promedio $N40^{\circ}-50^{\circ}W$. El PRM número 2 (Figura 3.8), corresponde a dos flujo de arcillas y bloques, que se encausan ladera abajo para formar una sola masa desplazada. Su trayectoria es de 2500 m de largo, tiene un ancho máximo de 730 m y un ancho de coronas de 520 m y 300 m respectivamente que se encausa a lo largo de cañadas con orientación promedio $N40^{\circ}-50^{\circ}W$, similares a las orientaciones que presenta diferentes rasgos estructurales marcados en la cima de la mesa sobre imágenes aéreas (fosa y falla normal).

Es importante aclarar que la masa total desplazada de cada PRM, ha sido el producto de movimientos sucesivos con diferentes frentes de avance que no comparten una misma superficie de falla. Como ejemplo se pueden citar los flujos de arcillas identificados dentro del PRM número 1: En la parte alta del mismo, se encuentran tres flujos de arcillas y bloques con dirección de desplazamiento hacia el SW, los cuales se desprenden de coronas de 80 m de ancho y desniveles de hasta 20 m. Ladera abajo, se identifican cuatro flujos de arcillas y bloques con una dirección de desplazamiento hacia el SW, que se desprenden de coronas de hasta 300 m de ancho. Cabe mencionar que los movimientos de los flujos de arcillosas y bloques son constantes, debido al escurrimiento que existe en el contacto litológico durante todo el año.

Figura 3.8.- Trayectorias y dimensiones de los flujos de arcillas presentes en la zonal. Los círculos azules representan la ubicación de las cuatro estaciones de fracturamiento y de los tres muestreo de suelos. El círculo negro representa la ubicación del tramo carretero 8 + 500 de la carretera El Temazcal Tzitzio.

3.3.- Patrones de fracturamiento

Los patrones de fracturamiento de la zona de estudio, fueron analizados a nivel regional y a nivel local: Para el análisis a nivel regional se elaboró un mapa de densidades a escala 1:50,000, así mismo se obtuvo un diagrama de rosetas general de la zona y un diagrama de rosetas de cada unidad geológica, con las cuales se definieron las diferentes direcciones preferentes de lineamientos.

Para el análisis a nivel local se elaboraron cuatro mapas de densidades en base a imágenes sombreadas proyectadas en una escala de 1:5000, bajo cuatro diferentes proyecciones de luz (H47V51, H48V46, H125V49, H100V37). Las letras H y V, representan la posición de la proyección de luz: La letra V representa la posición vertical en dirección de una línea azimutal que es representada por la letra H. Así mismo se elaboraron cuatro diagramas de rosetas de fracturamiento, correspondiente a cada mapa, donde se definieron las diferentes direcciones preferentes de lineamientos.

En base al análisis estadístico de los mapas de densidades y rosetas de fracturamiento estudiados en el área, las orientaciones preferentes de lineamientos quedan descritas de la siguiente forma:

- *Fracturamiento regional*

El fracturamiento regional se presenta a través de un diagrama de rosetas, que se elaboró en base a un análisis estadístico de los diferentes rasgos estructurales que se marcaron sobre imágenes sombreadas, las cuales fueron proyectadas en escala 1:50,000 (Figura 3.9). Dos direcciones preferentes de lineamientos resultaron de la interpretación de este diagrama:

- 1.- Una primera orientación preferente de lineamientos con dirección N40°-50°E. Orientación más común de fracturamiento
- 2.- Una segunda orientación preferente de lineamientos con dirección N40°-50°W. Con menor número de lineamientos.

La densidad de fracturamiento queda representada por dos regiones máximas y una región mínima, en base a la interpretación de la figura 3.9.

- 1.- La región máxima uno, se encuentra en la parte noroeste del mapa, dentro de la unidad CTiVaT.
- 2.- La región máxima dos, se encuentra en la parte sur del mapa y toma lugar en la conjunción de contactos de las unidades CTiVaT, CTIn y CTo-mCR (Figura 3.9). Lo que lleva a pensar que posiblemente la intrusión de la unidad CTIn, esta generando el fracturamiento en esa zona.
- 3.- La región mínima se encuentra en la unidad CTsTpO, lo cual refleja estratigráficamente su edad relativamente joven.

Figura 3.9.- a). Imagen sombreada más representativa de la zona b). Mapa de lineamientos marcados sobre cuatro imágenes sombreadas a diferente proyección de luz c). Mapa de densidades elaborado en base al mapa de lineamientos d). Diagrama de rosetas general de la zonal, elaborado en base a un análisis estadístico de los lineamientos.

Para poder comprender la evolución y correlación de los rasgos estructurales en las diferentes unidades geológicas de la zona, se elaboraron diagramas de rosetas para cada unidad geológica (Figura 3.10), tomando como base el mapa geológico y las imágenes sombreadas proyectadas a escala 1:50,000. Los diagramas de rosetas representados en la figura 3.10, definen tres direcciones preferentes de lineamientos:

- 1.- Una primera orientación con dirección $N40^{\circ}-50^{\circ}W$, la cual afecta a las unidades más antiguas de nuestra columna litológica (CTo-mCR y CTIn) (Figura 3.10).
- 2.- Una segunda orientación con dirección promedio $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, la cual afecta a todas las unidades de la columna litológica (CTo-mCR, CTIn, CTiVaT y CTsTpO) (Figura 3.10).
- 3.- Una tercera orientación con dirección N-S, la cual afecta a la unidad más joven de la columna litológica (CTsTpO) (Figura 4.10).

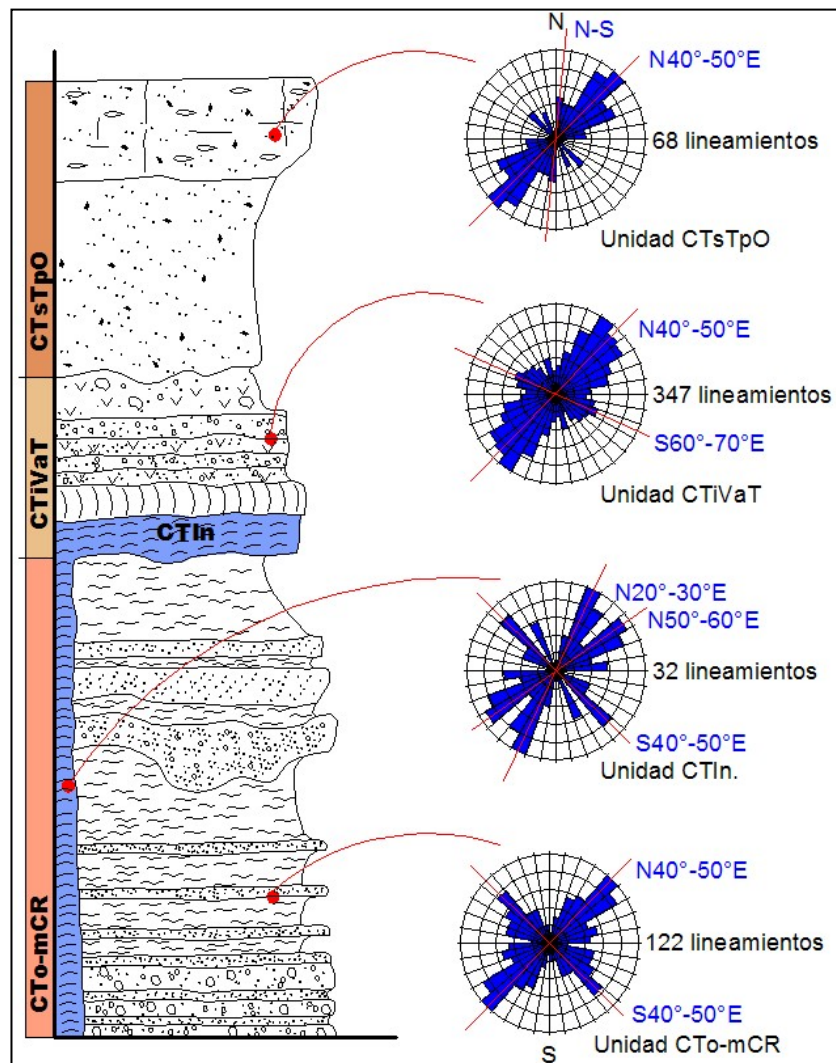


Figura 3.10.- Rosetas de lineamientos para cada unidad geológica, las cuales definen las direcciones preferentes de lineamientos.

· *Fracturamiento Local*

El fracturamiento local se presenta a través de los diferentes diagramas de rosetas, que se elaboraron en base a un análisis estadístico de los diferentes rasgos estructurales que se marcaron sobre imágenes sombreadas, las cuales fueron proyectadas en escala 1:5000 en cuatro diferentes proyecciones de luz (H47V51, H48V46, H125V49, H100V37). (Figura 3.11). Después del análisis de rosetas y mapas de densidades para cada imagen, se realizó la sobreposición de ellas, con la finalidad de obtener un análisis de fracturamiento a nivel local, donde se incluyen la mayor parte de los rasgos morfológicos de la zona (Figura 3.11). El diagrama de rosetas de la figura 3.11, representa la sumatoria de los rasgos estructurales de la zona, marcados sobre las distintas imágenes sombreadas. En base a este diagrama, se encontraron cuatro orientaciones preferentes de lineamientos:

- 1.- Una primera orientación preferente de lineamientos con dirección promedio $N40^{\circ}-60^{\circ}E$ (Figura 3.11).
- 2.- Una segunda orientación preferente de lineamientos con dirección promedio y menor número de lineamientos, con dirección promedio $N50^{\circ}-70^{\circ}W$ (Figura 3.11).
- 3.- Una tercera orientación preferente de lineamientos con dirección promedio $N70^{\circ}E$, $S80^{\circ}E$. (Figura 3.11).
- 4.- Una cuarta orientación preferente de lineamientos con dirección promedio $N20^{\circ}E$, $S20^{\circ}E$. (Figura 3.11).

La densidad de fracturamiento a nivel local queda representada por una region máxima, en base a la interpretación del mapa de densidades que se presenta en la figura 3.11.

- 1.- La región máxima, se encuentra en la parte noroeste del mapa, dentro de la unidad litológica CTiVaT.
- 2.- En general la densidad que se presenta a nivel regional es muy homogéneo con variaciones siempre en el rango de 0 a 0.0125 unidades por m^2 .

Figura 3.11.- a). Imagen sombreada más representativa de la zona b). Mapa de lineamientos marcados sobre cuatro imágenes sombreadas a diferente proyección de luz c). Mapa de densidades elaborado en base al mapa de lineamientos d). Diagrama de rosetas general de la zonal, elaborado en base a un análisis estadístico de los lineamientos.

En base a las características generales de lineamientos identificadas en la zona a nivel regional, a nivel local y por unidades, se concluye lo siguiente:

- En general existe una correspondencia a nivel regional y a nivel local: Tres direcciones preferentes de lineamientos se encuentran en las dos escalas. $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ y N-S. (Figura 3.9 y 3.11)
- A nivel local existe una dirección preferente de lineamientos E-W (Figura 3.11).
- En base a la columna litológica en conjunto con las rosetas para cada unidad, se pueden describir dos etapas de lineamientos: La primera etapa corresponde a lineamientos con orientación $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ que afectan a las dos unidades más antiguas (CTo-mCR y CTIn). La segunda etapa corresponde a lineamientos con orientación $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, los cuales se encuentran afectando a todas las unidades de la columna.
- La unidad de la cima de nuestra columna litológica (unidad CTsTpO), presenta una orientación muy particular de lineamientos con tendencia N-S.
- En base al análisis de los mapas de densidades se pueden describir dos regiones máximas de lineamientos: La primera región con correspondencia en las dos escalas se encuentra en la parte noroeste del mapa, dentro de la unidad litológica CTiVaT. La segunda región se encuentra en la parte sur del mapa y toma lugar en la conjunción de contactos de las unidades CTiVaT, CTIn y CTo-mCR (Figura 3.9). Lo que lleva a pensar que posiblemente la intrusión de la unidad CTIn, esta generando el fracturamiento en esa zona.

3.4.- Estudio Geomecánico

3.4.1.- *Propiedades y mineralogía de suelos*

En base al sistema de evaluación de propiedades y resultados de laboratorio (Tabla 3.1), expuesto en el capítulo de metodología, las muestras de suelo quedan descritas de la siguiente manera:

PCA 1 (Tzit-1).- El primer PCA se ubicó en las coordenadas 295851 este y 2168404 norte en proyección UTM (Figura 3.8), a solo algunos metros de la carretera Temazcal-Tzitzio. En el afloramiento, se excavó hasta una profundidad de 1.20 m, donde se tomo muestra de un material compuesto por arena y fragmentos de roca de diversos tamaños soportados por una matriz de arcilla color roja. Su clasificación ingenieril corresponde a Arenas Arcillosas (SC): Mezcla mal graduada de arenas y arcillas con características de plasticidad baja a media. Es decir, que el suelo no será capaz de soportar deformaciones, sin sufrir variaciones volumétricas apreciables.

En base a valores de consistencia relativa y valores de compresión simple, la muestra se clasifica como de tipo rígida, con características apreciables de resistencia al corte. Como el valor de la contracción lineal del suelo es menor a 9 %, se dice que el suelo no tendrá una actividad significativa de contracción expansión.

La relación de vacíos (e) y porosidad (n), atribuyen características de suelos rígidos, poco susceptibles a deformación. Los valores de índice de liquidez, clasifican a la muestra como de tipo preconsolidado (Crespo-Villalaz, 1980), lo que quiere decir que el suelo ha estado sometido a esfuerzos producidos por movimientos del terreno. El grado de saturación tan alto que presenta la muestra, indica la vulnerabilidad a deformaciones y movimientos bajo esfuerzos generados por saturación.

Finalmente, el suelo de la muestra 1, se puede definir en base a las características anteriormente analizadas como una mezcla mal graduada de arena y arcilla preconsolidada, de consistencia natural rígida, poco susceptible a expansión contracción y poco susceptible a deformaciones apreciables, cabe mencionar que si la muestra de suelo sufre deformaciones tendrá variaciones volumétricas.

Los círculos de Mohr de la muestra, definen al suelo como poco cohesivo, con alta resistencia de esfuerzos cortantes, pero muy susceptible a esfuerzos generados por la presión de poro, esto debido a las características de retención de agua que presenta la muestra.

PCA 2 (Tzit-2).- El segundo PCA se ubicó en las coordenadas 295726 este y 2168174 norte en proyección UTM (Figura 3.8), dentro de una cañada, situada a 30 metros de la carretera Temazcal-Tzitzio. En el afloramiento se excavó en uno de los taludes formados por la cañada, donde se tomo muestra de un material compuesto por arenas finas soportadas por una matriz arcillosa de color rojo.

(CL) Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, resistencia media a la disgregación en estado seco y susceptible a variaciones volumétricas apreciables al sufrir deformaciones.

En base a valores de consistencia relativa, y valores de compresión simple, la muestra se clasifica como de tipo semi-rígida, con características apreciables de resistencia al corte.

Como el valor de la contracción lineal del suelo es mayor a 9 %, se dice que el suelo tendrá una actividad significativa de contracción expansión.

La relación de vacíos (e) y porosidad (n), atribuyen características de suelos medianamente suaves, susceptibles a la deformación. Los valores de índice de liquidez clasifican a la muestra como de tipo preconsolidado (Crespo-Villalaz, 1980), lo que quiere decir que el suelo ha estado sometido a esfuerzos producidos por movimientos del terreno.

Finalmente, el suelo de la muestra 2, se puede definir en base a las características anteriormente analizadas como una arcilla mal graduada, preconsolidada, de consistencia natural semi-rígida, susceptible a expansión contracción y susceptible a deformaciones y variaciones volumétricas significativas.

Los círculos de Mohr de la muestra, definen al suelo como cohesivo, susceptible a sufrir deformaciones por la actividad de contracción expansión, bajo esfuerzos generados por la presión de poro.

PCA 3 (Tzit-3).- El tercer PCA se ubicó en las coordenadas 295631 este y 2168986 norte en proyección UTM (Figura 3.8), a 400 metros al oeste de la carretera Temazcal-Tzitzio. En el afloramiento se excavó hasta una profundidad de 1.50 m, donde se tomo muestra de un material compuesto por arenas y fragmentos de roca de diversos tamaños soportados por una matriz arcillosa color café claro.

(SC) Arenas Arcillosas. Mezcla mal graduada de arenas y arcillas con características de plasticidad baja a media. Es decir, que el suelo no será capaz de soportar deformaciones, sin sufrir variaciones volumétricas apreciables.

En base a valores de compresión simple, la muestra se clasifica como de tipo dura, con características apreciables de resistencia al corte. Como la contracción lineal del suelo es menor a 9 %, se dice que el suelo no tendrá una actividad significativa de contracción expansión.

La relación de vacíos (e) y porosidad (n), atribuyen características de suelos rígidos, poco susceptibles a deformación. Los valores de índice de liquidez, clasifican a la muestra como de tipo preconsolidado (Crespo-Villalaz, 1980), lo que quiere decir que el suelo ha estado sometido a esfuerzos producidos por movimientos del terreno. El grado de saturación tan alto que presenta la muestra, indica la vulnerabilidad a deformaciones y movimientos bajo esfuerzos generados por la saturación de agua.

Los resultados de las pruebas triaxiales rápidas no drenadas, definen al suelo como muy cohesivo, con alta resistencia de esfuerzos cortantes, pero muy susceptible a esfuerzos generados por la presión de poro, esto debido al alto porcentaje de saturación (Tabla 3.1).

Finalmente, el suelo de la muestra 3, se puede definir en base a las características anteriormente analizadas como una mezcla mal graduada de arena y arcilla preconsolidada, de consistencia natural dura, poco susceptible a expansión contracción y poco susceptible a deformaciones apreciables. Cabe mencionar que si la muestra de suelo sufre deformaciones las variaciones volumétricas del suelo serán apreciables.

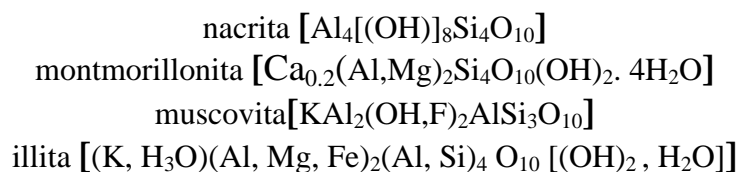
No. de pozo a cielo abierto	1	2	3
Profundidad del PCA (m)	1.20	-	1.50
Granulometría			
% que pasa la malla no. 4 (4.75 mm)	100	100	76.65
% que pasa la malla no. 40 (0.42 mm)	87.63	80.68	57.99
% que pasa la malla no. 200 (0.075 mm)	48.65	50.68	40.47
Límites de Consistencia			
Límite líquido % (Ll)	36.60	43.00	39.60
Límite plástico % (Lp)	17.01	23.32	22.25
Índice plástico % (Ip)	19.59	19.68	17.35
Contracción lineal % (Cl)	8.89	10.71	8.65
Límite de Contracción % (Lc)	16.91	17.34	17.21
Consistencia relativa (Cr)	1.01	1.43	1.41
Índice de liquides	-0.01	-0.43	-0.41
Clasificación S.U.C.S	SC	CL	SC
Pruebas de resistencia			
Compresión simple (kg/cm ²)	0.9050	1.0664	6.870
Ángulo de fricción interna (°)	25	24	26
Cohesión (kg/cm ²) (c)	0.185	0.36	1.622
Módulo de elasticidad (kg/cm ²) (Ec)	104.40	108.71	326.61
Relaciones Gravimétricas			
Peso volumétrico del lugar (kg/m ³)	1.65	1.642	1.835
Densidad de sólidos (Ss)	2.79	2.86	2.56
Relación de vacíos (e)	0.49	0.74	0.40
Porosidad % (n)	33	43	28
Grado de saturación del agua % (Gw)	96	57	98

Tabla 3.1.- Resumen de resultados de las pruebas de laboratorio de mecánica de suelos.

La comparación de los resultados mineralógicos con las propiedades físicas y mecánicas determinadas para las mismas muestras, permite reconocer relaciones directas entre causa y efecto. De este modo, las muestras correspondientes a Tzit-1 y Tzit-3, fueron colectadas de la parte superior de una secuencia de sedimentos formados por erosión y deslizamiento de masas a partir de la desintegración de piroclastos (figura 3.8).

La interpretación de los difractogramas, mediante el uso de la biblioteca interna del difractómetro, indica que las muestras contienen a los siguientes minerales:

Tzit-1.



Tzit-2.



Tzit-3.

montmorillonita $[\text{Ca}_{0.2}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$

muscovita $[\text{KAl}_2(\text{OH},\text{F})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$

illita $[(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10} [(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}]]$

En todos los casos se reconoce la presencia de por lo menos una especie arcillosa (montmorillonita o nacrita), además de una especie micácea identificada en este caso como illita-muscovita en dos de las muestras; se clasifica así por las semejanzas estructurales identificadas, que son comunes para ambos minerales. Finalmente, una de las muestras concentra un alto contenido de cuarzo de niveles microscópicos (aproximados a 2 μm). Las primeras se caracterizan por una alta hidratación, lo cual se refleja en su capacidad de retención de agua (Gw), con 96 % (Tzit-1) y 98 % (Tzit-2) y límite líquido de 36.60 % y 39.60 % respectivamente (Tabla 3.1); otra propiedad sobresaliente es su relación de espacios vacíos (0.49 y 0.40 e).

Comparativamente, la muestra Tzit-3, que fue colectada de un nivel inferior de la secuencia de sedimentos arrastrados por erosión e inestabilidad, presenta fracciones minerales de nacrita (una especie del grupo del caolín) y cuarzo; la nacrita no es susceptible de hidratación natural, como las esmectitas, por ejemplo, y el cuarzo presente puede alcanzar dimensiones de entre 10 y 50 μm . Ambas especies constituyen la parte más fina de los sedimentos en este punto y sus propiedades influyen igualmente en las características físicas de toda esta masa. De estas forma, y en comparación con las muestras descritas anteriormente, Tzit-3 presenta una relación de vacíos mucho más alta (0.74 e), porosidad mayor (43 %) y límite líquido igualmente mayor (43.0 %) (Tabla 3.1).

En base a las características generales de los suelos presentes en la zona, se concluye lo siguiente:

- El comportamiento plástico, la deformabilidad y la conductividad del agua en el suelo, está controlado en gran parte por su composición mineralógica (características estructurales y distribución de la forma y tamaño de las partículas).
- Las deformaciones sufridas por los suelos, serán acompañadas de variaciones volumétricas apreciables.
- El grado de saturación de las muestras de suelo indican, la disminución rápida de la resistencia al esfuerzo cortante, bajo condiciones de agua.
- Es importante aclarar también, que aunque están presentes las fracciones minerales arcillosas citadas, no son la parte más dominante del material en cada punto, lo cual se refleja en ángulos de fricción interna entre 24° y 26° cuando la masa total es sometida a esfuerzos.

3.4.2.- Mecánica de Rocas

En base a un análisis de gabinete de las características de fracturamiento presentes en la mesa de Tzitzio, se decidió agrupar las estaciones de fracturamiento levantadas de la siguiente forma: Estación 1 con 4 y estación 2 con 3, a razón de la similitud en litología y familias de discontinuidades. La ubicación de las estaciones de fracturamiento se presenta en la figura 3.8. Los resultados de las diferentes pruebas a evaluarse se discuten a continuación:

3.4.2.1.- Prueba de resistencia de carga Puntual (PLT)

Para realizar la prueba de carga puntual, se recolectaron 15 muestras de roca, en dos porciones de macizo que presentaban características físicas y geométricas más o menos iguales.

Las muestras de roca que se probaron fueron de geometría irregular con dimensiones de especímenes mayores a 30 mm y menores a 80 mm. Dimensiones establecidas por la (ASTM D 5731-95). De acuerdo a la forma base PLT, se calcularon los valores de resistencia a compresión simple de cada muestra, para finalmente realizar un promedio, donde se descartaron los resultados que presentaban valores de resistencia a la compresión uniaxial máximo y mínimo.

Para la primera porción del macizo, donde se agruparon las estaciones de fracturamiento 1 y 4 por presentar características estructurales similares. El valor de la resistencia a compresión simple obtenido con la prueba PLT se muestra en la tabla 3.2.

No.	D (cm)	P (KN)	D ²	Is (MPa)	Is cor. (MPa)	σ_c (MPa)
1	6.5	21	42.25	4.970	5.5	132
2	6.1	13.5	37.21	3.628	4	96
3	6.9	13.5	47.61	2.836	2.6	62.4
4	4.8	18	23.04	7.813	7.5	180
5	5.4	20.5	29.16	7.030	7.2	172.8
6	5.8	19.5	33.64	5.797	6	144
7	4.2	9.5	17.64	5.385	5	120
8	4.8	10.5	23.04	4.557	4.2	100.8
9	4.5	9.5	20.25	4.691	4.1	98.4
10	5.8	15.5	33.64	4.608	5.1	122.4
11	4.1	10	16.81	5.949	5.1	122.4
12	5	17.5	25	7.000	7	168
13	4.8	11.5	23.04	4.991	4.8	115.2
14	3.8	18.5	14.44	12.812	10.5	252
15	5.1	14.5	26.01	5.575	5.5	132

$$\Sigma\sigma_c = 131.077$$

Tabla 3.2.- Resistencia a compresión simple de la roca para la zona uno (estaciones 1 y 4), en base a la prueba PLT (D= Diámetro de la muestra, P= Carga de rotura, Is= Índice referido a muestras de 50 mm, σ_c = Compresión simple de la roca). Los resultados marcados en color rojo son los valores máximos y mínimos que se descartaron para realizar el promedio.

Para la segunda porción del macizo, donde se agruparon las estaciones de fracturamiento 2 y 3. El valor de la resistencia a compresión simple obtenido con la prueba PLT se muestra en la tabla 3.3.

No.	D (cm)	P (KN)	D ²	Is (MPa)	Is cor. (MPa)	sc (MPa)
1	4	20.5	16	12.813	10.7	256.8
2	3.2	17	10.24	16.602	12	288
3	7	34	49	6.939	7.6	182.4
4	6.2	34	38.44	8.845	10	240
5	5.1	24	26.01	9.227	9.2	220.8
6	3.3	21.5	10.89	19.743	14	336
7	4.5	28	20.25	13.827	13	312
8	3.8	23	14.44	15.928	13.5	324
9	4.3	25	18.49	13.521	12	288
10	5.7	24	32.49	7.387	8	192
11	4.9	22	24.01	9.163	9	216
12	6.5	24.5	42.25	5.799	6.7	160.8
13	5.7	28	32.49	8.618	9.8	235.2
14	3.5	19	12.25	15.510	12	288

$$\Sigma\sigma_c = 253.60$$

Tabla 3.3.- Resistencia a compresión simple de la roca para la zona uno (estaciones 2 y 3), en base a la prueba PLT (D= Diámetro de la muestra, P= Carga de rotura, Is= Índice referido a muestras de 50 mm, σ_c = Compresión simple de la roca). Los resultados marcados en color rojo son los valores máximos y mínimos que se descartaron para realizar el promedio.

3.4.2.2.- Grado de fracturamiento RQD

La estimación de la magnitud RQD se estimó en base a la relación de discontinuidades visibles por unidad de volumen expuesta ($RQD = 115 - 3.3 J_v$), ya que no se contó con núcleos de perforación.

La variable J_v es la suma del número de juntas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, el cual es conocido como conteo volumétrico de juntas.

Los resultados del término RQD para las dos porciones del macizo rocoso se muestran en la tabla 3.4.

Porción del macizo	1	2
Estaciones de fracturamiento	1 y 4	2 y 3
Coefficiente J_v	11	8
Término RQD	78.7	88.6

Tabla 3.4.- Término RQD para las dos porciones del macizo rocoso.

3.4.2.3.- Prueba de resistencia a carga triaxial en muestra de roca

La muestra de roca analizada en este ensayo se tomó en la fracción del macizo que comprende las estaciones de fracturamiento 2 y 3.

Los resultados del ensayo triaxial, fueron controlados por los esfuerzos de confinamiento (σ_3), donde su incremento dio lugar al aumento de la resistencia de pico (σ_1). Una vez establecidos los esfuerzos de confinamiento se obtuvieron los parámetros de resistencia a partir de las curvas esfuerzo-deformación σ_1 - ϵ_{ax} , obteniendo así valores de la resistencia de pico $\sigma_p = \sigma_1$, de cada espécimen. Estos valores de pico se emplearon para dibujar los correspondientes círculos de Mohr en un diagrama de esfuerzo normal-esfuerzo tangencial σ_n - τ . Para finalmente dibujar la envolvente de rotura y leer directamente los valores de c y ϕ representativos.

Especímenes	σ_3	σ_1	c	ϕ
1	0.2	8.31	(Kg/cm ²)	(°)
2	0.4	9.40	1.66	41

Tabla 3.5.- Valores de esfuerzos de los ensayos triaxiales en muestras de roca y Datos geotécnicos de las estaciones de fracturamiento 2 y 3.

3.4.3.- Macizo rocoso

3.4.3.1.- Clasificación geomecánica del macizo rocoso

La clasificación, se aplicó, dividiendo el macizo en estaciones que presentaban características geológicas más o menos uniformes, basadas en observaciones hechas en campo. En ellas se llevo a cabo la toma de datos numéricos referentes a los parámetros de clasificación, donde se incluyen características de discontinuidades y de matriz rocosa. Para la toma sistemática de los datos de campo se empleó una tabla que agrupa los seis parámetros de clasificación, la cual se adjunta en el anexos 3.

Como ya se describió en el capítulo de metodología la clasificación RMR, permitió relacionar índices de calidad con propiedades geotécnicos del macizo. Una vez obtenidos los resultados numéricos de los parámetros de clasificación, se procedió a realizar el análisis bajo las siguientes características:

La sumatoria de la puntuación de los parámetros de clasificación se corrigió, bajo el criterio de la orientación de las discontinuidades con respecto a la orientación del talud (Tabla 3.6): En base a la puntuación obtenida con esta corrección, se tiene una clasificación RMR en el rango III (calidad media) y IV (calidad mala), para las estaciones 2-3 y 1-4 respectivamente. Finalmente, con este rango se atribuyen las características geotécnicas para cada porción del macizo (Tabla 3.6).

Una vez obtenidos las propiedades geotécnicas del macizo, se realiza el análisis de estabilidad para cada estación, las cuales se encuentran ubicadas en un dominio geológico, constituido por secuencias volcánicas, dentro de la geoforma formada por un flujo ignimbrítico, conocida como mesa de Tzitzio (Unidad CTsTpO).

Parámetros de clasificación	Resultados (Est. 1 y 4)	RMR (Est. 1 y 4)	Resultados (Est. 2 y 3)	RMR (Est. 2 y 3)
1 Compresión simple	131.07 (Mpa)	p. 12	253.6 (Mpa)	p. 15
2 RQD	78.7 %	p. 17	88.6 %	p. 17
3 Sep. entre discontinuidades	0.7 (m)	p. 15	2 (m)	p. 15
4 Long. de la discontinuidad	7 < (m)	p. 1	9 < (m)	p. 1
Abertura	4 (cm)	p. 0	7 (cm)	p. 0
Rugosidad	14 – 18 (JRC)	p. 5	8 – 10 (JRC)	p. 3
Relleno	Relleno blando	p. 2	Relleno blando	p. 2
Alteración	Mod. Alterada	p. 3	Mod. Alterada	p. 3
5 Presencia de agua	Lig. Húmedo	p. 10	Lig. Húmedo	p. 10
Sumatoria de puntaje RMR		p. 65		p. 66
Corrección por orientación desf. de las discontinuidades		p. -25 (Muy desf.)		p. -25 (Muy desf.)
Sumatoria final RMR		p. 40		p. 41
Propiedades geotécnicas	(Est. 1 y 4)		(Est. 2 y 3)	
Cohesión (c)	1-2 kg/cm ²		2-3 kg/cm ²	
Ángulo de rozamiento (ϕ)	15°-25°		25°-35°	

Tabla 3.6.- Parámetros de clasificación y características geotécnicas atribuidas en base a RMR.

La clasificación RMR toma en cuenta la geometría y el grado de fracturamiento del macizo rocoso de manera global, mientras que el ensayo triaxial es más puntual, de tal manera que si la muestra ensayada no contiene gran parte de las características físicas y mecánicas del macizo, los parámetros geotécnicos (ϕ y c) estarían sobreestimados.

Hoek (1983) propone que los métodos geotécnicos de clasificación de macizos rocosos, pueden ser usados para estimar parámetros de resistencia y deformabilidad en macizos rocosos fracturados, pero se tendrá que poner mucho cuidado cuando se trate de macizos rocosos blandos, muy fracturados y alterados, para los que por lo general, sobrevaloran las propiedades mecánicas sin tener en cuenta aspectos importantes como la deformabilidad.

La sistemática práctica seguida en campo con la clasificación del macizo rocoso (RMR), en conjunto con las características que presenta el macizo en nuestra zona, se decide usar los parámetros geotécnicos RMR para los cálculos del factor de seguridad y estabilidad del macizo rocoso.

3.4.3.2.- Descripción de fracturamiento a nivel afloramiento y definición de mecanismo de deslizamiento

La descripción de las características de fracturamiento se realiza en base a la metodología expuesta en el anexo 3. En ella, se incluye la explicación detallada de los conceptos utilizados. La definición de mecanismos de falla para cada estación de fracturamiento, se realizó mediante el análisis cinemático con redes estereográficas, así mismo se calcularon los factores de seguridad para falla al volteo y falla en cuña bajo cuatro condiciones:

- 1.-Talud saturado y cohesión entre planos: Refleja características del talud en condiciones normales. Para analizar el talud bajo estas condiciones es necesario realizar pruebas de corte directo, con la finalidad de obtener valores de cohesión para cada superficie de fracturamiento. En este trabajo, no se realizaron pruebas de corte directo a lo largo de las discontinuidades, por lo cual, no se pudo obtener valores de seguridad bajo las condiciones generales expuestas en el inciso 1.
- 2.-Talud seco y sin cohesión entre planos: Analiza condiciones geométricas desfavorables de las orientaciones de los planos de fracturamiento con respecto al talud.
- 3.-Mismo ángulo de fricción en ambos planos.
- 4.-Talud saturado sin cohesión. Representa la condición más crítica de inestabilidad.

Los resultados del análisis de los mecanismos de falla y factores de seguridad para cada estación quedan representados de la siguiente manera:

Estación 1

Se ubica en la zona noroeste de la mesa, dentro de las coordenadas 295957 este y 2169488 norte en proyección UTM a una altura de 2024 msnm y un área expuesta de 105 m² (Figura 3.8). El talud tiene una altura aproximada de 30 m con un ángulo de inclinación de 86° que buza hacia el SW. Esta estación está integrada por tres familias de fracturamiento, las cuales se describieron en base a datos recopilados en campo (ver anexo 3) y se graficaron en un diagrama de contornos. (Figura 3.12).

J1.- Cuenta con el mayor número de fracturas, las cuales tienen una orientación promedio de N86°E / 81°SE. La separación promedio entre ellas es de 40 cm, con una longitud mayor a 7 m y un índice de terminación en roca de 2.8 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 1 cm, rellena de materia vegetal y arcilla húmeda que no presenta agua libre. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van desde 12-14 hasta 16-18, expuestos en una escala de 10 cm.

J2.- Constituida por Fracturas con orientación promedio de N50°E / 77°SE. La separación promedio entre ellas es de 2 m, con una longitud mayor a 7 m y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 0.5 cm, rellena de arcilla húmeda que no presenta agua libre. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) 10 - 12, expuestos en una escala de 10 cm.

J3.- Constituida por Fracturas con orientación promedio de N84°E / 48NW. La separación promedio entre ellas es mayor a 5 m, con una longitud mayor a 7 m y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 0.2 cm, sin relleno. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como ondulada lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) de 16-18, expuestos en una escala de 10 cm.

La dimensión de los bloques inestables es delimitada por tres familias de discontinuidades, a su vez son clasificados en base a los valores de J_r ($1.90/m^3$). como: Bloques grandes de forma irregular, considerando que las tres familias de fracturamiento presentan un espaciado diferente. Otra forma de representar la dimensión de los bloques es en base al valor de “Índice del tamaño de bloque” $I_b = 2.46$ m. (ver anexo 3)

Análisis de inestabilidad.

De acuerdo al análisis cinemático expuesto en la figura 3.12, se dice que: los planos J1 y J2 se interceptan dentro del área sombreada delimitada por el ángulo de fricción interna y el plano del talud, región que se considera potencialmente inestable. Los planos que se interceptan en el área sombreada, forman bloques en forma de cuña, con dirección de desplazamiento hacia el SE. Como la línea de intersección de los planos de fracturamiento no es cercana a la línea de buzamiento del talud, se dice que los bloques delimitados por las fracturas J1 y J2 son geoméricamente estables (Figura 3.12).

Una tercera familia J3, forma bloques susceptibles al volteo, bajo las condiciones de dirección subparalela y buzamiento contrario al a traza del talud, así como la presencia del polo dentro del rango α_{cp} de inestabilidad. (Figura 3.12)

Las tres familias de discontinuidades presentes en el levantamiento, delimitan bloques máximos de forma tabular de $4 m^3$ de volumen y 10 tn de peso. El análisis de falla al vuelco de la estación 1, queda definido bajo los factores principales (relación de esbeltez ($\Delta x/h$) y buzamiento del plano sobre el que descansan los bloques (β)), atribuyendo así las características de inestabilidad de la región en la que se sitúe. En la figura 3.12 se presentan los valores numéricos de los factores de seguridad, los cuales se derivan de la sustitución de resultados (Anexo 6) en cada una de las fórmulas descritas en el capítulo de metodología.

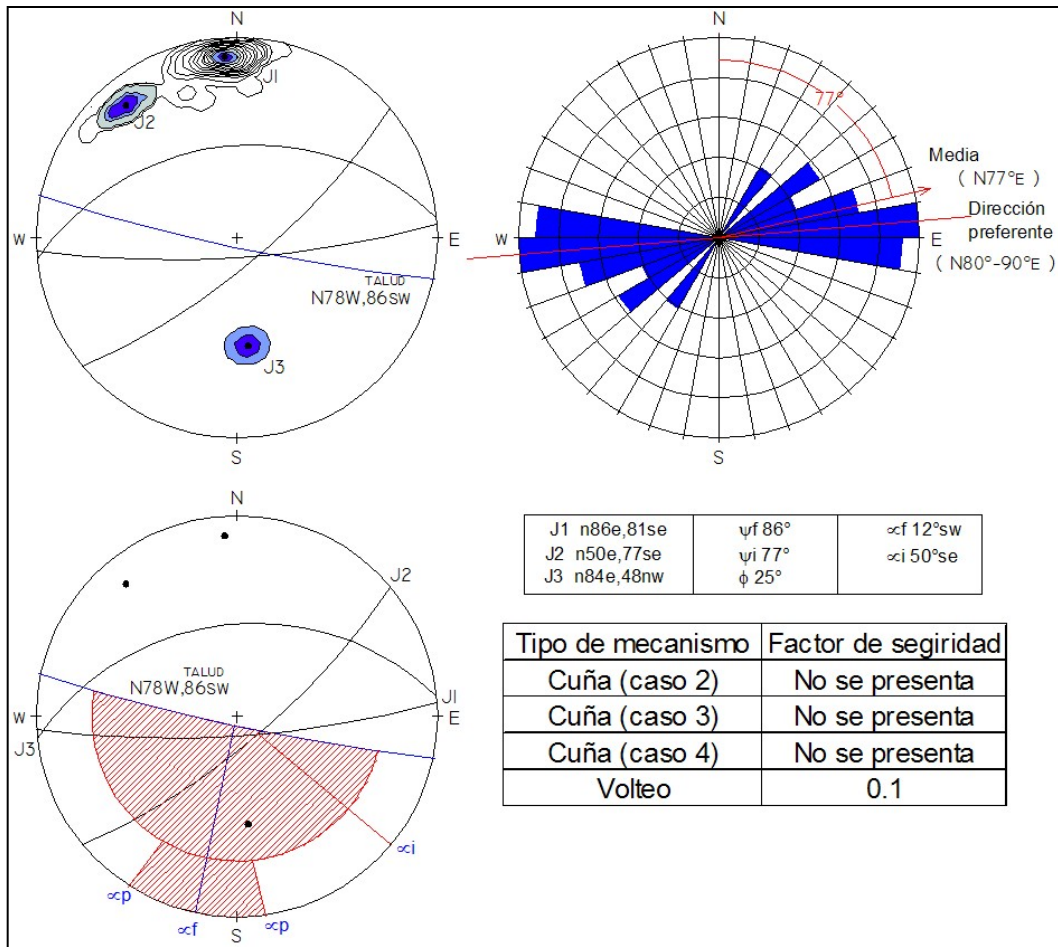


Figura 3.12.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 1.

Estación 2

Se ubica en la zona noroeste de la mesa, dentro de las coordenadas 296217 este y 2169332 norte en proyección UTM, a una altura de 2052 msnm y un área expuesta de 135 m² (Figura 3.8). El talud tiene una altura aproximada de 55 m con un ángulo de inclinación de 86° que buza hacia el SW. Esta estación está integrada por tres familias de fracturamiento, las cuales se describieron en base a datos recopilados en campo, graficados en un diagrama de contornos, mismo que se expone en la figura 3.13.

J1.- Cuenta con el mayor número de fracturas, las cuales tienen una orientación promedio que va desde N80°E / 85SE. La separación promedio entre ellas es de 1 m, con una longitud mayor a 9 m y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 2 cm, rellena de arcilla húmeda que no presenta agua libre. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se

obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van desde 10-12 hasta 14-16, expuestos en una escala de 10 cm.

J2.- Constituida por Fracturas con orientación promedio que de N12°E / 87NW. La separación promedio entre ellas es de 2.50 m, con una longitud mayor a 7 m y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 3 cm, rellenas de arcilla húmeda sin agua libre. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa y plana pulida. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van desde 8-10 hasta 14-16, expuestos en una escala de 10 cm.

J3.- Constituida por Fracturas con orientación promedio que va desde N79°E / 86NW. La separación promedio entre ellas es de 2 m, con una longitud mayor a 5 metros y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 1). La apertura de los planos de fractura es muy heterogénea, esta va desde 0.5 cm hasta 3 cm, algunas de ellas rellenas de arcilla con evidencia de haber circulado agua. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van desde 8-10 hasta 10-12, expuestos en una escala de 10 cm.

La dimensión de los bloques inestables es delimitada por tres las tres familias de discontinuidades presentes, a su vez los bloques son clasificados en base a los valores de J_r ($1.5/m^3$) como: Bloques grandes de forma tabular, considerando que una de las familias de fracturamiento tiene menor espaciamiento que las otras dos. Otra forma de representar la dimensión de los bloques inestables es en base al valor de “Índice del tamaño de bloque” $I_b = 1.80$ m (ver anexo 3).

Análisis de inestabilidad

De acuerdo al análisis cinemático expuesto en la figura 3.13, se dice que: los planos J1 y J2 se interceptan dentro del área sombreada delimitada por el ángulo de fricción interna y el plano del talud, región que se considera potencialmente inestable. Los planos que se interceptan en el área sombreada, forman bloques en forma de cuña, con un volumen y peso aproximado de $1.40 m^3$ y 3.5 tn respectivamente y una dirección de desplazamiento hacia el SW. Otra de las características de inestabilidad presentes en el análisis, es la cercanía de la línea de intersección de los planos de fracturamiento con la línea de buzamiento del talud, por lo que geoméricamente queda comprobada su inestabilidad.

Una vez analizada la inestabilidad en cuña, se calcula el factor de seguridad con datos angulares obtenidos en la red estereográfica de Wulff y bajo las condiciones expuestas en el capítulo de metodología. En la figura 3.13 se presentan los valores numéricos de los factores de seguridad, los cuales se derivan de la sustitución de resultados (Anexo 6) en cada una de las fórmulas descritas en el capítulo de metodología.

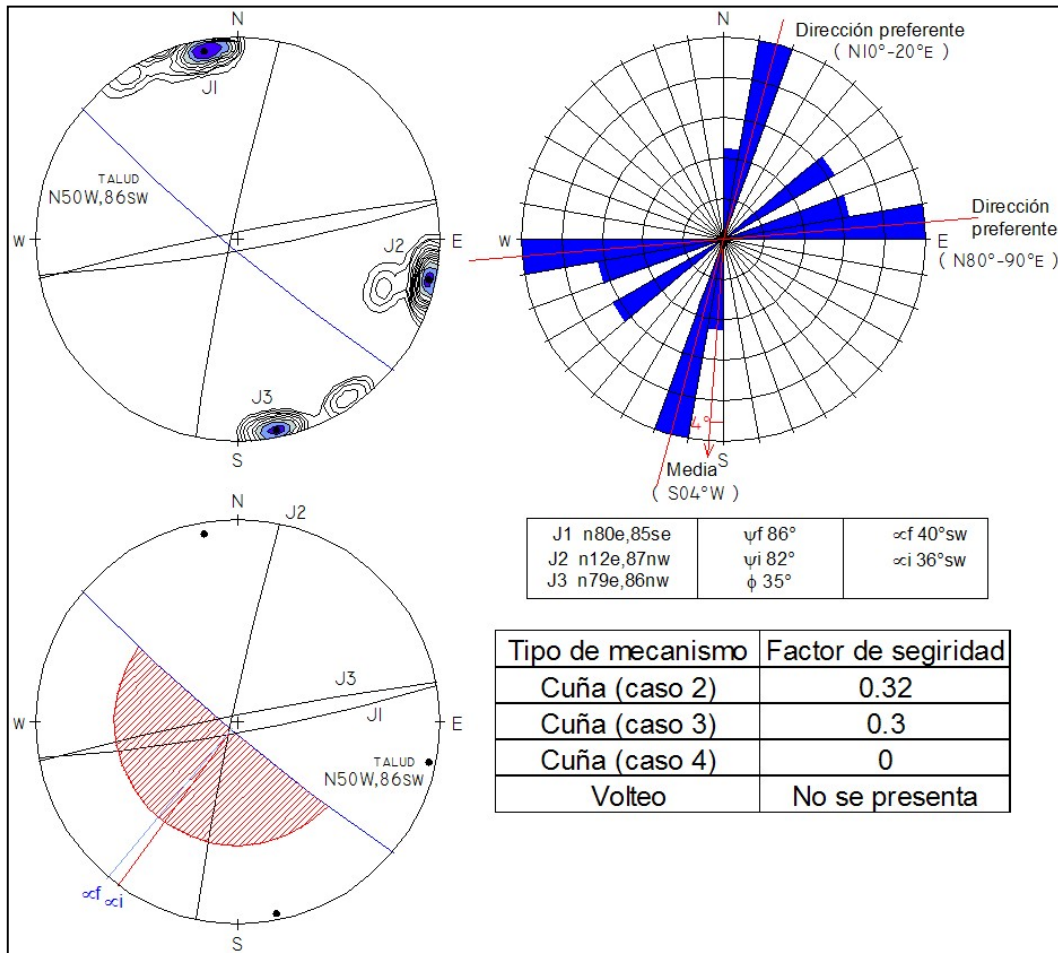


Figura 3.13.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 2.

Estación 3

Se ubica en la zona norte de la mesa, dentro de las coordenadas 296777 este y 2169920 norte en proyección UTM a una altura de 1980 msnm y un área expuesta de 100 m² (Figura 3.8). El talud tiene una altura aproximada de 20 m con un ángulo de inclinación de 86° que buza hacia el NE. Esta estación esta integrada por tres familias de fracturamiento frecuentes y una más con características no sistemáticas, las cuales se describieron en base a datos recopilados en campo, graficados en un diagrama de contornos, mismo que se expone en la figura 3.14.

J1.- Cuenta con el mayor número de fracturas, las cuales tienen una orientación promedio que va desde N87°E / 81°SE. La separación promedio entre ellas es de 1.5 m, con una longitud mayor a 5 m y un índice de terminación en roca de 0 % (anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 4 cm, rellena de arcilla húmeda y materia orgánica. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como ondulada lisa y plana lisa. Así

mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van de 10-12 hasta 18-20, expuestos en una escala de 10 cm.

J2.- Constituida por Fracturas con orientación promedio que de $N82^{\circ}W / 77^{\circ}NE$. La separación promedio entre ellas es de 1.80 m, con una longitud mayor a 5 metros y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 2 cm, rellenas de arcilla húmeda, arena y materia vegetal. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa y ondulada lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van de 10-12 hasta 16-18, expuestos en una escala de 10 cm.

J3.- Constituida por Fracturas con orientación promedio que va desde $N23^{\circ}E / 84^{\circ}SE$. La separación promedio entre ellas es de 0.80 m, presentan una longitud mayor a 5 m, otras terminan en otra fractura con una longitud de 5 m y un índice de terminación en roca de 0 % (ver anexo 3). La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 2 cm, rellenas de arcilla húmeda y arena. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) 14-16, expuestos en una escala de 10 cm.

J4.- Constituida por Fracturas con características no sistemáticas y orientación $N13^{\circ}E / 84^{\circ}NW$. La separación entre ellas es de 3 m y presentan una longitud mayor a 10 m. La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 2 cm, rellenas de arcilla húmeda y arena. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) 16-18, expuestos en una escala de 10 cm.

La dimensión de los bloques inestables es delimitada por dos familias de discontinuidades frecuentes y dos más no sistemáticas (anteriormente descritas). Así mismo los bloques son clasificados en base a los valores de J_r ($2.2/m^3$). como: Bloques grandes de forma tabular, considerando que una de las familias de fracturamiento tiene menor espaciamiento que las otras dos. Otra forma de representar la dimensión de los bloques inestables es en base al valor de “Índice del tamaño de bloque” $I_b = 1.80$ m. (ver anexo 3)

Análisis de inestabilidad

De acuerdo al análisis cinemático expuesto en la figura 4.14, se dice que: las familias de fracturas J2 y J3, así como las familias J2 y J4 se interceptan dentro del área sombreada delimitada por el ángulo de fricción interna y el plano del talud, región que se considera potencialmente inestable. Los planos J2 y J3, forman bloques en forma de cuña, con un volumen y peso aproximado de $0.06 m^3$ y 150 kg respectivamente y una dirección de desplazamiento hacia el NE. Así mismo los planos J2 y J4 que se interceptan en el área sombreada, forman bloques en forma de cuña, con un volumen y peso aproximado de $0.10 m^3$ y 250 kg respectivamente y una dirección de desplazamiento hacia el NW.

La familia J1, forma bloques susceptibles al volteo, bajo las condiciones de dirección subparalela y buzamiento contrario al a traza del talud, así como la presencia del polo dentro del rango α_p de inestabilidad (Figura 3.14). Por otro lado, las familias J3 y J4, se interceptan con la familia J1. De esta manera se delimitan bloques máximos de forma tabular, de 12 m³ de volumen y 30 tn de peso.

El análisis de falla al vuelco de la estación 3, queda definido bajo los factores principales (relación de esbeltez ($\Delta x/h$) y buzamiento del plano sobre el que descansan los bloques (β)), atribuyendo así las características de inestabilidad de la región en la que se sitúe: Según las relaciones de los factores, la inestabilidad se sitúa en la región 4. Región que se considera susceptible a deslizar y volcar simultáneamente. En la figura 3.14 se presentan los valores numéricos de los factores de seguridad, los cuales se derivan de la sustitución de resultados (Anexo 6) en cada una de las fórmulas descritas en el capítulo de metodología.

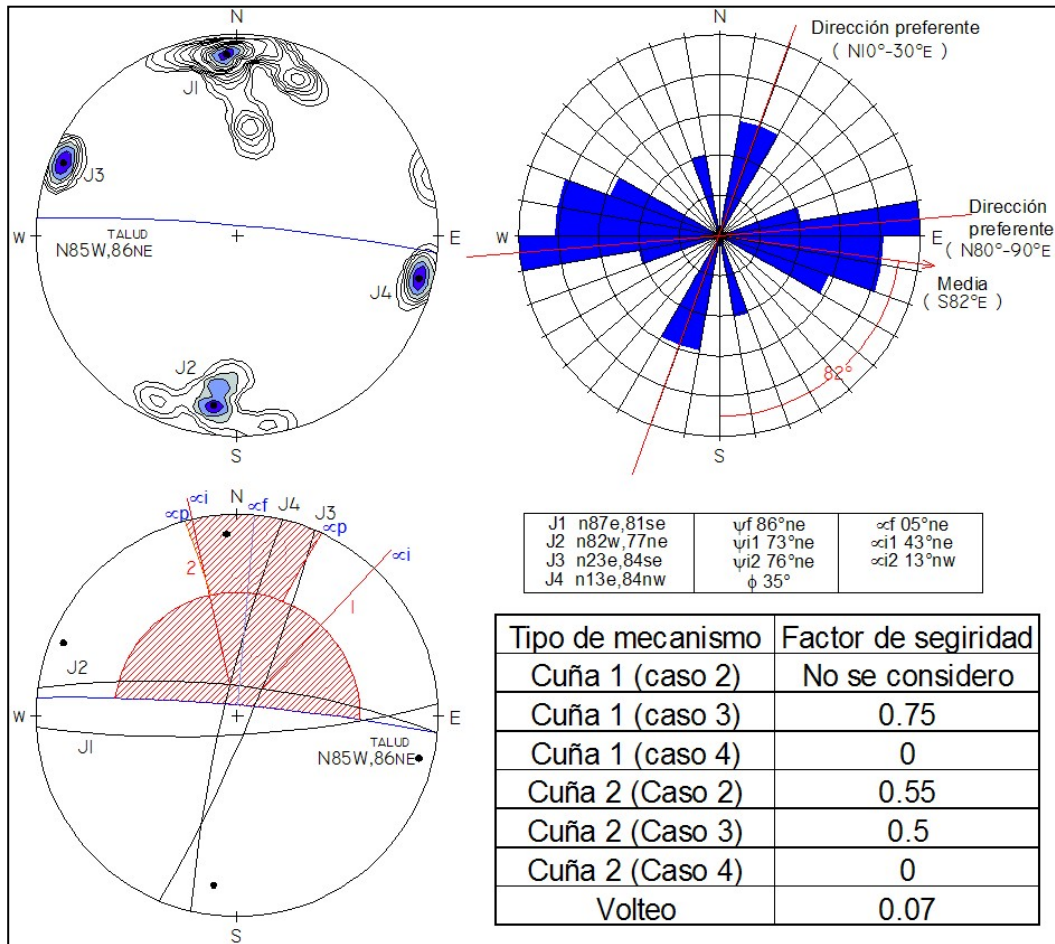


Figura 3.14.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 3.

Estación 4

Se ubica en la zona norte de la mesa, dentro de las coordenadas 297902 este y 2168774 norte en proyección UTM a una altura de 2054 msnm y un área expuesta de 75 m² (Figura 3.8). El talud tiene una altura aproximada de 30 m con un ángulo de inclinación de 86° que buza hacia el SE. Esta estación esta integrada por tres familias de fracturamiento frecuentes y una más con características no sistemáticas, las cuales se describieron en base a datos recopilados en campo, graficados en un diagrama de contornos, mismo que se expone en la figura 3.15.

J1.- Cuenta con el mayor número de fracturas, las cuales tienen una orientación promedio que va desde N80°E / 83°SE. La separación promedio entre ellas es de 0.80 m, con una longitud mayor a 15 m y un índice de terminación en roca de 0 %. Los planos de fracturas presentan una apertura que va de 0.5 cm hasta 9 cm, rellena de arcilla húmeda, materia vegetal y fragmentos de roca. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van de 10-12 hasta 16-18, expuestos en una escala de 10 cm. Los cuales corresponden a un ángulo *i* promedio de 22°.

J2.- Constituida por Fracturas con orientación promedio que va de N04°E / 80°NW. La separación promedio entre ellas es de 1.70 m, con una longitud mayor a 5 m y un índice de terminación en roca de 0 %. La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 4 cm, rellenas de arcilla húmeda, materia vegetal y fragmentos de roca. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) que van de 12-14 hasta 18-20, expuestos en una escala de 10 cm.

J3.- Constituida por Fracturas con características no sistemáticas y orientación de N79°E / 88°NW. La separación entre ellas es muy heterogénea, la mayoría de ellas presentan una longitud mayor a 15 m y terminan fuera del área de exposición. La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 0.5 cm, rellenas de arcilla húmeda y materia orgánica, con evidencia de haber circulado agua. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como plana lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) 14-16, expuestos en una escala de 10 cm.

J4.- Constituida por Fracturas con características no sistemáticas y orientación de N17°W / 80°NE. La separación entre ellas es muy heterogénea, la mayoría de ellas presentan una longitud mayor a 5 m y terminan fuera del área de exposición. La mayor parte de los planos de fracturas presentan una apertura promedio de 1 cm, rellenas de arcilla húmeda, con evidencia de haber circulado agua. La rugosidad de los planos de fracturas se describe en base a una escala de 10 m (rugosidad de perfil estándar) como ondulada lisa. Así mismo se obtuvieron valores numéricos de (JRC) 16-18, expuestos en una escala de 10 cm. Los cuales corresponden a un ángulo *i* de 32°.

La dimensión de los bloques inestables es delimitada por cuatro familias de discontinuidades. Así mismo los bloques son clasificados en base a los valores de J_r ($1.5/m^3$), como: Bloques grandes de forma tabular, considerando que una de las familias de fracturamiento tiene menor espaciamiento que las otras tres. Otra forma de representar la dimensión de los bloques inestables es en base al valor de “Índice del tamaño de bloque” $I_b = 2.50$ m.

Análisis de inestabilidad

De acuerdo al análisis cinemático expuesto en la figura 3.15, se dice que: las familias de fracturas J1 y J4 se interceptan dentro del área sombreada delimitada por el ángulo de fricción interna y el plano del talud, región que se considera potencialmente inestable. Los planos que se interceptan en el área sombreada, forman bloques en forma de cuña, con un volumen y peso aproximado de $1.26 m^3$ y 3.15 tn respectivamente y una dirección de desplazamiento hacia el SE. Una tercera familia J3, presenta una dirección subparalela y un buzamiento contrario a la traza del talud. Como los polos de los planos J3, se ubican dentro del rango ∞_p de inestabilidad, forman bloques susceptibles al volteo, los cuales tendrán una dirección de desplazamiento hacia el buzamiento del talud. Las familias J1 y J2, presentes en el levantamiento se interceptan con la familia J3, de esta manera se delimitan bloques máximos de forma tabular, de $7.9 m^3$ de volumen y 19 tn de peso.

El análisis de falla al vuelco de la estación 4, queda definido bajo los factores principales (relación de esbeltez ($\Delta x/h$) y buzamiento del plano sobre el que descansan los bloques (β)), atribuyendo así las características de inestabilidad de la región en la que se sitúa: Según las relaciones de los factores, la inestabilidad se sitúa en la región 4. Región que se considera susceptible a deslizar y volcar simultáneamente. En la figura 3.15 se presentan los valores numéricos de los factores de seguridad, los cuales se derivan de la sustitución de resultados (Anexo 6) en cada una de las fórmulas descritas en el capítulo de metodología.

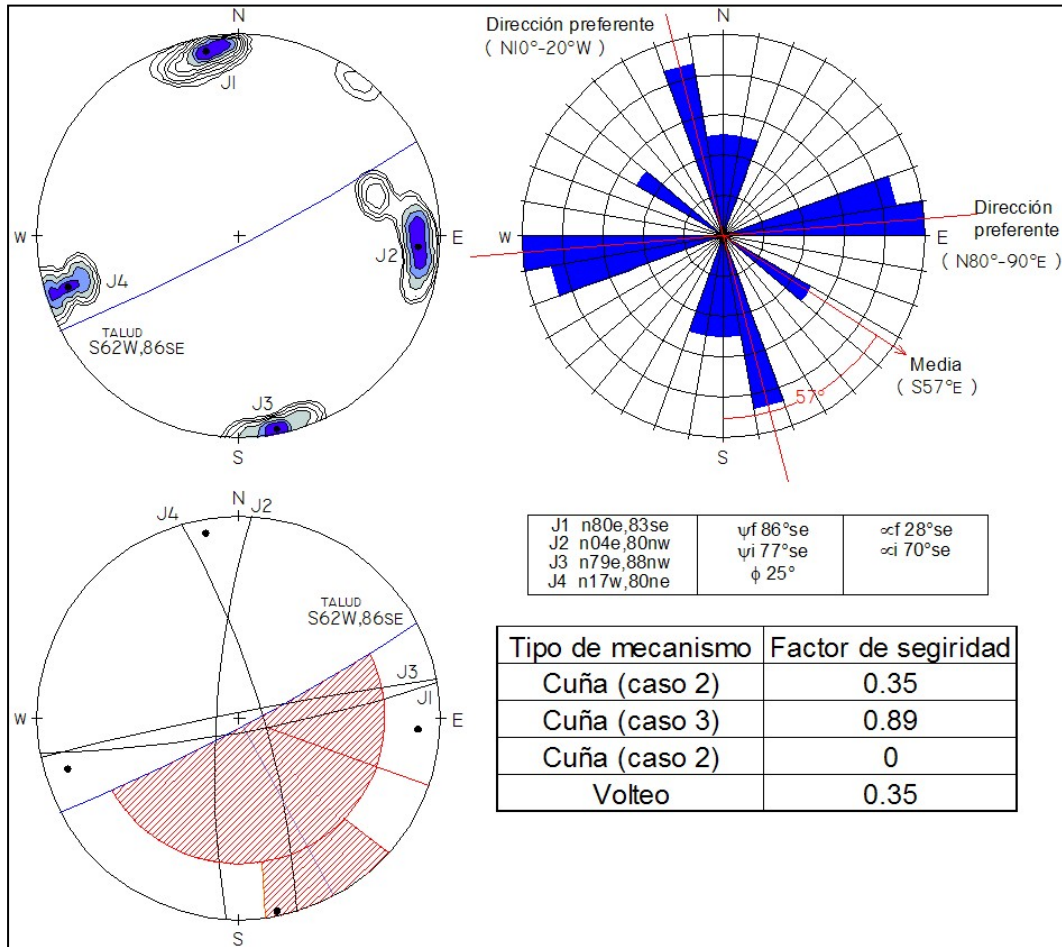


Figura 3.15.- Diagrama de contornos, roseta de fracturamiento, análisis de falla y resumen de resultados de los factores de seguridad para la estación 4.

La inestabilidad de falla en cuña bajo diferentes condiciones e inestabilidad al volteo, quedan comprobadas geométrica con el análisis estereográfico, los valores de los factores de seguridad representan la probabilidad de falla una vez reunidas las características bajo las cuales se realizó el análisis. Cabe mencionar, que la falla de los taludes no necesariamente tiene que originarse de forma espontánea, normalmente los rellenos de las fracturas van siendo erosionados con el paso del tiempo hasta que las condiciones de cohesión y fricción son vencidas por el peso mismo de los bloques de roca y la presión intersticial existente entre ellas.

En base a las características generales de los planos de fracturamiento, el análisis de falla y factores de seguridad de cada estación, se concluye lo siguiente:

- En general existe una correspondencia a nivel afloramiento y a nivel local: A nivel afloramiento y en las cuatro estaciones, existe una dirección preferente de fracturamiento E-W, al igual que una de las direcciones de lineamientos preferentes marcados a nivel local (Ver figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.11). Otra correlación de orientación preferente a nivel local y a nivel afloramiento en las estaciones 2, 3 y 4, corresponde a una dirección promedio N20°E.
- La unidad de la cima de nuestra columna litológica (unidad CTsTpO) presenta una orientación muy particular de lineamientos N-S (Figura 3.10). Esta orientación corresponde a planos de fracturamiento presentes en las estaciones 2, 3 y 4.
- En general en la zona existen dos tipos de mecanismos de falla: Al volteo y en cuña, los cuales están siendo controlados por tres familias de fracturamiento. Una familia preferente con dirección promedio N 70°-90° E y buzamiento al SE, controla el volteo de grandes bloques en la estación 3, a razón de que buza al lado contrario de la traza del talud. Para las demás estaciones esta misma familia de fracturamiento corresponde a uno de los planos sobre los que se deslizan grandes bloques en forma de cuña. Otra orientación menos frecuente con dirección promedio N 70°-90° E y buzamiento NW, controla el volteo de bloques en la estación 1. Otra familia de fracturamiento con orientación promedio N 10°-30° E, juegan un papel muy importante en la inestabilidad ya que en conjunto delimita bloques y condiciona el tipo de falla en la zona.
- Una vez comprobada la inestabilidad de los bloques de roca para falla al volteo y falla en cuña, se obtuvieron los factores de seguridad bajo las condiciones expuestas anteriormente. Los valores numéricos de los factores de seguridad son muy bajos en todas sus condiciones (Figura 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15) y no por ello significa que la falla se origine de manera espontánea. Por ejemplo, para la condición más extrema se tendrían que vencer las fuerzas de cohesión y fricción entre los planos de fracturamiento, posiblemente por la erosión del relleno o por el mismo peso del bloque de roca, además de tener una presión intersticial que será provocada por la saturación del agua.

3.4.3.3. - Simulación de trayectoria para caída de bloques

La trayectoria y puntos máximos de reposo de los bloques inestables, se obtuvieron en base a los 6 pasos básicos expuestos en el capítulo de metodología.

La sección topográfica o perfil se trazó a lo largo de una línea de 300 m de longitud, con coordenadas 296377 este, 2169011 norte y 296000 este, 2168949 norte.

Una vez trazado el perfil se definieron los contactos litológicos, características geotécnicas de cada segmento y los tamaños de bloques inestables posibles, en base a la geometría del fracturamiento que presentaba el macizo (mesa de Tzitzio).

El perfil consta de dos segmentos litológicos muy diferentes: El primer segmento está conformado por un escarpe de 55 m de altura y una inclinación de 86° , formado por un paquete masivo de ignimbritas. El segundo segmento del perfil está conformado por un paquete de 20 m de espesor de arcillas arenosas a lo largo de una línea de 270 m y una inclinación de 12° .

En base a la geometría del fracturamiento se delimitaron dos tamaños de bloques de roca, con 300 kg y 3 tn de peso respectivamente. Con estas características de dimensión y peso, se analizaron diferentes trayectorias de caída, para finalmente obtener los siguientes resultados.

Los bloques de 300 kg tienen una trayectoria de reposo de hasta 100 m partiendo de la cima del escarpe, cabe mencionar que la mayoría de los bloques alcanzan el reposo a una longitud promedio de 50 m (Figura 3.16a).

Los bloques de 3 tn tienen una trayectoria de reposo de hasta 140 m partiendo de la cima del escarpe, aunque la mayoría de ellos se detienen en una longitud promedio de 70 m (Figura 3.16b).

En base a las características generales de trayectorias de bloques a lo largo de la ladera, se concluye lo siguiente:

- Los bloques inestables tendrán una longitud de reposo máximo de 140 m, iniciando de la parte alta del escarpe formado por la mesa de Tzitzio.
- La longitud de reposo general de los bloques de roca, se sitúa en un tramo que inicia a 40 m del escarpe principal y termina a 80 m del mismo.
- El trazo de la carretera EL Temazcal-Tzitzio, no se verá afectada por la caída de los bloques, ya que se sitúa a 400 m del escarpe principal. Cabe mencionar que los bloques de roca transportados en superficie se encuentran a todo lo largo de la trayectoria del flujo, de tal manera que representan un peligro constante cuando se encuentran en las cercanías de la carretera.

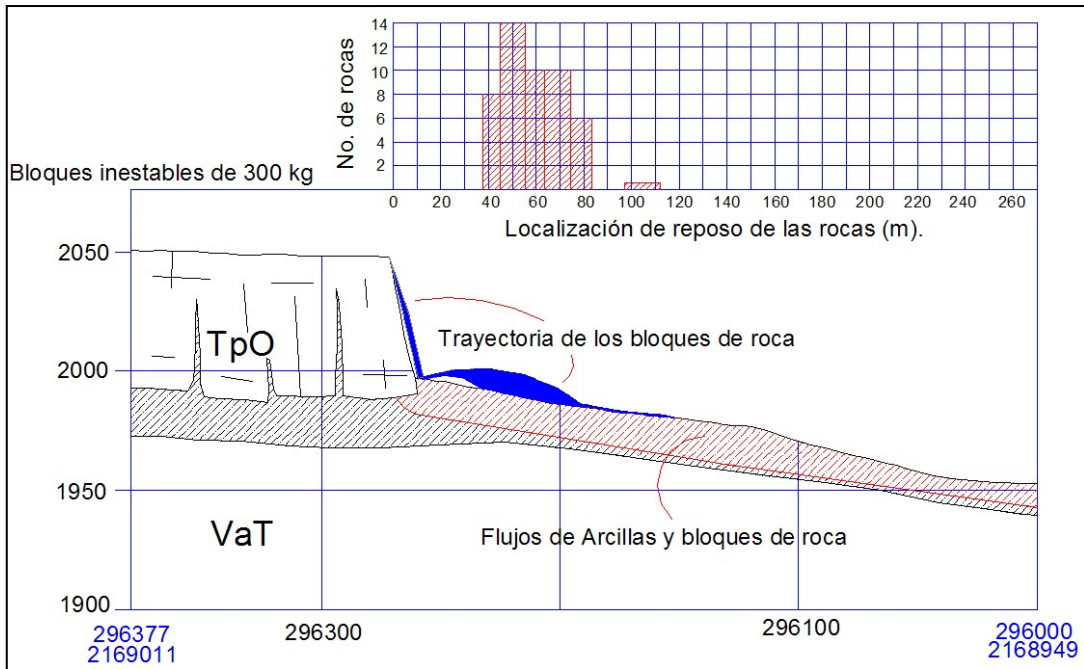


Figura 3.16a.- Análisis de la trayectoria de los bloques inestables de 300 kg de peso.

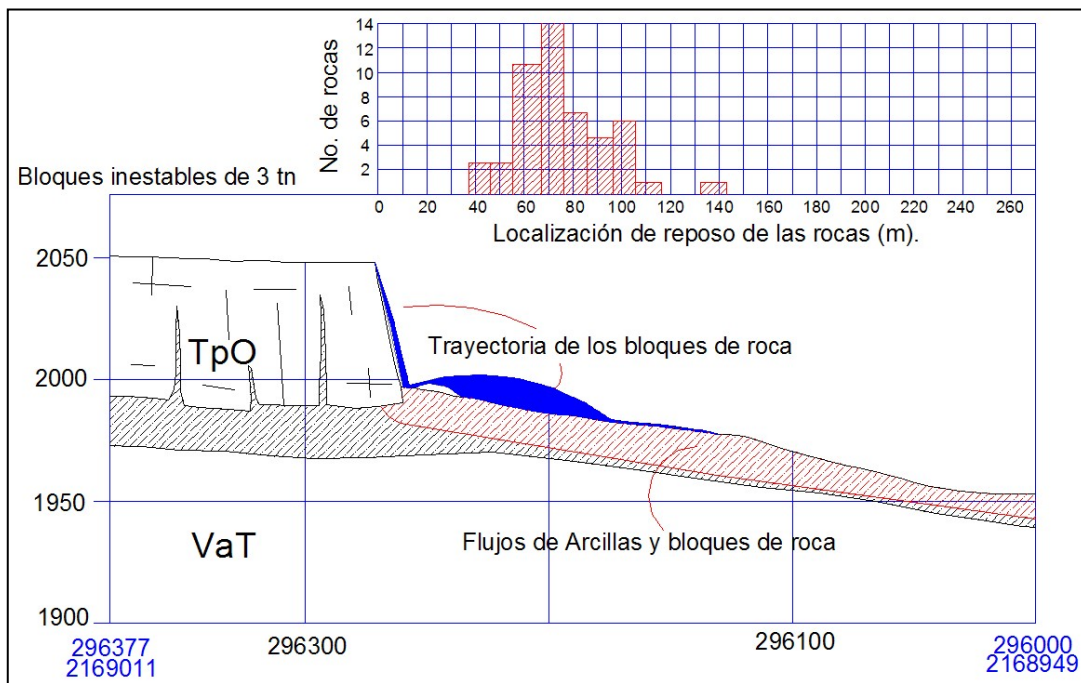


Figura 3.16b.- Análisis de la trayectoria de los bloques inestables de 3 tn de peso.

3.5.- Análisis estabilidad y factor de seguridad por falla circular en unidad CTiVaT.

El factor de seguridad se realizó en base a lo descrito en el capítulo de metodología. El análisis de estabilidad de la ladera, se aplico con la finalidad de delimitar la masa inestable por medio de un plano de falla crítica que tuviera un valor de factor de seguridad mínimo o igual a uno, con lo cual se intentó reproducir las condiciones a las que la ladera estuviera sometida en una situación de falla:

- Carga de roca producida por el peso del macizo rocoso en la cima de la ladera (1412.64 KN/m) (Figura 3.17).
- Esguerramiento constante de agua a lo largo del contacto litológico entre la unidad de roca (CTsTpO) y el paquete de arcillas susceptibles a cambios volumétricos.

La superficie de falla crítica para los flujos de arcillas que se identificaron en la parte alta del total de la masa en movimiento, se obtuvo con un valor de seguridad de 1.16, la cual inicia a 20 m del escarpe formado por la mesa de Tzitzio y presenta una profundidad máxima de 17 m. Cabe mencionar que los valores de la superficie de falla que resultaron de esta modelación fueron modificados en base a trabajos previos de campo y de cartografía, a razón de que la longitud de la trayectoria de los flujos en campo para la zona donde se realizó la modelación, eran mayores que la longitud resultante.

En la figura 3.17, se presentan las condiciones, bajo las cuales se obtuvo la superficie de falla crítica con valor de seguridad igual a 1.16. Se puede observar, que la masa deslizada delimitada por la superficie de falla está afectando a la carretera El Temazcal-Tzitzio, la cual estará sometida a las deformaciones, movimientos y asentamientos que sufra la masa al ser desplazada. (Figura 3.18)

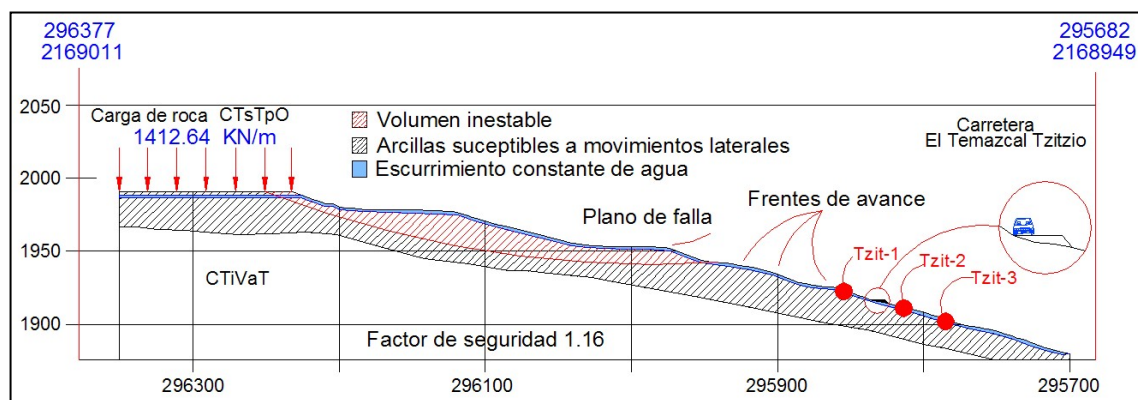


Figura 3.17.- Sección geológica. Análisis de estabilidad y factor de seguridad a lo largo del plano de falla crítica. Se incluye la ubicación de las muestras de suelo.

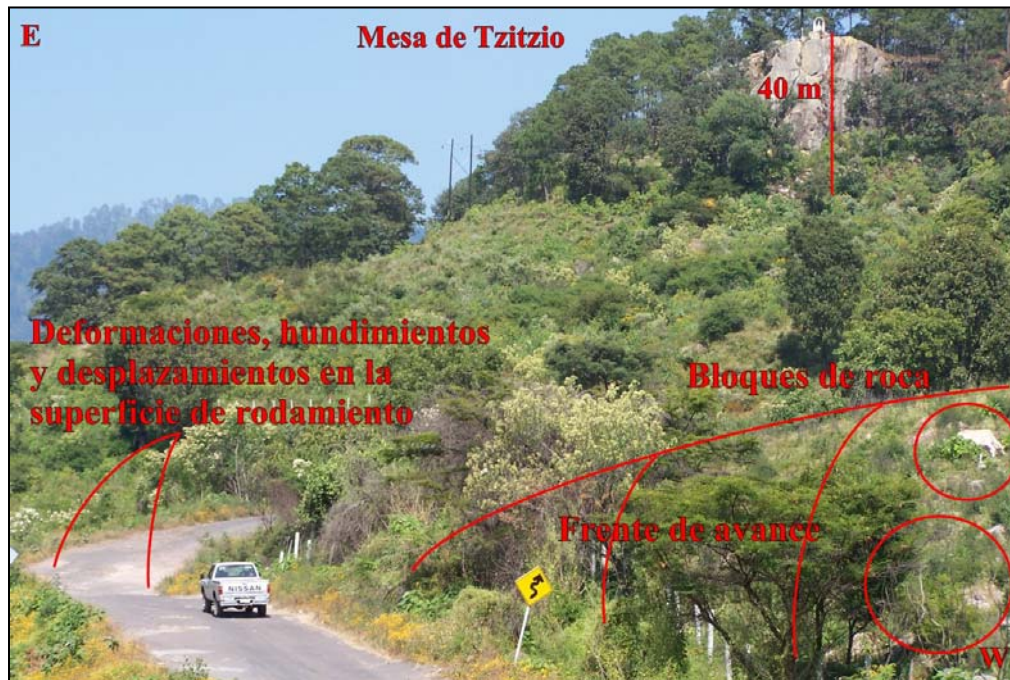


Figura 3.18.- Deformaciones, movimientos y asentamientos en la superficie de rodamiento (carretera El Temazcal-Tzitzio) generados por el flujo de arenas arcillosas.

En base a las características generales del perfil y las condiciones a las que esta sometido, se concluye lo siguiente:

- Los movimientos o extensiones laterales corresponden a las propiedades plásticas de las arcillas con características de alto porcentaje de retención de agua y cambios volumétricos importantes.
- Los escurrimientos de agua han estado jugando un papel muy importante en cuanto a la inestabilidad de la ladera se refiere, esto basado en las características físicas de retención y absorción de agua de los materiales arcillosos involucrados, los cuales generan masas viscosas que según Wang, *et al* (2002), son considerados como movimientos muy peligrosos por su ocurrencia inesperada, su rapidez, su distancia de alcance y su forma de encauzarse a lo largo de la ladera.
- El trazo de la carretera El Temazcal-Tzitzio, se encontrara sometida al continuo movimiento de la masa desplazada, ya que se encuentra desplantada sobre el cuerpo de la masa inestable.
- La ubicación de la superficie del plano de falla crítica realizado para la parte alta del total de la masa en movimiento a lo largo de los materiales arcillosos y capas rojas, juega un papel muy importante en la estabilidad de los bloques de roca de la mesa de Tzitzio, En la figura 3.2 y 3.8 se observa que hay un hundimiento central en forma de fosa al interior de la mesa con una orientación similar al del fracturamiento regional

(NE 40-50SW) y similar al flujo de la masa inestable. Por esta razón para este trabajo se dice que el desplazamiento o movimiento lateral y cambios volumétricos del material subyacente (CTiVaT) a la mesa (CTsTpO), se refleja en la superficie por medio de escalones y hundimientos de grandes dimensiones, así como en la actividad del fracturamiento.

- Las unidades litológicas y el fracturamiento controla la morfología del terreno y probablemente la presencia de los PRM.

4.- DISCUSIONES

4.1.- Características de los deslizamientos, descripción y ejemplos

El fenómeno de inestabilidad en la zona, corresponde a movimientos o extensiones laterales, donde se combinan deformaciones de tipo rígidas en la cima (unidad CTsTpO) con un mecanismo de deformación continua en la unidad subyacente (CTiVaT) bajo la acción de esfuerzos generados principalmente por la saturación.

Como primer mecanismo de movimiento se presentan los flujos de materiales sueltos no consolidados, donde sus características plásticas condicionan en gran parte los desplazamientos laterales y verticales a lo largo del fracturamiento y las deformaciones del macizo rocoso suprayacente. El segundo mecanismo es la caída de los bloques de roca, los cuales son separados, incorporados y transportados en la superficie de los flujos que se encauzan ladera abajo.

Alrededor del mundo se han generado procesos muy parecidos a los movimientos laterales que se presentan en la zona de Tzitzio. Con la finalidad de ejemplificar el fenómeno, se citan los procesos que han estado ocurriendo en la zona de Toscana, Italia. En la región denominada La Verna se encuentra un ambiente geológicamente favorable para los PRM, el cual esta constituido por una alternancia de areniscas y conglomerados que descansan sobre una unidad con características plásticas, constituida por arcillas sobreconsolidadas. La unidad sedimentaria forma un relieve de grandes escarpes conocido como Mesa de la Verna, cubre un total de 1.2 km² y muestra cuatro sistemas de discontinuidades (Casagli, *et al.* 1993). Alrededor de la mesa han sido reconocidos movimientos laterales y deslizamientos rotacionales de grandes dimensiones constituidos por arcillas limosas, cuya actividad juega un papel muy importante en la estabilidad de la unidad sedimentaria, generando así caídas, deslizamientos y volcamientos de grandes bloques de roca, que a su vez son incorporados por la masa arcillosa (Figura 4.1)

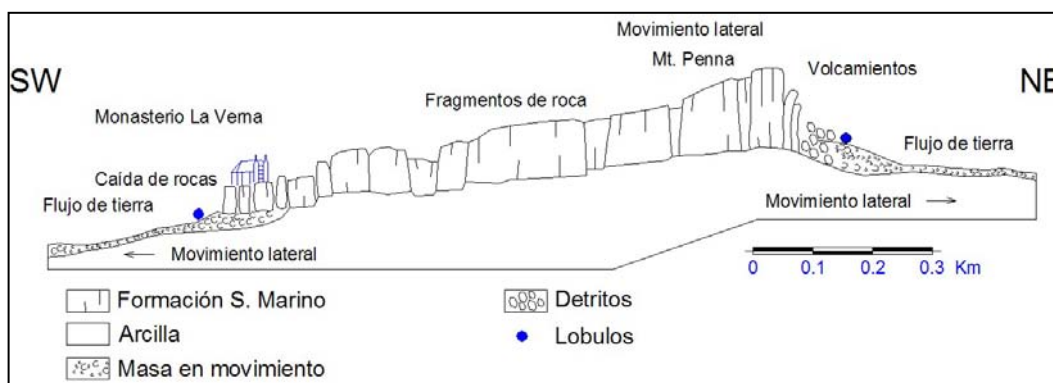


Figura 4.1.- Sección esquemática interpretativa de la deformación gravitativa profunda de la mesa de la Verna (Modificado de Casagli, *et al.* 1993).

En la misma región de la Toscana meridional, al norte del poblado de Roccalbegna, se encuentra una serie estratigráfica compuesta por una unidad arcillosa de comportamiento muy plástico, que es coronada por una secuencia calcárea gruesa. Su actividad concuerda

con un modelo de expansiones laterales. En esta zona se pueden reconocer estructuras de amplias depresiones con longitudes que varían de 10 a 50 m con profundidades que rebasan los 5 m. La pared de estas estructuras se presenta de forma rectilínea y el fondo esta cubierto por detritos. Asociado a estas estructuras encontramos depósitos constituidos de bloques calcáreos de grandes dimensiones. La estructura principal presenta un graben de 10 m de ancho, 30 m de largo y 7 m de profundidad. El intenso fracturamiento de la unidad situada en la cima, presenta grandes problemas de inestabilidad para la parte SW del poblado de Roccalbegna. Estudios de monitoreo por medio de cuatro inclinómetros revelaron que los datos obtenidos corresponden a un movimiento de lateral. Los desplazamientos son máximos en superficie y tienden a disminuir con la profundidad (Lotti, *et al.* 1992).

4.2.- Características de los materiales no consolidados

En base a las características físicas, mecánicas y mineralógicas obtenidas en laboratorio, los suelos en la zona quedan descritos de la siguiente forma: En todos los casos se reconoce la presencia de por lo menos una especie arcillosa, (monmorilonita o nacrita) que se caracterizan por su alta hidratación. A su vez se correlaciona con los resultados de retención de agua tan altos G_w 96-98 %, los cuales reflejan la disminución rápida de la resistencia al esfuerzo cortante, bajo condiciones de saturación. Una vez que los suelos estén saturados sufrirán deformaciones que irán acompañadas de variaciones volumétricas apreciables. Es importante aclarar también que las fracciones minerales arcillosas citadas, no son la parte más dominante del material en cada punto, lo cual se refleja en ángulos de fricción interna entre 24° y 26° cuando la masa total es sometida a esfuerzos. Cabe mencionar que la humedad en el suelo y en las discontinuidades del macizo rocoso, prevalece todo el año. Muestra de ello fueron los resultados de humedad natural w 20% obtenidos en la temporada más seca del año.

4.3.- Patrones de fracturamiento

En materiales rocosos, las fallas geotécnicas se efectúan generalmente en planos o discontinuidades preexistentes, por esta razón es importante su caracterización.

Cuatro direcciones preferentes de lineamientos fueron reconocidos en la zona, en base a la agrupación homogénea de datos estructurales reconocidos para las diferentes escalas. Una primera orientación preferente con dirección $N40^\circ-60^\circ W$ y una segunda orientación $N40^\circ-60^\circ E$ que se correlacionan a nivel regional (1:50,000) y a nivel local (1:25000).

En lo referente a las densidades máximas de los lineamientos, estas se agrupan en dos regiones. Una primera región se localiza en la parte noreste del mapa, dentro de la unidad litológica CTiVaT. Una segunda región se localiza en la parte sur del mapa, donde convergen las unidades CTiVaT, CTIn y CTo-mCR, lo que lleva a pensar que gran parte de los lineamientos han sido generados por la intrusión de la unidad CTIn. La densidad mínima de los lineamientos en la zona se encuentra en la unidad CTsTpO, lo cual refleja estratigráficamente su edad relativamente más joven. Por otro lado, en general la densidad

que se presenta en la vecindad de los deslizamientos es muy homogénea con variaciones en el rango de 9 a 11 lineamientos por km². Cabe mencionar que los deslizamientos se encuentran entre dos lineamientos regionales principales con dirección N40°-50°E, los cuales son paralelos a su trayectoria. De esta manera se llega a pensar que los lineamientos principales están controlando en gran parte el encauce y trayectoria de los deslizamientos.

A nivel afloramiento las dos direcciones de fracturamiento presentan correspondencia con los lineamientos marcados a nivel local. Pero además son identificadas otras dos direcciones de fracturamiento: Una primera orientación E-W condiciona en gran parte la inestabilidad del macizo en las cuatro estaciones de fracturamiento. Una segunda orientación corresponde a una dirección promedio N10°-30°E, la cual condiciona la inestabilidad en las estaciones 2, 3 y 4.

La evolución estructural de la zona se definió en base a agrupar por unidades litológicas los diferentes rasgos estructurales. La unidad de la cima de la columna (CTsTpO) presenta una orientación muy particular de lineamientos N-S. Esta orientación corresponde a planos de fracturamiento marcados a nivel afloramiento, los cuales delimitan bloques de roca en las estaciones 2, 3 y 4. Otra orientación muy importante N40°-50°E que afecta a toda la columna controla la dirección de la trayectoria de los deslizamientos en la zona.

4.4.- Análisis de estabilidad

- En el macizo rocoso (CTsTpO)

En el macizo rocoso existen dos tipos de mecanismos de falla: Volteo y deslizamientos en cuñas, los cuales están siendo controlados por dos familias de fracturamiento, N 70°-90° E y N 10°-30° E.

La primera familia con buzamiento hacia el SE, controla el volteo de grandes bloques en la estación 3, a razón de que buza al lado contrario de la traza del talud. Para las demás estaciones esta misma familia de fracturamiento corresponde a uno de los planos sobre los que se deslizan grandes bloques en forma de cuña. Esta misma familia pero con buzamiento hacia el NW, controla el volteo de bloques en la estación 1.

La segunda familia de fracturamiento con orientación promedio N 10°-30° E, juegan un papel muy importante en la inestabilidad ya que en conjunto delimita bloques y condiciona el tipo de falla en la zona. Los valores numéricos de los factores de seguridad tanto para mecanismo al volteo como para mecanismo en cuña bajo diferentes condiciones, se presentan en la tabla 4.1.

Mecanismo de falla	FS Estación 1	FS Estación 2	FS Estación 3	FS Estación 4
Cuña 1 (Caso 1)	-	0.32	-	0.35
Cuña 1 (Caso 2)	-	0.30	0.75	0.89
Cuña 1 (Caso 3)	-	0	0	0
Cuña 2 (Caso 1)	-	-	0.55	-
Cuña 2 (Caso 2)	-	-	0.50	-
Cuña 2 (Caso 3)	-	-	0	-
Volteo	0.10	-	0.07	0.35

Tabla 4.1.- Resumen de los factores de seguridad y mecanismo de falla para las cuatro estaciones de fracturamiento. .

Los mecanismos de falla en cuña en la zona son los más frecuentes, su inestabilidad queda representada en los valores numéricos menores a uno. El mecanismo de falla en cuña, analizado bajo condiciones saturadas sin cohesión (caso 4), representa la condición más crítica de inestabilidad, esto queda reflejado en los valores del FS casi igual a cero. Cabe mencionar que aunque sean muy bajos en todas sus condiciones, no significa que la falla se origine de manera espontánea. Porque hay que considerar las relaciones geométricas de las fracturas con respecto al escarpe y porque no se obtuvieron datos de la resistencia real de las discontinuidades y solo se consideró una aproximación del ángulo de fricción. Esto implica que este análisis sea solo una aproximación que sin duda se podrá refinar con valores experimentales de resistencia de las discontinuidades (cohesión y fricción).

Otro mecanismo de falla no menos frecuente, es el de volteo que representa inestabilidad en tres de las estaciones de fracturamiento con valores de seguridad (FS) cercanos a cero. En este caso el análisis es realista puesto que las estaciones 1, 3 y 4 se han observado bloques fallados por este mecanismo.

- Trayectoria de los bloques de roca

El análisis de caída de los bloques delimitados por la geometría del fracturamiento anteriormente descrita demuestra la siguiente trayectoria: Para bloques de roca de 3 tn de peso, se tiene una longitud máxima de reposo de 140 m ladera abajo y un rango de distancia de reposo entre 40 y 110 m del pie del talud formado por la unidad CTsTpO. Para bloque de 300 kg de peso se tiene una longitud máxima de reposo de 110 m ladera abajo y un rango de distancia de reposo entre 40 y 80 m del pie del talud formado por la unidad CTsTpO. Una vez en reposo los bloques de roca no alcanzarán la carretera situada a 400 m del pie de la unidad CTsTpO. Cabe aclarar que una vez incorporados al flujo del material subyacente, tienen trayectorias tales, que cuando la velocidad del flujo es muy grande en condiciones saturadas representan gran peligro para los transeúntes de la carretera “El Temazcal - Tzitzio”.

- Falla circular en material no consolidado (CTiVaT)

La geometría de la superficie de falla circular se definió en base a los resultados de la modelación y a trabajos previos de campo y de cartografía, a razón de que la longitud de la trayectoria de los flujos en campo, eran mayores que la longitud resultante de la modelación. Por otro lado, se puede afirmar que las deformaciones y hundimientos que la carretera “El Temazcal-Tzitzio” ha sufrido desde su construcción, se debe en gran parte a la actividad y la extensión de los diferentes frentes de avance de la masa removida por el flujo en esta zona. El factor de seguridad que condiciona el plano de falla crítica con valor de 1.16, fue obtenido bajo condiciones húmedas con escurrimientos constantes y bajo el efecto de la carga del macizo rocoso. Uno de los aspectos no considerados para la modelación, fue el factor sísmico, cabe mencionar que este aspecto puede ser sin duda un factor adicional en la estabilidad de la ladera.

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

I.- Las condiciones geológicas de la región de Tzitzio son sin duda uno de los factores principales en cuanto a PRM se refiere. El complejo global de los fenómenos en la región, corresponde a la sobreposición de unidades con características mecánicas y físicas muy diferentes: En la cima de la columna tenemos grandes paquetes de Ignimbritas vítreas muy compactas, las cuales forman la geoforma conocida como mesa de Tzitzio que esta siendo fragmentada por fallas normales con dirección NE-SW. Subyaciendo a este paquete encontramos una secuencia de sedimentos arcillosos formados por la erosión y deslizamientos de masas a partir de la desintegración de las unidades volcánicas. De acuerdo a lo anteriormente descrito, el mecanismo de falla corresponde al fenómeno de movimiento o extensión lateral a razón de la definición propuesta por Suárez-Díaz (1998), este fenómeno consiste en el fracturamiento de unidades rígidas, seguidas de hundimientos y deformaciones en la cima, separación, caídas, vuelcos y desplomes de roca, los cuales son generados por la actividad plástica de las unidades subyacentes que saturadas se comportan como un flujo denso que trasportara los bloque de roca ya separados.

II.- Los PRM de la zona son generados por la combinación de dos tipos de movimientos: 1).- Caídas y Volcamientos de roca: Presentes en la unidad geológica CTsTpO, a lo largo de escarpes con pendientes de hasta 86° (mesa de Tzitzio). La geometría de tres familias de fracturamiento, delimitan bloques de hasta 3 tn de peso, donde los mecanismos de falla son en cuña y al volteo con factores de seguridad menores a 0.80. 2).- Flujos de arenas arcillosas, que constan con un gran volumen de material que se encausa y se ha desplazado hasta 4 km a lo largo de la ladera, bajo condiciones de saturación. Trabajos de monitoreo realizados por (Flores-Rosas, 1998) muestran movimientos constantes de la masa del orden de 4.5 m en un lapso de 6 años, con velocidades de movimiento de hasta 6.25 cm/s. Una vez caídos los bloques de roca son incorporados y transportados en superficie, por el flujo de arenas arcillosas, esto debido a la diferencia de densidades.

III.- En base a la columna litológica en conjunto con las rosetas para cada unidad, se pueden describir dos etapas de lineamientos: La primera etapa corresponde a lineamientos con orientación $N40^\circ-60^\circ W$ que afectan a las dos unidades más antiguas (CTo-mCR y CTIn). La segunda etapa corresponde a lineamientos con orientación $N40^\circ-50^\circ E$, los cuales se encuentran afectando a todas las unidades de la columna. La unidad de la cima de nuestra columna litológica (unidad CTsTpO), presenta una orientación muy particular de lineamientos con tendencia N-S.

IV.- Los mapas de densidades describen dos regiones máximas de lineamientos: La primera región se encuentra en la parte noroeste del mapa, dentro de la unidad litológica CTiVaT. La segunda región se encuentra en la parte sur del mapa y toma lugar en la conjunción de contactos de las unidades CTiVaT, CTIn y CTo-mCR (Figura 4.9). Lo que lleva a pensar que posiblemente la intrusión de la unidad CTIn, esta generando el fracturamiento en esta zona.

V.- Los estudios mecánicos, físicos y las pruebas mineralógicas de las partículas finas de los suelos que subyacen a la unidad rígida de roca, se compararon con la finalidad de

reconocer relaciones directas entre causa y efecto. Las características del alto grado de retención de agua e hidratación, en conjunto con deformaciones y variaciones volumétricas apreciables en el suelo bajo efectos de saturación, definen a la presencia de agua como un factor desencadenante de los fenómenos en la zona.

VI.- Parámetros geotécnicos de la roca como c y ϕ se obtuvieron por medio de la clasificación geomecánica RMR. Esta clasificación resulta ser un método muy confiable y práctico para la atribución de parámetros geotécnicos en nuestra zona, a razón de las características geométricas y físicas de fracturamiento que el macizo rocoso presenta.

VII.- El alto grado de inestabilidad a la que el macizo rocoso (mesa de Tzitzio) está sometido, quedó comprobado por medio del análisis geométrico y factores de seguridad de cada estación levantada, donde los mecanismos de falla son por cuña y por volteo. El bajo valor de seguridad (> 0.80), no pretende decir que la inestabilidad sea espontánea. Normalmente los rellenos de las fracturas en la zona de estudio, van siendo erosionados con el paso del tiempo, de esta manera una vez reunidas las condiciones de inestabilidad, bajo las cuales el análisis fue realizado, la caída de los bloques será inminente.

VIII.- La trayectoria de los grandes bloques de roca presentan un punto de reposo máximo de 140 m, una vez incorporados al flujo de arenas arcillosas, los bloques de roca son transportados en la superficie a todo lo largo de la ladera, esto debido a la diferencia de densidades entre el flujo (2.70 gr/cm^3) y los bloques de roca (2.30 gr/cm^3). La gran trayectoria de los bloques de roca en superficie, representan uno de los principales riesgos en cuanto a la destrucción del Km 8 + 500 de la carretera “El Temazcal - Tzitzio” se refiere. Sin duda la carretera “El Temazcal - Tzitzio” representa una de las principales vías de comunicación con la región de tierra caliente del estado de Michoacán, por lo que su destrucción representaría un fuerte impacto en la conexión económica del estado.

IX.- El plano de falla crítica fue delimitado en base a un valor de seguridad de 1.16, la profundidad máxima del plano presenta un valor de 17 m y una trayectoria de movimiento a lo largo de la ladera bajo condiciones de saturación, la cual se compone por diferentes flujos de arcillas y roca en superficie, que no comparten planos de deslizamiento. Sin duda el movimiento de la masa inestable ha estado afectando la estructura del tramo carretero “El Temazcal - Tzitzio” en el Km 8 + 500, de manera que el tránsito de vehículos hacia zona de tierra caliente del estado de Michoacán ha sido deficiente desde su construcción.

X.- Los estudios realizados en este trabajo de tesis, podrían ser sin duda un antecedente base en la propuesta de reducción o mitigación del riesgo en la zona.

Recomendaciones

Para el diseño de medidas de mitigación en la zona de Tzitzio no solo es necesario establecer la magnitud de la inestabilidad y definir las propiedades y parámetros geotécnicos de los materiales involucrados. Un aspecto importante que será necesario también establecer son los recursos económicos con los que se pueda disponer, en busca de la solución más factible.

Como ya se describió, uno de los principales factores que promueven los procesos de inestabilidad en la zona, son los efectos de presión de poro generados por la percolación y escurrimientos constantes de agua. Con la finalidad de reducir el riesgo en la zona, una de las medidas correctoras o de mitigación primordiales sería evacuar el agua del interior del talud, por medio de una red de drenajes superficiales y drenajes profundos, sin embargo debido a las dimensiones de la inestabilidad, la construcción de cualquier obra de saneamiento sería económicamente no sustentable para el municipio de Tzitzio. Por otro lado, una de las medidas que se podrían llevar a cabo sería el monitoreo del comportamiento y características de inestabilidad a lo largo de la vertiente, por medio de la medición de movimientos superficiales, movimientos del interior del terreno y desplazamientos de fracturas y grietas para el caso del macizo rocoso. El conjunto de los valores de desplazamiento permitirá detectar el movimiento de una zona determinada del talud. De esta manera el municipio de Tzitzio podrá tomar medidas de prevención en busca de la reducción de las afectaciones causadas a la población y a su patrimonio, que desde hace más de una década han estado mermando las vías de acceso hacia la zona de Tierra Caliente del estado de Michoacán.

Dos aspectos que se deberán tomar en cuenta para un análisis de estabilidad más confiable son: a).-Se recomienda hacer una campaña de pruebas de laboratorio en discontinuidades. b).- Hay que considerar que las condiciones críticas de inestabilidad son con presencia de agua. La zona además resiente la actividad de sismos que si se llegaran a presentar junto con las condiciones críticas aumentarían el potencial de los movimientos.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alcántara-Ayala I., 2000, Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17 (1), 66-75.
- Alcantara-Ayala, I., 1999, The torvizcón, Spain, landslide of February 1996: the role of lithology in a semi-arid climate: *Geológica Internacional*, 38(3), 175-184.
- Angeli, M.G., Pasuto, A., Silvano, S., 2000, A critical review of landslide monitoring experiences: *Engineering Geology*, (55), 133-147.
- Arreygue-Rocha, E., Canuti P., Casagli, N., Chiesa, S., Garduño-Monroy, V.H., 2002, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la ciudad de Morelia, Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19 (2), 91-106.
- ASTM committee D-18 on soil and rock., 1995, Standard Test Method for determination of the point load strength index of rock: *Annual Book of ASTM Standards*, 04(08), 1442-1448.
- Barton N., 1978, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses: *International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts*, 15 (6), 319-368.
- Braja M.D., 1999, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*: EUA ,Thomson Learning, 594 p.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., Dávila-Hernández, N., 2003, Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: Relación entre litología y tipo de movimiento: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20 (2), 95-106.
- Casagli, N., Fazzuoli, M., Focardi, P., Garzonio, C.A., Lotti, A., Pandelli, E., Tarchiani, U., Vannocci, P., 1993, Deformación Gravitativa Profonde in Toscaza, Aspetti geologici, geomorfologici e geotecnici di alcune aree rappresentative: Italia, Università degli studi di Firenze, Dipartimento di Scienze della Terra, IV Seminario, 72 p.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., Vescovi, P., 2002, A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method: *Geomorphology*, (48), 349-364.
- Crespo, Villalaz; C. 1980, *Mecánica de suelos y cimentaciones*: México, Limusa, 640p.
- D'Amato-Avanzi, G., Giannecchini, R., Puccinelli, A., 2004, The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy): *Engineering Geology*, (73), 215-228.
- Davis, G.H., Reynolds, S.J., 1996, *Structural Geology of Rocks and Regions*: USA, John Wiley and Sons, Inc. 776 p.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M., 1996, *Landslide Recognition, Identification, movement and causes*: Ontario, Canadá, John Wiley and Sons, 251 p.

- Flores-Rosas, J., 1998, Falla en ladera natural, carretera el Temazcal-Tzitzio., Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, Tesis de licenciatura, 73 p.
- Giani, G.P., 1992, Rock Slope Stability Analysis: Technical University of Turin, A.ABalkema / Rotterdam / Brookfield, 359 p.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C., 2002, Ingeniería Geológica: Madrid, Pearson Educación, 715 p.
- Griffiths, J. S., Stokes, M.R., 1999, Proceedings of the international conference and field trip on landslides: United Kingdom, A.ABalkema / Rotterdam / Brookfield, 162 p.
- Hoek Evert., 1998, Rock Engineering, course notes: USA, A.A. Balkema, 299 p.
- 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, Michoacán: México, D.F., Instituto Politécnico Nacional, Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Ciencias de la tierra, Tesis de licenciatura, 144 p.
- Lugo-Hubp J, Zamorano-Orozco J. J., Capra L, Invar. M, Alcántara-Ayala I., 2005, Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, Octubre de 1999: Causas y efectos: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22 (2), 212-228.
- Kehew, A.E., 1998, Geology for Engineers and Environmental Scientists: EUA, Prentice-Hall, 573 p.
- Kilburn, R.J.C., Pasuto, A., 2003, Major risk from rapid, large-volume landslide in Europe: Geomorphology, 54, 3-9.
- Maceo, G.A., Pasuto, A., Silvano, S., 2000, A Critical review of landslides monitoring experiences: Engineering Geology, 55, 133-147.
- Mengelle-López, J. J., 2001, Evaluación del riesgo por deslizamientos en el municipio de Zacatlán, Puebla: Boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, 21 (3).
- Quintana, A., Lomoschitz, A., 2000, Landslides as a determining geomorphologic factor of the Barranco de Tirajana basin, Gran Canaria: JAG, 2(1), 3-8.
- Remondo, J., González-Díez, A., Díaz de Terán, J. R., Cendrero, A., 2003, Landslide susceptibility models utilising spatial data análisis thechniques. A case study from the Lower Deba Valley, Guipúzcoa (Spain): Natural Hazards, (30), 267-279.
- Romo-Silva, G., Rosales-Mendoza, C.C., Madrigal-Campos, E., 2001, Elementos de Cartografía Geológica: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 292 p.

- Sjöberg, J., 1997, Estimating rock mass strength using the hoek-brown failure criterion and rock mass classification: International Report Division of Rock Mechanics, Lulea University of Technology, 1-55.
- Slosson, J.E., Keene, A.G., 1992, Landslides Mitigation: Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, IX, 120 p.
- Suárez-Díaz, J., 1998, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales: Colombia, 540 p.
- Szykaruk, Ewa., 2004, Tectonic implications of geomorphologic and structural characteristics of Morelia-Acambay fault system, central Trans-Mexican Volcanic Belt: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis doctoral, 105 p.
- Thornes, J.B., Alcántara-Ayala, I., 1998, Modelling mass failure in a Mediterranean mountain environment: climatic, geological, topographical and erosional controls: Geomorphology, (24), 87-100.
- Turner, A.K., Schuster, R.L., 1996, Landslides Investigation and Mitigation, Special report 247, Washington, D.C., National Academy Press, 673 p.
- Wang, G., Sassa, K., 2003, Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content: Engineering Geology, (69), 109-125.

Anexo 1. Ensayos de carga uniaxial y carga triaxial en suelos

El ensayo de compresión simple, se realizó con la finalidad de conocer el comportamiento de deformación, carga admisible y consistencia natural del suelo. Cabe mencionar que la deformación causada en el suelo por los esfuerzos aplicados, dependerá de la composición, de la relación de vacíos, y de la historia de esfuerzos aplicados al suelo. Las probetas ensayadas, se labraron de una masa remoldeada de suelo, donde se reconstruyeron las características “In situ” (Braja, M.D., 1999).

En el ensayo de compresión triaxial se intento reproducir las condiciones reales a las que el suelo esta sometido, aplicando así presiones de confinamiento semejantes a las existentes en campo. En base a esta prueba se determino el ángulo de fricción interna (ϕ) y cohesión (c). Datos que resultaron de representar gráficamente, el comportamiento de deformación y falla de cada espécimen, los cuales se sometieron a carga axial (σ_1) y carga de confinamiento (σ_3) diferente.

Las representaciones gráficas del estado de esfuerzos para cada espécimen, reciben el nombre de círculos de Mohr. Círculos que serán envueltos por una línea recta que representara la falla, donde la inclinación representará el (ϕ y c). (Figura A.1)

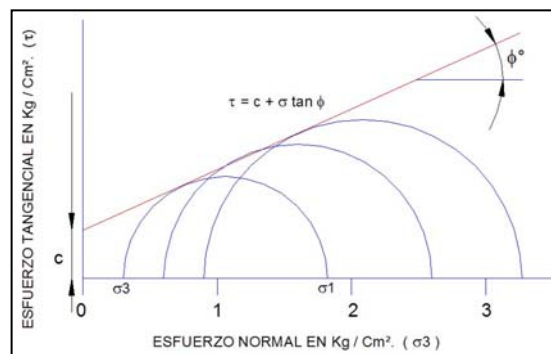


Figura A.1- Representación gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación (círculos de Mohr).

La interpretación del comportamiento del suelo en estado natural sometido a diferentes factores, se realizó graficando los círculos de Mohr tomando en cuenta las siguientes observaciones:

1.- La presencia de presión de poro, produce un decremento en la resistencia al esfuerzo cortante, generándose así superficies de debilidad y deslizamiento. (Figura A.2a)

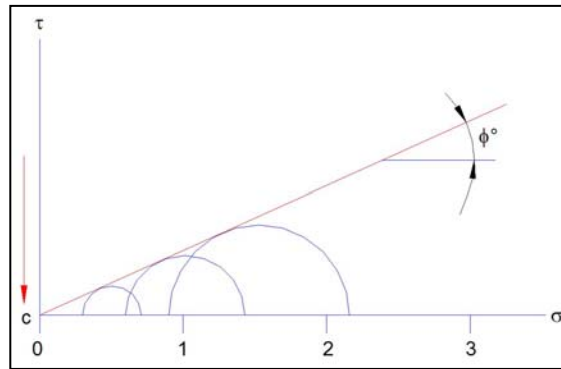


Figura A.2a.- Representación gráfica de la disminución de las fuerzas c y decremento de la resistencia al esfuerzo cortante.

2.-Los valores de cohesión serán el resultado de la resistencia al esfuerzo normal del espécimen. A mayor resistencia mayor cohesión. (Figura A.2b)

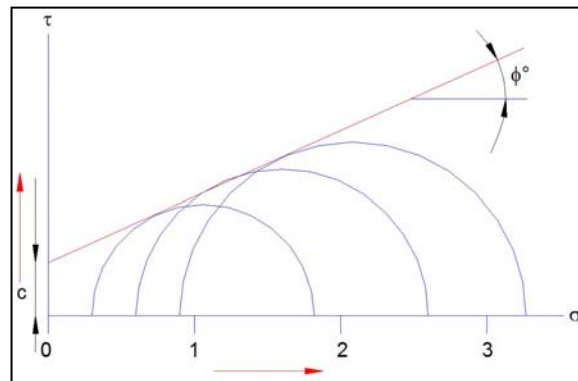


Figura A.2b.- Representación gráfica del aumento de la cohesión en conjunto con el aumento de la resistencia del esfuerzo normal.

3.-Los valores del ángulo (ϕ) van a depender de la historia de esfuerzos tangenciales (τ) y normales (σ), es decir de la inclinación de la envolvente de falla. (Figura A.2c)

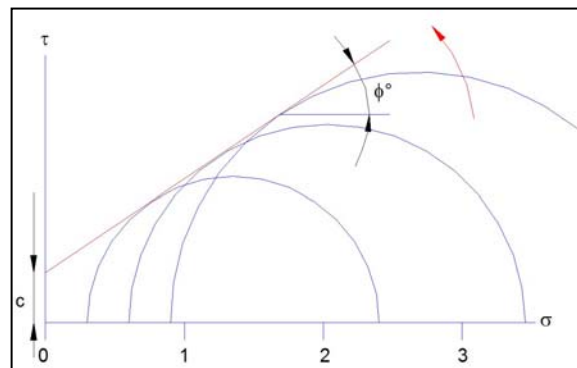


Figura A.2c.- Representación gráfica del aumento del ángulo de fricción en conjunto con la disminución de las fuerzas de cohesión, bajo la historia de los esfuerzos.

Anexo 2. Preparación de muestras para pruebas mineralógicas

- 1) Las muestras Tzit-1, Tzit-2 y Tzit-3 fueron colectadas de diferentes puntos en el nivel subyacente al bloque rocoso (Mesa de Tzitzio) (Figura 3.8). Luego de una revisión microscópica, se seleccionó la parte con mayor contenido de partículas del tamaño de arcillas ($2\ \mu\text{m}$ ó menos) de cada muestra para realizar una separación de material, con ayuda de espátula.
- 2) Una cantidad de material aproximada a los 200 g fue depositada en vaso de precipitado de 250 ml. Se adicionaron 50 ml de agua destilada y se mezcló con varilla de vidrio.
- 3) Los vasos con la mezcla fueron sometidos a vibración en una tina de ultrasonido por lapsos de 10 a 15 minutos y se dejaron reposar durante 24 horas. En uno de los casos, la presencia menor de minerales hojosos o arcillosos obligó a realizar agitaciones manuales hasta obtener suficiente material en suspensión, susceptible de ser recuperado.
- 4) La fracción fina fue recuperada de la parte suspendida, o bien, del sedimento acumulado en las paredes del vaso; se emplearon pipetas de Pasteur y una bomba manual para controlar el ascenso del fluido. Asimismo, la colecta se hizo sólo de la capa superior del sedimento y evitando en todo momento introducir demasiado la punta de la pipeta.
- 5) La muestra colectada fue depositada en portamuestras de vidrio liso, previamente delimitados con cinta adhesiva e identificados con una clave. Este procedimiento se hizo con el fin de evitar derrames del fluido.
- 6) Los portamuestras fueron colocados en una parrilla metálica e introducidos a un horno para evaporación a temperatura constante de $36\ ^\circ\text{C}$ durante periodos de 6 a 8 horas. El procedimiento de recarga de muestra se realizó de la misma forma, y luego de haber deshidratado la muestra.
- 7) Una vez colectado material suficiente para análisis, se aplicó la técnica de difracción de rayos-X (DRX), con los resultados que se discuten en el siguiente párrafo.

Anexo 3. Levantamiento de fracturas en macizos rocosos

El macizo rocoso está sometido a distintas condiciones de meteorización y alteración, las cuales generan discontinuidades que en gran medida determinan el comportamiento del macizo.

Las discontinuidades son las características más importantes en la inestabilidad del macizo y de las obras que se construyen sobre ellas. La palabra discontinuidad se usa para referirse a planos de debilidad donde quedan comprendidos los planos de estratificación, fracturas juntas o diaclasas, contactos litológicos, foliación y esquistosidad.

A continuación se describen 10 parámetros de discontinuidades que se usan para la descripción del macizo rocoso:

Orientación

La posición de las discontinuidades en el espacio se define por la dirección de buzamiento de la línea máxima pendiente, misma que está contenida en el plano de discontinuidad y por la inclinación de esta línea respecto al plano horizontal.

La orientación de las discontinuidades controla la posibilidad de condiciones inestables o el desarrollo de una deformación excesiva, además determina la forma y dimensiones de los bloques que son cortados de la masa de roca. La importancia de conocer la orientación de las discontinuidades aumenta con la presencia de otras condiciones de deformación como puede ser. La baja resistencia al esfuerzo cortante y suficiente número de discontinuidades. Para obtener la orientación de las discontinuidades, se puede emplear dos métodos. Uno es el uso del clinómetro y el otro es fotogramétrico.

Para la representación de las discontinuidades de macizos rocosos existen diferentes formas:

- **Bloques Diagramáticos.**- Consiste en realizar dibujos en perspectiva donde se represente de forma clara la relación de las discontinuidades con la estructura de ingeniería.
- **Diagramas o Rosetas de frecuencias.**- Es una forma fácil de representar un gran número de datos de discontinuidades a lo largo de ejes radiales usando números concéntricos de 5, 10 y 15 observaciones.
- **Proyecciones Estereográficas.**- En este método, la distribución espacial de los datos es representada en la gráfica de Schmidt.

Espaciamiento

El espaciamiento de las discontinuidades controla el tamaño de los bloques individuales. Varios sistemas de espaciamientos muy cerrados dan condiciones de baja cohesión, mientras que los sistemas más espaciados generan condiciones de interconexión. Este efecto depende de la persistencia de las condiciones individuales.

El espaciamiento de las discontinuidades tiene una fuerte influencia en la permeabilidad de la masa y las características de escurrimiento o infiltraciones.

El espaciamiento se puede medir de la siguiente manera:

Se hace la medición a lo largo de una cinta de longitud conocida, misma que se coloca de manera que la traza de la superficie de las discontinuidades sea perpendicular. Las distancias entre las discontinuidades adyacentes se deberán medir a lo largo de un muestreo mayor de 3 m. y el ángulo (α) menor entre la cinta y la familia de discontinuidades será medido con una aproximación de 05° . Finalmente el espaciamiento común se calculará a partir de la siguiente ecuación.

$$S = Dm \operatorname{sen} \alpha$$

Donde:

Dm = Es la distancia común

α = Ángulo menor entre la cinta y la discontinuidad.

Cabe mencionar que la distribución del espaciamiento (medida perpendicular entre planos de discontinuidad) para cada familia de discontinuidades puede representarse en histogramas.

La terminología con que se nombra el espaciamiento se representa en la siguiente tabla (A.1):

Descripción.	Espaciamiento.
Espaciamiento ext. Cercano.	≤ 2 cm
Espaciamiento muy cercano.	2 – 6 cm
Espaciamiento cercano.	6 – 20 cm
Espaciamiento moderado.	20 – 60 cm
Espaciamiento amplio.	60 – 200 cm
Espaciamiento muy amplio.	2 – 6 m
Espaciamiento ext. Amplio.	≥ 6 m

Tabla A.1.- Descripción de espaciamiento en discontinuidades.

Continuidad o Persistencia

La persistencia implica la extensión de longitud de una discontinuidad en un plano. Es uno de los parámetros más importantes de la masa de roca, pero uno de los más difíciles de cuantificar.

La persistencia de un macizo rocoso se determina siguiendo las siguientes características:

- Las discontinuidades de la familia principal son frecuentemente las de mayor continuidad.
- Es importante considerar la persistencia en el desarrollo de fracturas de tensión localizadas detrás de la cima de un corte.

- La persistencia real puede ser solamente inferida ya que frecuentemente los afloramientos son pequeños comparados con el área o longitud de las discontinuidades.

En los afloramientos o superficies limitadas debe indicarse la persistencia relativa de los diferentes sistemas, mismos que son descritos por los siguientes términos:

- Continuas o persistentes. (Sistemáticas)
- Subcontinuas o subpersistentes (Sub-sistemáticas)
- No continuas o no persistentes (No sistemáticas)

Respecto a la longitud la persistencia de discontinuidades en los macizos rocosos se clasifica de la siguiente forma (*Tabla A.2*)

Persistencia.	Longitud.
Muy baja.	≤ 1 m
Baja.	1 - 3 m
Media.	3 – 10 m
Alta.	10 – 20 m
Muy alta.	≥ 20 m

Tabla A.2.- Clasificación de la persistencia de discontinuidades.

En cada discontinuidad debe medirse la longitud en la dirección del buzamiento y en la dirección del rumbo, puede caracterizarse la extensión de las discontinuidades de acuerdo con el siguiente esquema:

- Discontinuidad que se extiende fuera de la superficie de exposición (x).
- Discontinuidad que termina en roca y dentro de la superficie de exposición (r).
- Discontinuidad que termina en otra discontinuidad (d)

Una familia sistemática de discontinuidades con un alta marca de (x) es de mayor persistencia que una familia sub-sistemática con marcas de (d). Discontinuidades no sistemáticas tenderan a tener alto número de marcas de (r).

Los datos de (x, d y r) deben ser anotados en cada extremo de las discontinuidades relevantes, junto con la longitud en metros, no olvidando especificar las dimensiones de exposición o de afloramiento sobre los que se efectuaron las mediciones.

Los datos recopilados en el análisis de las continuidades se pueden representar de la siguiente forma:

- Las diferentes familias se deben describir como Sistemáticas, sub-sistemáticas o no sistemáticas. Los diagramas de bloques deberán ser etiquetados de acuerdo a las continuidades encontradas.

- Elaboración de un histograma con la persistencia de las longitudes de las trazas de cada familia de discontinuidades.
- Los datos de terminación de cada discontinuidad observada deben ser presentados con el índice de terminación (Tr), el cual se define como el porcentaje de las discontinuidades que terminan en roca (Σr) en relación con el número total de terminación ($\Sigma r + \Sigma d + \Sigma x$), finalmente el resultado se multiplica por 2, ya que cada traza tiene dos terminaciones:

$$Tr = ((\Sigma r) \times 100) / 2 (\text{No. de discontinuidades observadas}) = \%$$

Rugosidad

La rugosidad de las paredes de una discontinuidad es una componente potencialmente importante para la resistencia al esfuerzo cortante, en especial cuando las fracturas están interconectadas (juntas sin relleno) o sin desplazamiento. La rugosidad depende de la abertura, espesor del relleno o cualquier incremento en cualquier desplazamiento previo. En general, el término rugosidad en las paredes de una discontinuidad se puede caracterizar por ondulaciones que pueden alterar localmente al echado y por rugosidad a pequeña escala que puede ser afectada durante el desplazamiento de corte.

Las ondulaciones afectan la dirección del desplazamiento cortante inicial que actúa sobre el plano de discontinuidad, mientras que las irregularidades a menor escala afectan al esfuerzo cortante.

Si la dirección potencial de deslizamiento es conocida, se puede tomar muestra de la rugosidad en un perfil lineal paralelo a esta dirección.

Si la dirección potencial de deslizamiento no es conocida, la rugosidad debe ser medida en tres direcciones; si el deslizamiento es provocado por la intersección de dos discontinuidades, la dirección potencial de deslizamiento es paralela a la línea de intersección de los dos planos.

La rugosidad se puede definir a partir de métodos indirectos como la fotogrametría y de métodos directos como un disco-clinómetro con brújula o un perfil lineal.

Durante los estudios de factibilidad, la descripción de la rugosidad puede ser limitada a términos descriptivos, los cuales están basados en dos clases de observaciones:

- 1.- Pequeña escala en varios centímetros.
- 2.- Escala mayor en varios metros.

El principal propósito de estimar la rugosidad en las paredes de las discontinuidades es con el fin de facilitar la estimación del esfuerzo cortante que actúa sobre ellas.

La rugosidad se puede medir en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala de medida o de la accesibilidad al afloramiento. El método más

sencillo y rápido es la comparación visual de las discontinuidades con los *Perfiles estándar de rugosidad*. (Figura A.3)

Barton y Choubey, proponen un coeficiente (JRC), el cual se estima con la apariencia de las superficies de las discontinuidades en base a perfiles estándares (Figura A.4). Este criterio es empírico y fue deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, que permite estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas.

Apertura

La apertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad, donde el espacio es rellenado por aire, agua o suelo residual.

Las grandes aperturas son generadas por el desplazamiento producido por el esfuerzo.

Las aperturas pueden ser descritas por los siguientes términos (*Tabla A.3*):

Apertura.	Descripción.	Rasgo.
≤ 0.1 mm	Muy junta.	
0.1 – 0.25 mm	Junta.	Cerrado.
0.25 – 0.5 mm	Poco abierta.	
0.5 – 2.5 mm	Abierta.	
2.5 – 10 mm	Mod. amplia.	Media.
≥ 10 cm	Amplia.	
1 - 10 cm	Muy amplia.	
10 – 100 cm	Ext. amplia.	abierto
≥ 1 m	Cavernosa.	

Tabla A.3.-Descripción y rasgo de la apertura de discontinuidades.

Relleno

El relleno puede estar formado por arcilla, limo, arena, brecha ó milonita. Pueden incluir minerales que sellen las discontinuidades (Cuarzo y Calcita).

El amplio rango de comportamiento físico (Deformabilidad y Permeabilidad) depende de muchos factores, de los cuales los más importantes se asocian a los siguientes aspectos:

- Mineralogía del relleno.
- Tamaño de las partículas.
- Proporción de consolidación.
- Contenido de agua.
- Permeabilidad.
- Desplazamiento previo al corte.
- Rugosidad de las paredes.
- Espesor del relleno.

El espesor máximo y mínimo de las discontinuidades con relleno se debe medir con una aproximación del 10 % de error y hacer una estimación del espesor general.

Cuando el relleno es originado por meteorización, las rocas pueden estar compuestas por rocas desintegradas o alteradas y se representarán de la siguiente manera:

- Roca desintegrada: La roca esta alterada a suelo, donde la fábrica original aún esta intacta. (Los granos minerales no están alterados).
- Roca alterada: La roca esta alterada a suelo donde la fábrica original aún está intacta, pero algunos o todos los granos están alterados.

Es necesario determinar la composición mineralógica del relleno. La fracción fina es de mucho interés ya que comúnmente controla la resistencia al esfuerzo cortante a lo largo del tiempo, en especial cuando se tiene la presencia de arcillas expansivas.

El tamaño de las partículas se puede obtener a partir de una estimación burda de la granulometría separando los porcentajes de arcilla, limo, arena y fragmentos de roca.

Cabe mencionar que se debe tomar en cuenta, si una discontinuidad con relleno ha sufrido desplazamiento de corte (Identificables como superficies pulidas, materiales cizallados, desplazamientos de juntas transversales, etc.).

Filtraciones

Las filtraciones de agua en los macizos rocosos ocurren principalmente a través de las discontinuidades (Permeabilidad secundaria).

Es importante el conocimiento del agua subterránea, ya que la trayectoria de las filtraciones y las presiones aproximadas de agua puede dar antecedente de estabilidad o dificultad para la construcción. Los niveles irregulares y los mantos colgados de esta agua pueden ser encontrados en masas de roca que son interceptados por estructuras impermeables; por lo que se deberán detectar las barreras de flujo asociados a mantos de aguas irregulares.

Una forma conveniente de representar los resultados de la geohidrología del sitio es:

- Indicar con flechas en la foto área o mapa geológico, el flujo general del agua subterránea.
- Especificar barreras que impiden el flujo del agua, tales como diques, discontinuidades grandes con rellenos de arcilla y capas o estratos impermeables.
- Describir la interacción que exista entre el proyecto de ingeniería y el régimen del flujo de agua.

Las observaciones respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenos como si aparecen limpias, pueden seguir las siguientes descripciones:

Clase	Discontinuidades sin relleno	Discontinuidades con relleno
I	Junta muy plana y cerrada. Aparece seca y no parece posible que circule agua.	Relleno muy consolidado y seco. No es posible el flujo de agua.
II	Junta seca sin evidencia de flujo de agua.	Relleno húmedo pero sin agua libre.
III	Junta seca pero con evidencia de haber circulado agua.	Relleno mojado con goteo ocasional.
IV	Junta húmeda pero sin agua libre.	Relleno que muestra señales de lavado, flujo de agua continuo (estimar el caudal en l/min.)
V	Junta con rezume, ocasionalmente goteo pero sin flujo continuo.	Relleno localmente lavado, flujo considerable según canales preferentes (estimar caudal y presión.)
VI	Junta con flujo continuo de agua (estimar el caudal en l/min. y la presión).	Rellenos completamente lavados, presiones de agua elevadas.

Tabla A.4.-Descripción de las filtraciones de agua en discontinuidades con relleno y sin relleno.

Tamaño de los bloques

El tamaño del bloque es un indicador del comportamiento del macizo rocoso. El número de familias, la persistencia, el espaciamiento y la orientación determina la forma de los bloques resultantes.

Las propiedades combinadas del tamaño de los bloques e interconexión entre sí, determinan el esfuerzo cortante y el comportamiento mecánico del macizo rocoso bajo condiciones de esfuerzos.

El tamaño de los bloques puede ser descrito por los términos de dimensión, promedio de los bloques típicos (Índice del tamaño de bloque I_b) o por el número total de juntas que se interceptan por unidad de volumen del macizo rocoso (Índice volumétrico de juntas J_r).

I_b .- El propósito de este término es presentar el porcentaje de las dimensiones de los bloques típicos.

$$I_b = (S_1 + S_2 + S_3) / 3$$

Donde:

S_1, S_2, S_3 = Espaciamiento de las familias de discontinuidades.

J_r .- Este término es definido como la suma del número de juntas por metro, por cada familia de juntas que se presente.

El número de juntas de cada familia debe ser contado a lo largo de una línea perpendicular de 5 o 10 m (para expresar los resultados como número de juntas por metro).

$$J_r = \text{no. juntas de cada familia/unidad de medición (5 o 10 m).}$$

Los valores obtenidos de J_r se describen en términos correspondientes al tamaño de bloque (Tabla A.5):

Descripción	Jr (Juntas/m ³)
Bloques muy grandes	< 1
Bloques grandes	1-3
Bloques medianos	3-10
Bloques pequeños	10-30
Bloques muy pequeños	> 30

Tabla A.5.- Términos de los tamaños de bloques en base al valor Jr.

Las masas rocosas pueden ser descritas por adjetivos que expliquen el tamaño y la forma del bloque.

- Masivo: Pocas juntas o muy espaciadas.
- En trozos: Aproximadamente equidimensional.
- Tabular: Una dimensión considerada más pequeña que las otras dos.
- Columnar: Una dimensión considerada más grande que las otras dos.
- Irregular: Una variación muy amplia de la forma y tamaño de los bloques.
- Molida: discontinuidades muy juntas.

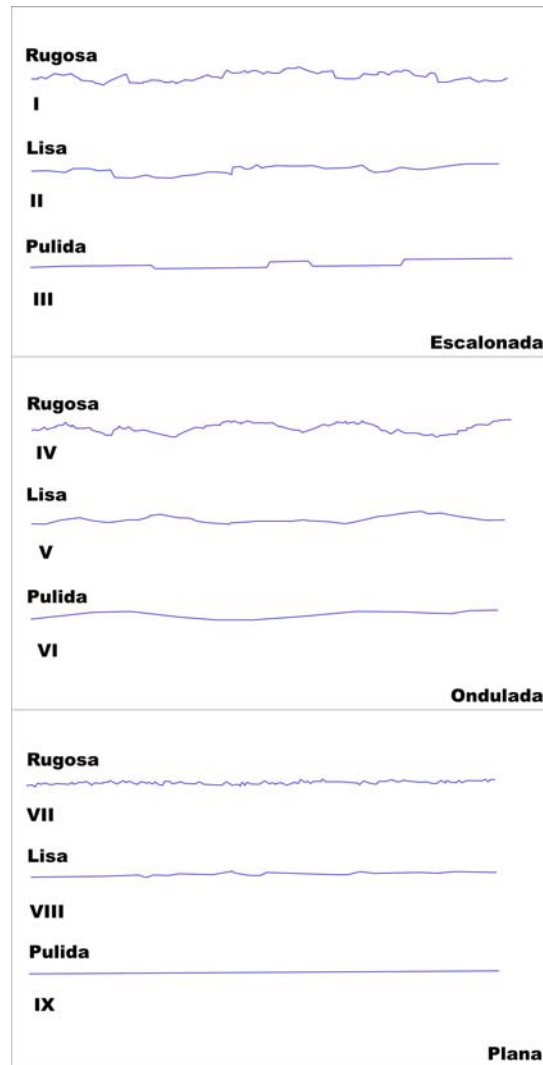


Figura A.3.- Perfiles estándar de rugosidad. Rango de 1 a 10 m. (ISRM,1981)

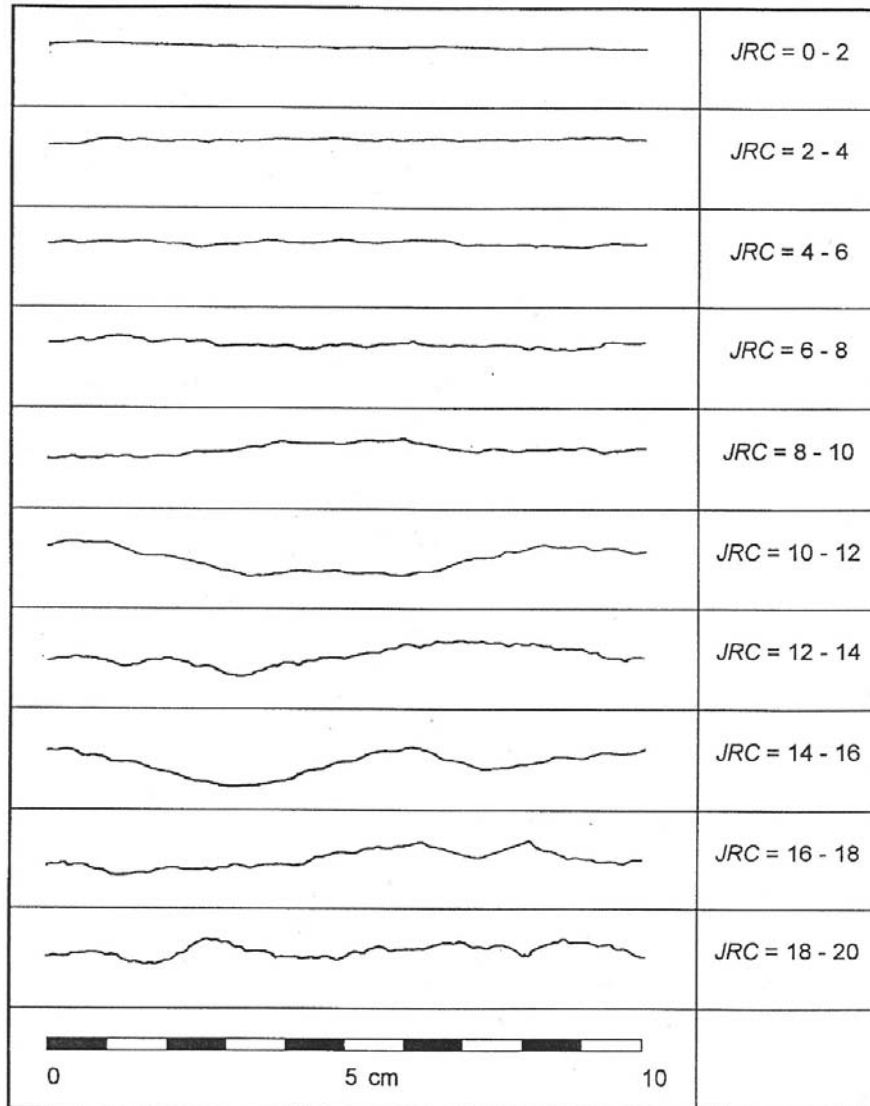


Figura A.4.- Perfiles estándar y valores de JRC. (Barton y Choubey, 1977)

Anexo 4. Pruebas de mecánica de rocas

Prueba de resistencia de carga Puntual (PLT)

La prueba PLT se realizó para determinar la resistencia a compresión simple de fragmentos de roca, geoméricamente irregulares; el procedimiento de la prueba consiste en romper una muestra entre dos puntas cónicas metálicas accionadas por una prensa portátil. (ASTM committee D-18 on soil and rock., 1995)

A partir de la carga de rotura medida con la prensa, se obtiene un índice I_s (referido a muestras de 50 mm de diámetro), el cual es correlacionado con la resistencia a compresión simple de la roca:

$$I_s = P/D^2$$

Donde:

P = Carga de rotura

D = Diámetro de la prueba o distancia entre las dos puntas

La correlación entre el índice I_s y la resistencia a compresión simple de la roca (σ_c) es:

$$\sigma_c = I_s f$$

Donde el factor f varía según el diámetro de la muestra. Para un diámetro de 50 mm, $f = 23$. Para muestras con diámetros diferentes a 50 mm, es necesario corregir el valor de I_s , con la ayuda de la gráfica propuesta por Deere y Miller en 1966 (*in*, ASTM committee D-18 on soil and rock., 1995) o dividiendo el diámetro de la muestra entre el diámetro estándar (50 mm) y multiplicarlo por 1.1.

Cabe mencionar, que los datos de compresión simple obtenidos con la prueba PLT, solo servirán para realizar la clasificación geomecánica del macizo rocoso (Clasificación RMR, por sus siglas en inglés: *Rock Mass Rating*).

Grado de fracturamiento (RQD)

Otro concepto utilizado para la clasificación de roca es: El grado de fracturamiento en términos del RQD (The Rock Quality Designation Index). El cual provee un dato cuantitativo de la calidad de la roca, en base a núcleos de perforación. El RQD está definido como el porcentaje de trozos intactos mayores a 100 mm, recuperados de una perforación, entre el total de la longitud de la misma.

Para nuestro caso que no se realizó perforación. El RQD se estimó en base a la ecuación propuesta por Palmström en 1982, (*in* González de Vallejo *et al.*, 2002). Esta ecuación se calcula con la relación del número de discontinuidades y la unidad de volumen expuesta. Cabe mencionar que la ecuación solo se puede usar si las discontinuidades son visibles.

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

Donde:

J_v = Es la suma del número de juntas por unidad de longitud de todas las familias de discontinuidades, el cual es conocido como conteo volumétrico de juntas.

Prueba de resistencia a carga triaxial en muestra de roca

Este ensayo se realizó para determinar los parámetros de resistencia de la roca, que son: la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ). Representa las condiciones *in situ* bajo esfuerzos confinantes, mediante la aplicación de presión hidráulica uniforme alrededor de la muestra, donde la relación de los esfuerzos aplicados es: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$.

El ensayo permite determinar la envolvente o línea de resistencia del material rocoso ensayado, por medio de la representación gráfica (círculos de Mohr) del comportamiento del estado de esfuerzos para cada espécimen.

Los parámetros de resistencia se obtuvieron a partir de las curvas esfuerzo-deformación σ_1 - ϵ_{ax} , obteniendo así valores de la resistencia de pico, $\sigma_p = \sigma_1$, los cuales se emplearon para dibujar los correspondientes círculos de Mohr en un diagrama de esfuerzo normal-esfuerzo tangencial σ_n - τ . Para finalmente dibujar la envolvente de rotura y leer directamente los valores de c y ϕ representativos (Figura A.5).

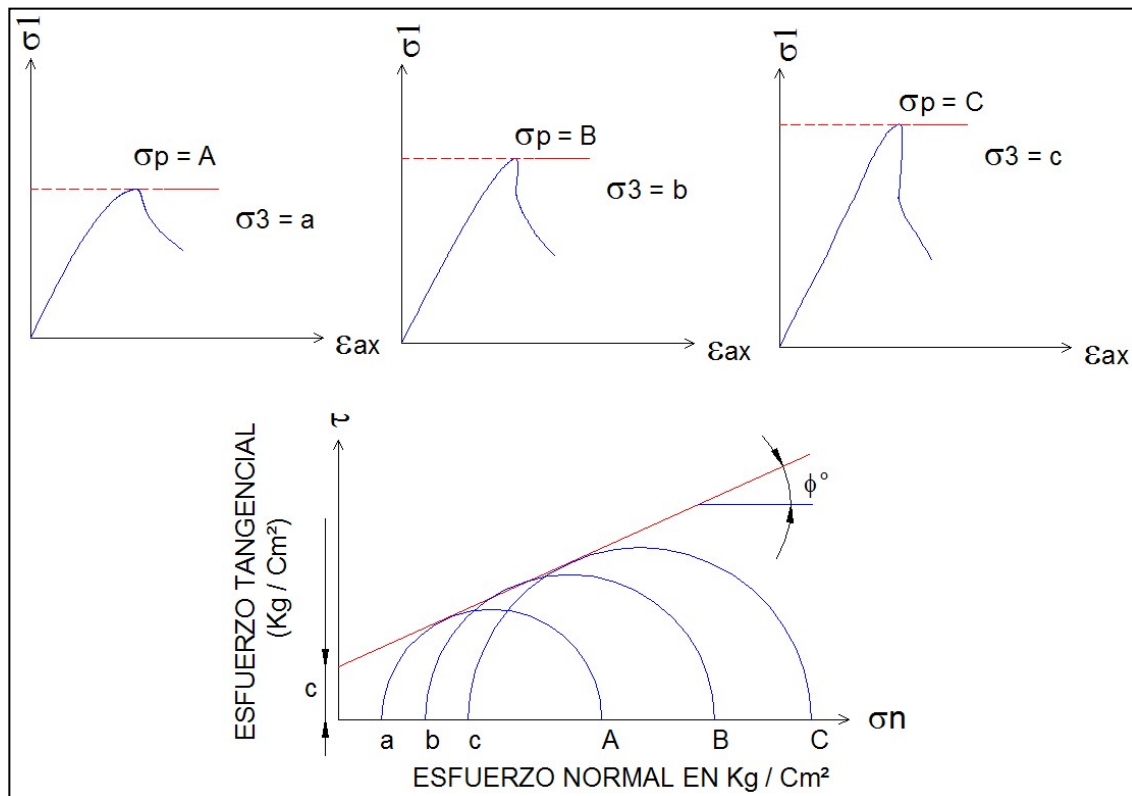


Figura A.5.- Ejemplo de cálculo de los parámetros de resistencia c y ϕ , a partir de ensayos triaxiales. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002)

Los datos que se registraron durante el ensayo fueron la carga o esfuerzo axial, el esfuerzo de confinamiento, las deformaciones axiales y horizontales mediante bandas extensométricas adheridas directamente al espécimen de roca.

Anexo 5. Clasificación geomecánica del macizo rocoso (RMR)

La clasificación RMR, desarrollada por Bieniawski en 1973 (*in* González de Vallejo *et al.*, 2002), nos permitió correlacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo y sostenimiento de taludes de una forma sencilla. Esta clasificación toma en cuenta los siguientes parámetros:

1. Resistencia a compresión simple de la roca.
2. Grado de fracturamiento en términos RQD.
3. Espaciamiento de las discontinuidades.
4. Estado de las discontinuidades.
 - Abertura
 - Rugosidad
 - Longitud
 - Relleno
 - Alteración
5. Condiciones Hidrogeológicas.
6. Orientación de las discontinuidades con respecto al talud.

La clasificación, se aplicó, dividiendo el macizo en estaciones que presentaban características geológicas más o menos uniformes, basadas en observaciones hechas en campo. En ellas se llevo a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de las discontinuidades y de la matriz rocosa.

Para la toma sistemática de los datos de campo se empleó una tabla que agrupa los seis parámetros de clasificación, la cual se adjunta en el anexos 3.

La rugosidad de las discontinuidades es representada por un valor numérico (JRC por sus siglas en Inglés: Joint roughness coefficient), el cual es estimado en base a la comparación visual de la apariencia de la superficie del plano de discontinuidad con perfiles estándares de 10 cm establecidos por Barton (1978).

El índice de calida RMR se obtiene por medio de un puntaje que resultara de comparar empíricamente las observaciones y medidas de campo con los cinco parámetros de clasificación (rangos numéricos ya establecidos) (Tabla A.6)

Una vez obtenidas las puntuaciones, se efectúa la corrección por orientación de discontinuidades (Tabla A.7), para finalmente obtener la clasificación del macizo.

Como resultado de esta clasificación, se atribuirán parámetros geotécnicos del macizo rocoso (Tabla A.8), los cuales se utilizaron para el análisis de estabilidad del macizo por diferentes tipos de rotura, condicionadas por la geometría del fracturamiento y la traza del talud.

La excesiva simplificación del método, se deberá tomar en cuenta para interpretar los datos con criterio y siempre en base al conocimiento de las propiedades y comportamiento geomecánico de los diferentes tipos de macizos.

1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	≥ 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	Compresión simple (Mpa)		
		Compresión simple	≥ 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	≤ 1
Puntuación			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90 - 100 %	75 - 90 %	50 - 75 %	25 - 50 %	≤ 25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre discontinuidades		≥ 2 m	0.6 a 2 m	0.2 a 0.6 m	0.06 a 0.2 m	≤ 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Longitud de la discontinuidad		≤ 1 m	1 a 3 m	3 a 10 m	10 a 20 m	≥ 20 m		
	Puntuación		6	4	2	1	0		
	Abertura		Nada	≤ 0.1 mm	0.1 a 1 mm	1 a 5 mm	≥ 5 mm		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Rugosidad		Muy rugosa	rugosa	lig. Rugosa	Ondulada	Suave		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
	Relleno		Ninguno	Relleno duro ≤ 5 mm	Relleno duro ≥ 5 mm	Relleno blando ≤ 5 mm	Relleno blando ≥ 5 mm		
	Puntuación		6	4	2	2	0		
	Alteración		Inalterada	lig. Alterada	Mod. Alterada	muy alterada	Descompuesta		
	Puntuación		6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	≤ 10 lt/min	10 a 25 lt/min	25 a 125 lt/min	≥ 125 lt/min		
		Relación: Presión de agua Tensión principal	0	0 a 0.1	0.1 a 0.2	0.2 a 0.5	≥ 0.5		
		Estado general	Seco	lig. Húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		

Tabla A.6- Parámetros de clasificación geomecánica RMR del macizo rocoso, propuesto por Bieniawski en 1989, (González de Vallejo et al., 2002)

Dirección y Buzamiento	Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfav.
Túneles	0	-2	-5	-10	-12
Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Tabla A.7- Parámetros de corrección por orientación de las discontinuidades. (González de Vallejo et al., 2002)

Clase	Calidad	RMR	Cohesión	Ángulo de fricción
I	Muy Buena	100-80	≥ 4 kp/cm ²	45°
II	Buena	80-61	3-4 kp/cm ²	35°-45°
III	Media	60-41	2-3 kp/cm ²	25°-35°
IV	Mala	40-21	1-2 kp/cm ²	15°-25°
V	Muy mala	≤ 20	≤ 1 kp/cm ²	≤ 15°

Tabla A.8- Calidad de macizos rocosos en relación al índice RMR. (González de Vallejo et al., 2002)

Anexo 6. Análisis de falla y sustitución numérica de los factores de seguridad

Estación 1

El análisis de falla al vuelco de la estación 1, queda definido bajo los factores principales (relación de esbeltez ($\Delta x/h$) y buzamiento del plano sobre el que descansan los bloques (β)), atribuyendo así las características de inestabilidad de la región en la que se sitúe (Ver capítulo de metodología). En la figura se presentan los valores numéricos de los factores de seguridad, los cuales se derivan de la sustitución de resultados en cada una de las fórmulas descritas en el capítulo de metodología. La sustitución de los resultados se presenta en el anexo 6.

Análisis de inestabilidad.

$\beta = 72$	$\phi_p = 25(\phi) + 24(i) = 49$
$\Delta x/h = 0.32$	$\tan \beta = 3.07$

- *Condición de inestabilidad.*

$$\beta < \phi_p \text{ y } (\Delta x/h) < \tan \beta$$

$$72^\circ < 49^\circ \text{ y } 0.32 < 3.07$$

Según las relaciones de los factores, la inestabilidad se sitúa en la región 4. Región que se considera susceptible a deslizar y volcar simultáneamente.

- *Factor de seguridad al volteo.*

Una vez analizada la inestabilidad al volteo, se calcula el factor de seguridad bajo la relación de los factores principales:

$$FS = \Sigma \text{ Momentos que resisten} / \Sigma \text{ Momentos que resisten}$$

$$F_s = (\Delta x/h) / \tan \beta$$

- *Sustitución de resultados*

$$F_s = 0.32 / 3.07 = 0.10$$

Estación 2

- *Factor de seguridad para falla en cuña.*

Una vez analizada la inestabilidad en cuña, se calcula el factor de seguridad con datos angulares obtenidos en la red estereográfica de Wulff y bajo las condiciones expuestas en el capítulo de metodología.

- *Cuña inestable*

Datos generales:

$$X = (\text{sen } \theta_{24}) / (\text{sen } \theta_{45} * \cos \theta_{2na})$$

$$Y = (\text{sen } \theta_{13})/(\text{sen } \theta_{35} * \cos \theta_{1nb})$$

$$A = [\cos \Psi_a - (\cos \Psi_b * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

$$B = [\cos \Psi_b - (\cos \Psi_a * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

Valores:

$\theta_{24} = 88^\circ$	$\theta_{35} = 82^\circ$
$\theta_{45} = 83^\circ$	$\Psi_a = 85^\circ$
$\theta_{2na} = 86^\circ$	$\Psi_b = 87^\circ$
$\theta_{1nb} = 84^\circ$	$\theta_{nanb} = 112'$
$\theta_{13} = 90^\circ$	$\Psi_i = 82^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$X = (\text{sen } 88) / (\text{sen } 83 * \cos 86) = 14.43$$

$$Y = (\text{sen } 90) / (\text{sen } 82 * \cos 84) = 9.66$$

$$A = [\cos 85 - (\cos 87 * \cos 112) / \text{sen } 82 * \text{sen}^2 112] = 0.12$$

$$B = [\cos 87 - (\cos 85 * \cos 112) / \text{sen } 82 * \text{sen}^2 112] = 0.10$$

2.-Caso donde se considera el terreno seco y cohesión 0.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = (A * \tan \phi_A) + (B * \tan \phi_B)$$

Valores:

$A = 0.12$	$\phi_A = 59^\circ$
$B = 0.10$	$\phi_B = 51^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$FS = (0.12 * \tan 59) + (0.10 * \tan 51) = 0.32$$

3.-Caso donde se considera el mismo ϕ_p , para los dos planos que delimitan la cuña.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = [\text{sen } \beta / \text{sen } (\xi/2)] [\tan \phi_p (\tan \Psi_i)]$$

Valores:

$\beta = 88^\circ$	$\Psi_i = 82^\circ$
$\xi = 70^\circ$	$\phi_p = 51^\circ$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [\text{sen}88/\text{sen}(70/2)][\tan51^\circ/\tan 82^\circ] = 0.30$$

4.-Caso donde se considera la saturación del talud y diferente ϕ_p para los dos planos.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = (A-(\gamma_w/2\gamma_r)*X)\tan\phi_A + [(B-(\gamma_w/2\gamma_r)*Y)\tan\phi_B]$$

Valores:

$\gamma_r = 2400 \text{ kg/m}^3$	$X = 14.43$
$\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$	$Y = 9.66$
$\phi_A = 59^\circ$	$A = 0.12$
$\phi_B = 51^\circ$	$B = 0.10$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [(0.12-(1000/2*2400)*14.43)\tan59] + [(0.10-(1000/2*2400)*9.66)\tan51] = 0$$

Estación 3

- *Factor de seguridad para falla en cuña.*

Una vez analizada la inestabilidad en cuña, se calcula el factor de seguridad con datos angulares obtenidos en la red estereográfica de Wulff y bajo las condiciones expuestas en el capítulo de metodología.

- *Cuña inestable 1.*

Datos generales:

$$X = (\text{sen } \theta_{24})/(\text{sen } \theta_{45} * \cos \theta_{2na})$$

$$Y = (\text{sen } \theta_{13})/(\text{sen } \theta_{35} * \cos \theta_{1nb})$$

$$A = [\cos \Psi_a - (\cos \Psi_b * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

$$B = [\cos \Psi_b - (\cos \Psi_a * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

Valores:

$\theta_{24} = 84^\circ$	$\theta_{35} = 100^\circ$
$\theta_{45} = 74^\circ$	$\Psi_a = 77^\circ$
$\theta_{2na} = 82^\circ$	$\Psi_b = 84^\circ$
$\theta_{1nb} = 30^\circ$	$\theta_{nanb} = 114^\circ$
$\theta_{13} = 160^\circ$	$\Psi_i = 73^\circ$

- *Sustitución de resultados:*

$$X = (\text{sen } 84)/(\text{sen } 74 * \cos 82) = 7.43$$

$$Y = (\text{sen } 160)/(\text{sen } 100 * \cos 30) = 0.40$$

$$A = [\cos 77 - (\cos 84 * \cos 114)/\text{sen } 73 * \text{sen}^2 114] = 0.33$$

$$B = [\cos 84 - (\cos 77 * \cos 114)/\text{sen } 73 * \text{sen}^2 114] = 0.25$$

2.-Caso donde se considera el terreno seco y cohesión 0.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J3:

Como $\phi_A = \phi_B$, **no consideraremos este caso.**

3.-Caso donde se considera el mismo ϕ_p , para los dos planos que delimitan la cuña.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J3:

$$FS = [\text{sen}\beta/\text{sen}(\xi/2)][\tan\phi_p(\tan\Psi_i)]$$

Valores:

$\beta = 68^\circ$	$\Psi_i = 73^\circ$
$\xi = 76^\circ$	$\phi_p = 59^\circ$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [\text{sen}68/\text{sen}(76/2)][\tan59^\circ/\tan73^\circ] = 0.75$$

4.-Caso donde se considera la saturación del talud e igual ϕ_p para los dos planos.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J3:

$$FS = (A - (\gamma_w/2\gamma_r)*X)\tan\phi_p + [(B - (\gamma_w/2\gamma_r)*Y)\tan\phi_p]$$

Valores:

$\gamma_r = 2400 \text{ kg/m}^3$	$X = 7.43$
$\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$	$Y = 0.40$
$\phi_A = 59^\circ$	$A = 0.33$
$\phi_B = 59^\circ$	$B = 0.25$

Sustitución:

$$FS = [(0.33 - (1000/2*2400)*7.43)\tan59] + [(0.25 - (1000/2*2400)*0.40)\tan59] = 0$$

- *Cuña inestable 2.*

Datos generales:

$$X = (\text{sen } \theta_{24})/(\text{sen } \theta_{45} * \cos \theta_{2na})$$

$$Y = (\text{sen } \theta_{13}) / (\text{sen } \theta_{35} * \cos \theta_{1nb})$$

$$A = [\cos \Psi_a - (\cos \Psi_b * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

$$B = [\cos \Psi_b - (\cos \Psi_a * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

Valores:

$\theta_{24} = 160^\circ$	$\theta_{35} = 76^\circ$
$\theta_{45} = 84^\circ$	$\Psi_a = 77^\circ$
$\theta_{2na} = 80^\circ$	$\Psi_b = 84^\circ$
$\theta_{1nb} = 16^\circ$	$\theta_{nanb} = 84^\circ$
$\theta_{13} = 88^\circ$	$\Psi_i = 76^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$X = (\text{sen } 160) / (\text{sen } 84 * \cos 80) = 1.98$$

$$Y = (\text{sen } 88) / (\text{sen } 76 * \cos 16) = 1.07$$

$$A = [\cos 77 - (\cos 84 * \cos 84) / \text{sen } 76 * \text{sen}^2 84] = 0.22$$

$$B = [\cos 84 - (\cos 77 * \cos 84) / \text{sen } 77 * \text{sen}^2 84] = 0.08$$

2.-Caso donde se considera el terreno seco y cohesión 0.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J4:

$$FS = (A * \tan \phi_A) + (B * \tan \phi_B)$$

Valores:

A= 0.22	$\phi_A = 59^\circ$
B= 0.08	$\phi_B = 67^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$FS = (0.22 * \tan 59) + (0.08 * \tan 67) = 0.55$$

3.-Caso donde se considera el mismo ϕ_p , para los dos planos que delimitan la cuña.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J4:

$$FS = [\text{sen } \beta / \text{sen } (\xi/2)] [\tan \phi_p (\tan \Psi_i)]$$

Valores:

$\beta = 66^\circ$	$\Psi_i = 76^\circ$
$\xi = 96^\circ$	$\phi_p = 59^\circ$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [\text{sen}66/\text{sen}(96/2)][\tan59^\circ/\tan 76^\circ] = 0.50$$

4.-Caso donde se considera la saturación del talud y diferente ϕ_p para los dos planos.

Cuña inestable generada por los planos J2 y J4:

$$FS = (A-(\gamma_w/2\gamma_r)*X)\tan\phi_A + [(B-(\gamma_w/2\gamma_r)*Y)\tan\phi_B]$$

Valores:

$\gamma_r = 2400 \text{ kg/m}^3$	$X = 1.98$
$\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$	$Y = 1.07$
$\phi_A = 59^\circ$	$A = 0.22$
$\phi_B = 67^\circ$	$B = 0.08$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [(0.22-(1000/2*2400)*1.98)\tan59] + [(0.08-(1000/2*2400)*1.07)\tan67] = 0$$

- *Factor de seguridad al volteo.*

Una vez analizada la inestabilidad al volteo, se calcula el factor de seguridad bajo la relación de los factores principales:

$$FS = \Sigma \text{ Momentos que resisten} / \Sigma \text{ Momentos que resisten}$$

$$Fs = (\Delta x/h) / \tan \beta$$

- *Sustitución de resultados:*

$$Fs = 0.71 / 9.5 = 0.07$$

Estación 4

- *Factor de seguridad para falla en cuña.*

Una vez analizado geoméricamente la inestabilidad en cuña, se calcula el factor de seguridad con datos angulares obtenidos con la red estereográfica de Wulff y bajo las condiciones expuestas en el capítulo de metodología.

- *Cuña inestable*

Datos generales:

$$X = (\text{sen } \theta_{24}) / (\text{sen } \theta_{45} * \cos \theta_{2na})$$

$$Y = (\text{sen } \theta_{13})/(\text{sen } \theta_{35} * \cos \theta_{1nb})$$

$$A = [\cos \Psi_a - (\cos \Psi_b * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

$$B = [\cos \Psi_b - (\cos \Psi_a * \cos \theta_{nanb}) / \text{sen } \Psi_i * \text{sen}^2 \theta_{nanb}]$$

Valores:

$\theta_{24} = 93^\circ$	$\theta_{35} = 81^\circ$
$\theta_{45} = 80^\circ$	$\Psi_a = 80^\circ$
$\theta_{2na} = 70^\circ$	$\Psi_b = 83^\circ$
$\theta_{1nb} = 88^\circ$	$\theta_{nanb} = 98^\circ$
$\theta_{13} = 88^\circ$	$\Psi_i = 77^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$X = (\text{sen } 93) / (\text{sen } 80 * \cos 70) = 2.96$$

$$Y = (\text{sen } 88) / (\text{sen } 81 * \cos 88) = 28.99$$

$$A = [\cos 80 - (\cos 83 * \cos 98) / \text{sen } 77 * \text{sen}^2 98] = 0.16$$

$$B = [\cos 83 - (\cos 80 * \cos 98) / \text{sen } 77 * \text{sen}^2 98] = 0.096$$

2.-Caso donde se considera el terreno seco y cohesión 0.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = (A * \tan \phi_A) + (B * \tan \phi_B)$$

Valores:

$A = 0.16$	$\phi_A = 57^\circ$
$B = 0.096$	$\phi_B = 49^\circ$

· *Sustitución de resultados:*

$$FS = (0.16 * \tan 57) + (0.096 * \tan 49) = 0.35$$

3.-Caso donde se considera el mismo ϕ_p , para los dos planos que delimitan la cuña.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = [\text{sen } \beta / \text{sen } (\xi/2)] [\tan \phi_p (\tan \Psi_i)]$$

Valores:

$\beta = 64^\circ$	$\Psi_i = 77^\circ$
$\xi = 82^\circ$	$\phi_p = 49^\circ$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [\text{sen}64/\text{sen}(82/2)][\tan49^\circ/\tan77^\circ] = 0.89$$

4.-Caso donde se considera la saturación del talud y diferente ϕ_p para los dos planos.

Cuña inestable generada por los planos J1 y J4:

$$FS = (A - (\gamma_w/2\gamma_r) * X) \tan\phi_A + [(B - (\gamma_w/2\gamma_r) * Y) \tan\phi_B]$$

Valores:

$\gamma_r = 2400 \text{ kg/m}^3$	$X = 2.96$
$\gamma_w = 1000 \text{ kg/m}^3$	$Y = 28.99$
$\phi_A = 57^\circ$	$A = 0.16$
$\phi_B = 49^\circ$	$B = 0.096$

- *Sustitución de resultados:*

$$FS = [(0.16 - (1000/2 * 2400) * 2.96) \tan 57] + [(0.096 - (1000/2 * 2400) * 28.99) \tan 49] = 0$$

- *Factor de seguridad al volteo.*

Una vez analizada la inestabilidad al volteo, se calcula el factor de seguridad bajo la relación de los factores principales:

$$FS = \Sigma \text{ Momentos que resisten} / \Sigma \text{ Momentos que resisten}$$

$$Fs = (\Delta x/h) / \tan \beta$$

- *Sustitución de resultados:*

$$Fs = 2 / 5.67 = 0.35$$