



## RESUMEN

La presente investigación analiza la estabilidad existente en el Cerro Shishio ubicado en el sector de La Josefina por medio de técnicas numéricas. El deslizamiento del cerro Shishio provocado por el desfogue de las aguas represadas por el deslizamiento del cerro Tamuga, se originó en el material de la Formación Tarqui, el mismo que se deslizó sobre una roca intrusiva muy alterada. En la actualidad se puede observar el material deslizado acumulado al pie del talud, que ahora sirve de soporte en la base, a esto se suma la presencia de material antrópico producto de la explotación minera que debe ser totalmente prohibida.

Se realizó un análisis inverso para determinar los parámetros geomecánicos de los materiales al momento del fallo, ya que se conoce la superficie de falla y mediante el informe geofísico la composición del talud en cinco capas. Empleando el análisis de sensibilidad y de probabilidad se establecieron los nuevos parámetros a utilizarse en el análisis de estabilidad del talud en las condiciones actuales.

Se asume que los materiales obedecen al criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb. El análisis de estabilidad del talud se lo realiza mediante los métodos de equilibrio límite y tenso-deformacionales. En ambos métodos se llevó a cabo el análisis en condiciones estáticas y pseudo-estáticas. En el primero se empleó los métodos de Bishop y GLE/Morgenstern-Price y se llevó a cabo el mapa de seguridad de las superficies de falla. En el segundo método se empleó de los elementos finitos con la técnica de reducción del esfuerzo cortante.

### Palabras Claves:

Mohr-Coulomb, Equilibrio Límite, Tenso-deformacionales, GLE/Morgenstern-Price.



## CONTENIDO

<b>CAPITULO I: INTRODUCCION.....</b>	<b>8</b>
1.1 JUSTIFICACION .....	8
1.2 UBICACION.....	8
1.3 OBJETIVOS .....	9
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	9
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	10
1.4 METODOLOGIA .....	10
1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	10
 <b>CAPITULO II: ESTUDIO DIAGNOSTICO DE LA ZONA.....</b>	 <b>12</b>
2.1 INTRODUCCION .....	12
2.2 TOPOGRAFIA .....	12
2.3 GEOLOGIA REGIONAL .....	12
2.3.1 GEOMORFOLOGIA REGIONAL .....	12
2.3.2 LITOLOGIA .....	15
2.3.2 LITOLOGIA .....	15
2.3.2.1 UNIDAD MAGUAZO.....	15
2.3.2.2 FORMACION YUNGUILLA .....	15
2.3.2.3 FORMACION BIBLIAN .....	16
2.3.2.4 FORMACION TARQUI .....	16
2.3.2.5 TERRAZA ALUVIAL .....	16
2.3.2.6 DEPOSITOS COLUVIALES .....	16
2.3.2.7 DEPOSITOS ALUVIALES .....	17
2.3.2.8 INTRUSIVOS.....	17
2.3.3 TECTONICA .....	17
2.3.4 HIDROGEOLOGICA .....	17
2.3.5 RIESGO SISMICO .....	18
2.4 GEOLOGIA LOCAL .....	18
2.4.1 LITOLOGIA.....	18
2.4.1.1 INTRUSIVOS.....	18
2.4.1.2 FORMACION TARQUI .....	19
2.4.1.3 DEPOSITOS COLUVIALES .....	21
2.4.1.4 DEPOSITOS ALUVIALES .....	22
2.4.1.5 MATERIA DE DERRUMBES.....	22
2.4.1.6 MATERIAL DE EXTRACCION DE CANTERA .....	23
2.4.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL .....	24
2.4.3 GEOMORFOLOGIA LOCAL .....	27
2.5 PROSPECCION GEOFISICA.....	27
2.5.1 SISMICA DE REFRACCION .....	27



2.5.2 RESISTIVIDAD ELECTRICA .....	30
2.5.3 DETERMINACION DE LOS MODULOS ELASTICOS DINAMICOS .....	30
2.6 CALICATAS A CIELO ABIERTO.....	32
<b>CAPITULO III: CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO .....</b>	<b>39</b>
3.1 INTRODUCCION.....	39
3.2 CARACTERIZACION DEL MACIZO DURO .....	39
3.3 CLASIFICACION GEOMECANICA .....	41
3.4 CRITERIO DE ROTURA .....	57
3.4.1 CRITERIO DE ROTURA MOHR-COULOMB.....	58
3.5 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DE RESISTENCIA.....	59
3.6 FACTOR SISMICO.....	60
<b>CAPITULO IV: ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD.....</b>	<b>65</b>
4.1 INTRODUCCION .....	65
4.2 GEOMETRIA DEL MODELO .....	65
4.3 METODO DEL EQUILIBRIO LIMITE.....	66
4.3.1 SUPERFICIES CIRCULARES DEL DESLIZAMIENTO .....	67
4.3.2 ANALISIS DE PROBABILIDADES .....	74
4.3.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD .....	75
4.3.4 CONDICIONES DE ANALISIS DEL MODELO.....	75
4.3.5 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO ANTES DEL DESLIZAMIENTO ....	76
4.3.6 ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO EN CONDICIONES ACTUALES ...	83
4.4 METODO TENSO-DEFORMACIONAL.....	88
4.4.1 METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....	88
4.4.2 CONDICIONES DE CONTORNO .....	89
4.4.3 METODO DE LA REDUCCION DE LA RESISTENCIA A CORTANTE (SSR) ....	91
4.4.4 APLICACIÓN DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	91
4.4.5 CRITERIO DE FALLA DE MOHR-COULOMB.....	91
4.4.6 RESULTADOS DE LA MODELACION MEDIANTE EL CRITERIO DE MOHR-COULOMB .....	97
4.5 COMPARACION DE RESULTADOS.....	98
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>101</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	101
5.2 RECOMENDACIONES .....	102
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>103</b>



## **ANEXOS**

ANEXO A: PLANO TOPOGRÁFICO Y PERFILES EN PLANTA.

ANEXO B: MAPA GEOLÓGICO REGIONAL, Y PERFILES.

ANEXO C: MAPA DE UBICACIÓN DE LINEAS SISMICAS Y SONDEOS  
ELECTRICOS VERTICALES.

ANEXO D: MAPA DE UBICACIÓN DE CALICATAS.

ANEXO E: ENSAYOS DE LABORATORIO.

ANEXO F: ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES INICIALES MEDIANTE  
EL METODO DEL EQUILIBRIO LÍMITE.

ANEXO G: ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE  
EL METODO DEL EQUILIBRIO LÍMITE.

ANEXO H: ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE  
EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.





UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**MAESTRIA EN GEOLOGIA APLICADA Y GEOTECNIA**

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO MEDIANTE EL EMPLEO DE  
TECNICAS NUMERICAS**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGISTER EN GEOLOGÍA  
APLICADA Y GEOTECNIA**

**AUTORA:**

ING. CRISTINA VINTIMILLA A.

**DIRECTOR:**

ING. JAIME BOJORQUE, PHD

**CUENCA - ECUADOR**

**AGOSTO 2011**



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **DEDICATORIA**

Con mucho cariño dedico este trabajo a Dios por la protección que me brinda y a mi familia por su incondicional apoyo.



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco de manera muy especial al Ing. Jaime Bojorque por su apoyo y el asesoramiento técnico que ha sabido brindarme. Agradezco también a mi familia por ser el soporte que me ha guiado hacia la meta propuesta.



## **ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO MEDIANTE EL EMPLEO DE TECNICAS NUMERICAS**

### **CAPITULO I. INTRODUCCION**

#### **1.1 Justificación**

En las últimas dos décadas el problema de estabilidad de los cerros en el sector de La Josefina se ha ido acentuando, ya sea por la indiscriminada explotación de los materiales o por la activación de fallas geológicas, que específicamente en estos casos se vieron afectadas por el desfogue del dique que se formó en el sector de La Josefina en marzo de 1993.

Estas zonas montañosas son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos, debido a que se reúnen cinco elementos para su ocurrencia, como son: topografía, sismicidad, geología, meteorización y lluvias intensas. Para realizar el Análisis de Estabilidad se debe comenzar con un exhaustivo estudio de las características topográficas, geológicas, geotécnicas, hidrológicas, etc. del cerro, para determinar cuáles son las condiciones más críticas en las que encuentran o a las que van a estar sometido.

La importancia de la realización de este estudio radica en que la investigación proporciona plataformas metódicas para la correcta ejecución del análisis de estabilidad que por consiguiente nos llevará a determinar las medidas de mitigación adecuadas para cada caso. La información que se obtenga en el desarrollo de este estudio, dará las pautas tanto a los habitantes del sector como a las instituciones responsables del manejo de la cuenca del Río Paute (CG Paute).

Esta investigación brinda las herramientas básicas para poder tomar acciones preventivas o de emergencia para evitar que se repita un evento tan catastrófico como fue el deslizamiento del cerro Tamuga.

#### **1.2 Ubicación**

La zona en estudio se encuentra ubicada al sur de la República del Ecuador, al noreste de la provincia del Azuay, a unos 20km de la ciudad de Cuenca, a lo largo del encañonamiento del río Paute. Se encuentra encuadrada dentro de las coordenadas: 738.800E, 9°685.200N; 739.700E, 9°685.200N; 738.600E, 9°684.200N; 739.700E, 9°684.200N. En la figura N°1.1 se presenta el mapa de ubicación de la zona en estudio:



**Figura N° 1.1 Mapa de ubicación de la zona en estudio.**

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Realizar el análisis del riesgo de deslizamiento y desarrollar un modelo de estabilidad, proponiendo posibles soluciones o recomendaciones en función de las actuales



condiciones geotécnicas y geomorfológicas, empleando técnicas numéricas de punta en el estado de práctica.

### **1.3.2Objetivos Específicos**

- Realizar el estudio y diagnóstico de la zona.
- Caracterizar el macizo rocoso.
- Revisar las técnicas de punta del estado de práctica para el análisis de estabilidad del talud.
- Identificar los parámetros mecánicos utilizando los análisis de sensibilidad y de probabilidades.
- Analizar las condiciones de seguridad actuales del cerro Shishío y ponderar si existe o no la factibilidad de realizar actividades de estabilización controladas.

### **1.4 Metodología**

La metodología con la que se llevó a cabo el desarrollo de esta tesis es la siguiente:

- Análisis de la geología y la caracterización del macizo rocoso.
- Obtención de la geometría del modelo a partir de la topografía, de la geología y de la prospección geofísica.
- Se obtienen los parámetros geomecánicos de los materiales.
- Se realiza los análisis de sensibilidad y probabilidades mediante el método del equilibrio límite. Estos dos métodos permiten la realización de una validación cruzada.
- Análisis de las condiciones actuales del talud realizando una validación cruzada empleando los métodos de equilibrio límite y de los elementos finitos.

### **1.5 Estructura de la Tesis**

Este trabajo de tesis está compuesto por cinco capítulos, el Capítulo 1 contempla los objetivos generales y específicos y la ubicación de la zona en estudio. En el Capítulo 2 se analizan los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, de tectónica, además se analiza los resultados del informe geofísico y se realiza la exploración del suelo mediante la ejecución de calicatas a cielo abierto.

La caracterización del macizo rocoso se desarrolla en el Capítulo 3, mediante la clasificación de Bieniawski. También se determinan los parámetros geomecánicos de los diferentes materiales que conforman el talud y los factores sísmicos a emplearse en la zona.



En el Capítulo 4 se realiza el análisis de estabilidad del talud mediante los métodos de equilibrio límite y tenso-deformacionales, el primero se lo lleva a cabo empleando el método de Bishop y GLE/Morgenstern-Price, y el segundo mediante el método de los elementos finitos con la técnica de reducción del esfuerzo cortante. Posteriormente se realiza el análisis comparativo de los resultados.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas del análisis y sus respectivas recomendaciones.



## **CAPITULO II. ESTUDIO Y DIAGNOSTICO DE LA ZONA**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se analizarán todos los aspectos esenciales de la Geología de la zona en estudio, así como su Geomorfología, Litología y Estratigrafía. También se tratará sobre la Tectónica del sector, Hidrogeología y Geología Estructural. Para comenzar con el estudio geotectónico se recurre al levantamiento topográfico del Cerro Shishío.

### **2.2 Topografía**

Se realizó el levantamiento topográfico del Cerro Shishío, con puntos de equidistancia para curvas de nivel cada metro, mediante un contrato con la Universidad de Cuenca.

A través de los planos topográficos, se puede conocer pendientes, accidentes geográficos, presencia de cambios de pendiente del terreno, entre otros detalles que se analizarán.

Los detalles con los que consta cada levantamiento son:

- Determinación del Norte con precisión.
- Puntos representativos de redes de apoyo horizontal y vertical.
- Determinación de las coordenadas y cotas exactas en las estaciones de la poligonal.

El plano topográfico y el de la ubicación de las secciones transversales vistas en planta, se presenta en el Anexo A.

### **2.3 Geología Regional**

Tomando como referencia bibliográfica [1] y [2], se realizó una descripción general de la geología regional.

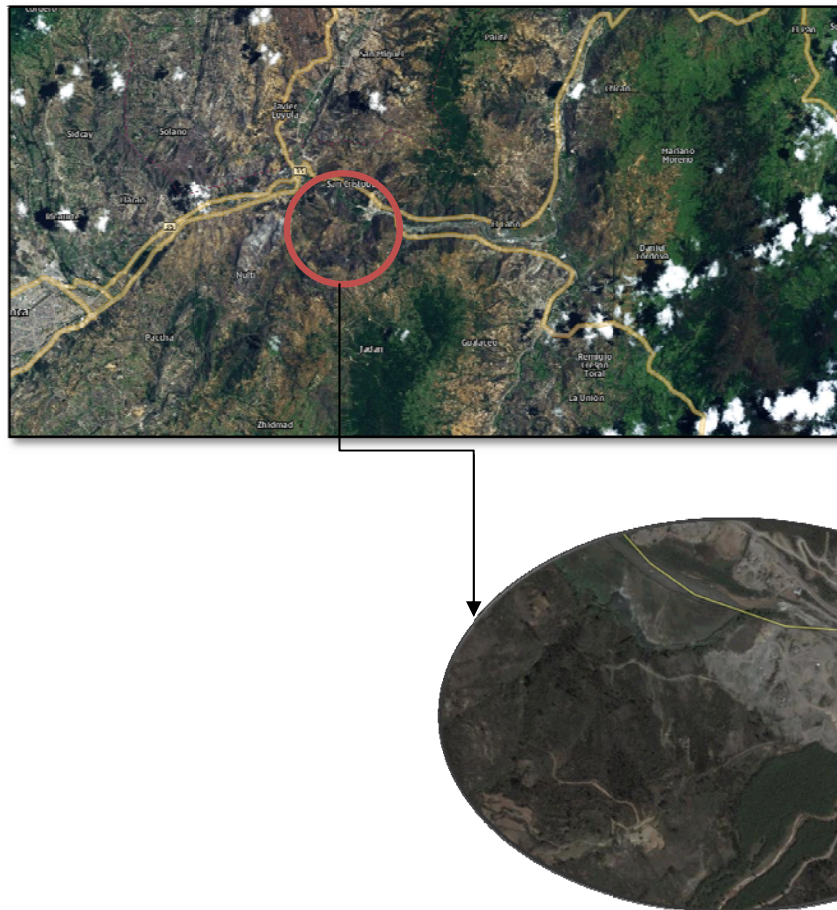
#### **2.3.1 Geomorfología Regional**

Regionalmente la zona en estudio se encuentra dentro de la depresión interandina que forman las cordilleras Occidental y Oriental, específicamente se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Real, existe un predominio de pendientes montañosas a escarpadas en las márgenes del río Paute que varía desde 27 a 100%.





En general, el relieve de la zona es colinado, alto, moderadamente disectado, con pendientes fuertes (ver foto N°1 Fotografía Satelital de la zona en estudio), que se desarrollan sobre materiales metamórficos de bajo grado, piroclásticos e intrusivos.



**Foto N° 1 Fotografía satelital de la zona en estudio.**

Se encuentra también formas de denudación como son los coluviones, coluvio-aluviales, conos de deyección, y formas de colmatación como valles y terrazas aluviales.

Analizando la fotografía aérea de la zona, se observa que ya han existido deslizamientos en épocas pasadas (ver fotos N° 2 Fotografía aérea y foto N° 3 Deslizamiento antiguo del cerro Shishío), que dieron como resultado la formación de coluviones y coluvio-aluviales que se localizaron al pie del cerro. Aparentemente estos deslizamientos se encuentran estabilizados, pero con cualquier factor externo como



lluvias excesivas y una mala utilización del suelo, pierden soporte en la parte baja, lo cual generaría su desprendimiento.

Al pie del cerro Shishío la geomorfología del terreno es plana y afloran depósitos aluviales y antrópicos.



**Foto N° 2**

Fotografía aérea del deslizamiento en el cerro Shishio [1].

Escarpe deslizamiento reciente

— Escarpa deslizamiento antiguo

— Alineaciones

— Río



**Foto N° 3**

Deslizamiento antiguo en el cerro Shishio.

### 2.3.2 Litología

Regionalmente aflora la Unidad Maguazo, Formación Yunguilla, Formación Biblián, Formación Tarqui, Terraza Aluvial, Depósitos Coluviales, Depósitos Aluviales, Intrusivos, su litología se describe desde la más antigua hasta la más reciente. En el Anexo B se presenta el mapa geológico regional [1].

#### 2.3.2.1 Unidad Maguazo(Mesozoico)

Esta unidad está compuesta por rocas metamórficas de bajo grado, tales como filitas negras a grises, micaesquistos, pizarras y cuarcitas intensamente plegadas, producto del metamorfismo de rocas volcánicas y volcanodetritos. Se presentan diaclasadas y falladas. Afloran en los cortes del río Paute [2].

Su potencia está estimada en más de 20.000m según la hoja geológica de Azogues.

#### 2.3.2.2 Formación Yunguilla (Cretáceo Superior - Maestrichtiense)

Aflora al oeste de la zona en estudio. Según [2], litológicamente la Formación Yunguilla es una "secuencia con predominancia de lutitas oscuras a negras físlas y argilitas también oscuras y compactas generalmente silicificadas y bien estratificadas; argilitas calcáreas y calizas delgadas localmente silicificadas y abundante microfauna, así como lavas y volcanoclastos." Su espesor se estima entre 800 y 1500m [3].



### **2.3.2.3 Formación Biblián (Mioceno Medio)**

La Formación Biblián presenta una litología variada. Basándose en el informe [2] se define a esta formación como una “secuencia sedimentaria clástica, con una alternancia de argilitas, limolitas rojizas interestratificadas con areniscas tobáceas de grano fino a grueso y conglomerados con cantos mal sorteados y subangulares de la Fm. Yunguilla.”. El color general de esta unidad es rojo púrpura. Las arenas de color amarillento son con frecuencia tobáceas y micáceas, pero la gran mayoría contiene abundante cantidades de granos minerales oscuros, fragmentos de roca y feldespatos intemperizados. El tamaño de los clastos es muy variado y se encuentran compuestos por pedernal negro, lutitas negras de Yunguilla, cuarzo lechoso y una gran variedad de rocas ígneas. Esta formación excede los 1000m de potencia.

### **2.3.2.4 Formación Tarqui (Cuaternario)**

En esta formación existe un predominio de los piroclastos, compuestos de tobas y aglomerados andesíticos. No se conoce con claridad las fuentes de emisión. Se estima que tiene un espesor de 1200m [3].

### **2.3.2.5 Terraza Aluvial (Cuaternario)**

Se encuentra conformada por potentes capas conglomeráticas de matriz areno-arcillosa, distribuidas en las márgenes del río.

### **2.3.2.6 Depósitos Coluviales (Cuaternario)**

En la bibliografía [2] se encuentra que son “depósitos de ladera y de pie de talud con materiales que han sufrido poco transporte, son muy heterogéneos dependiendo de la zona y el fenómeno inestable que les dio origen: deslizamientos, derrumbes, flujos, etc. De manera general se componen de mezclas heterogéneas de bloques y fragmentos angulares y subangulares en matriz limo arcillosa con microfragmentos.”

En esta zona se encuentran los depósitos coluviales más recientes producto del desfogue de aguas represadas por el dique que se formó en el sector de La Josefina.





### **2.3.2.7 Depósitos Aluviales(Cuaternario)**

“Está compuesto por bloques, gravas y arenas limosas en diferentes porcentajes y composición, sus formas van de redondeadas a subangulares según la dinámica y morfología del curso fluvial.” [3]

En la cola del lago remanente de La Josefina se ha depositado limos arcillosos y arenosos.

### **2.3.2.8 Intrusivos**

En la zona afloran cuerpos intrusivos que representan cámaras magmáticas emplazadas a poca profundidad y están constituidos por Granodioritas [2].

### **2.3.3 Tectónica**

Según el análisis tectónico [3], las distintas formaciones se encuentran afectadas por deformaciones, las mismas que se le atribuye a pliegues sinsedimentarios y de micro fracturación. Estas dos observaciones concuerdan y nos ayudan a definir un régimen tectónico de fallas de rumbo, con la dirección de acortamiento NNE-SSW y dirección de extensión perpendicular WNW-ESE, el acortamiento que se produce en la falla N170 – 180 implica movimientos dextrales.

### **2.3.4 Hidrogeología**

En cuanto al sistema hidrográfico de la zona, como principal representación tenemos el río Paute que corre en sentido oeste –este, se genera de la confluencia de ríos Cuenca y Burgay en el sector El Descanso. Además se encuentra también el río Jadán que corre en sentido suroeste – noreste, y sus afluentes son el río Quingeo y Gordeleg.

La reacción en los materiales a la presencia de agua tiene efectos importantes sobre la estabilidad de la zona, por una sucesión irregular de estratos permeables, impermeables y semipermeables. Es así como algunas capas permiten fácilmente el paso del agua lluvia a niveles que lo obstaculizan absorbiéndola dentro de su naturaleza mineralógica, lo que los lleva a un aumento de volumen y de peso cuyo desenlace es el movimiento del terreno. Es este último comportamiento el que caracteriza al material coluvial presente en puntos críticos pudiendo generar daños a las viviendas ubicadas en la parte superior del cerro Shishío.



### **2.3.5 Riesgo Sísmico**

Es de conocimiento general que la región austral del Ecuador se caracteriza por estar sujeta a movimientos sísmicos de intensidad considerable, por lo cual es necesario identificar las fallas activas que afecten a la zona y realizar un estudio de las deformaciones recientes, que permitan encontrar una relación entre la actividad sísmica y los movimientos neotectónicos.

El ambiente sísmico del Ecuador se le atribuye el proceso subductivo de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, generando grandes esfuerzos sobre la placa continental produciéndose el levantamiento de los Andes y la formación de diversas cuencas.

Cuando se produce el movimiento de las placas tectónicas se genera una energía que es liberada a través de las fallas.

## **2.4 Geología Local**

La superficie del deslizamiento se encuentra constituida por areniscas de la formación Tarqui, las mismas que presentan un alto grado de alteración, lo que implica una baja resistencia a la erosión y al corte.

### **2.4.1 Litología**

En la zona de estudio afloran rocas volcánicas e intrusivas, Formación Tarqui, Depósitos Aluviales, Coluviales, material de derrumbes y de extracción de cantera (Ver Anexo B). Valiéndose de la topografía, de los datos geológicos que incluye una inspección visual de los estratos que aflora en el área de estudio y del estudio geofísico se pudo obtener las secciones transversales necesarias para el estudio de la superficie de falla del deslizamiento, las cuales pueden observar en el Anexo B.

#### **2.4.1.1 Intrusivos**

Se establece que en la zona de estudio aflora un intrusivo granodiorítico (Ver foto N° 4). “La diorita se presenta menos fracturada que la roca encajante anterior (Ver foto N° 5), aunque también presenta una débil foliación. A su vez todo este conjunto fue intruído por la granodiorita que aflora en Parquiloma, ésta es de grano medio presentándose poco fracturada y muy fresca, sin recrystalización”. [2]

Los macizos de alta resistencia son de rocas ígneas intrusivas y extrusivas poco afectados por procesos de alteración hidrotermal y fracturación, en cambio macizos de



baja resistencia corresponden a rocas riolíticas y granodioríticas, que se presentan en horizontes alterados y muy fracturados hasta comportarse como material suelto.

Las condiciones morfológicas e hidrogeológicas juegan un papel importante y las condiciones externas (pluviosidad, sismicidad e intervención antrópica) como desencadenantes.



**Foto N° 4**

Intrusivo grano dioríticofracturado [1].

**Foto N° 5**

Diorita gris verdoso.



#### 2.4.1.2 Formación Tarqui

Está conformada por rocas volcánicas del Cuaternario, representadas por tobas blancas amarillentas, brechas con clastos andesíticos angulares y semiangulares cuyo tamaño varía entre 10-50cm. de diámetro. Las tobas de color blanco y amarillo,



conforman la matriz. (Ver fotos N° 6,7, y 8). Su presencia se observa en la corona del deslizamiento y en el escarpe formado por el mismo.



**Foto N° 6**

Formación Tarqui: tobas blancas amarillentas, que conforman la matriz.

**Foto N° 7**

Formación Tarqui: tobas blancas amarillentas, ubicadas en el escarpe.







**Foto N° 8**

Formación Tarqui: brechas con clastos andesíticos angulares y semiangulares [1].

#### 2.4.1.3 Depósitos Coluviales

Se observan en el pie del deslizamiento, están compuestos por tobas y bloques angulares de rocas meta basálticas, cuyo tamaño es variable (Ver foto N° 9).



**Foto N° 9**

Deposito coluvial: tobas y bloques angulares [1].



#### 2.4.1.4 Depósitos Aluviales

Los depósitos aluviales se encuentran a lo largo de la orilla del río Paute y están compuestos por arenas y clastos semi redondeados proveniente del deslizamiento de La Josefina. En el río Jadán, estos depósitos están representados por material fino, compuestos por arenas y limos con poco clasto (Ver foto N° 10).



**Foto N° 10**

Deposito aluvial generado por el deslizamiento de La Josefina.

#### 2.4.1.5 Material de Derrumbes

Está representado por una mezcla de bloques de rocas metabasálticas, dioritas grises verdosas y granodioritas, además por material de la Formación Tarqui representada por tobas blancas, amarillentas, rojizas y brechas (Ver fotos N° 11 y 12).



**Foto N° 11**

Rocas metabasálticas.

**Foto N° 12**

Fragmentos de diorita gris verdosa [1].



#### **2.4.1.6 Material de Extracción de Cantera**

Se puede observar el material producto de la extracción al pie del cerro Shishio, el cual está compuesto de acumulaciones caóticas de fragmentos de diferente tamaño de





rocas metandesíticas de color gris claro, producto de la explotación del material, que se deslizó desde La Josefina (Ver foto N° 13).



**Foto N° 13**

Material de extracción formado por rocas andesíticas.

#### **2.4.2 Geología Estructural**

Las fallas que se encuentran presentes en la zona de estudio tienen las siguientes características:

- La primera se presenta inferida a lo largo del río Paute (Ver foto N° 14). Tiene una dirección aproximada oeste-este.
- La segunda se ubica al este de la zona del cerro, a lo largo del río Jadán (Ver foto N°15), con dirección sureste – noroeste



**Foto N° 14**

Falla inferida a lo largo del rio Paute.

**Foto N° 15**

Falla a lo largo del rio Jadán [1].

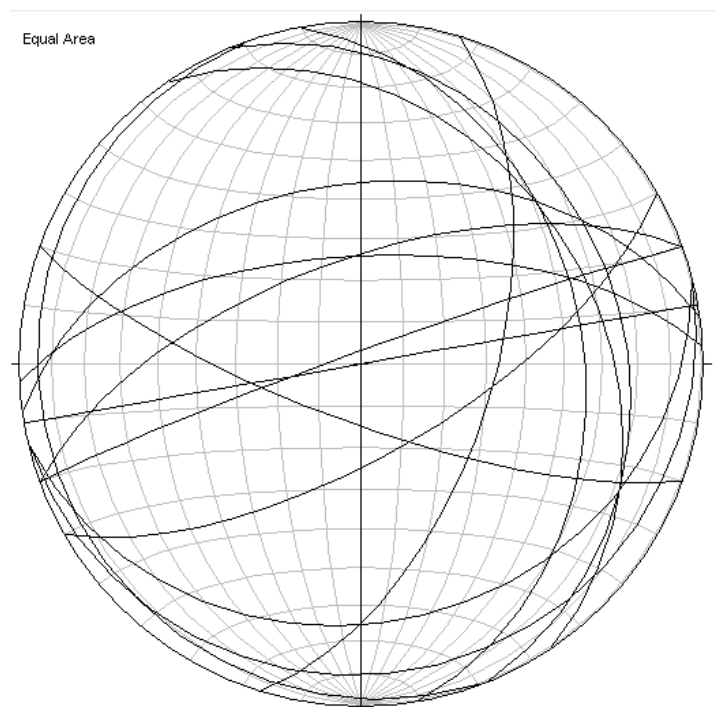


Además de estas dos fallas existen otras estructuras importantes dentro del plano de deslizamiento, como son las familias de diaclasas en el macizo rocoso que aflora en diversos sectores, esta toma de datos estructurales se representa mediante el diagrama estereográfico en la figura N°2.1 y los datos como rumbo y buzamiento se presentan en la tabla N°2.1.



Punto	Rumbo	Dir. buzamiento	Buzamiento	Descripción
P1	110	S30E	76	Corte en la corona del talud
P2	60	S5E	68	Corte en el talud
P3	17	S82E	58	Diaclasa
P4	76	S54E	25	Diaclasa
P5	37	S57E	68	Diaclasa
P6	76	S70E	10	Diaclasa
P7	80	S5E	90	Diaclasa
P8	87	N2E	64	Plano de falla del talud
P9	170	N76E	35	Diaclasa
P10	180	270	90	Diaclasa
P11	262	N2E	46	Diaclasa
P12	70	N12E	65	Plano de falla del talud
P13	70	N36W	87	Diaclasa
P14	160	S85W	6	Diaclasa
P15	158	S56W	24	Diaclasa
P16	146	N7E	31	Diaclasa

**Tabla N° 2.1 Datos estructurales.**



**Figura N° 2.1 Diagrama estereográfico.**



### **2.4.3 Geomorfología Local**

Como se mencionó en el acápite 2.3.1 existe un predominio de pendientes montañosas a escarpadas en las márgenes del río Paute que varía desde 27 a 100%.

Al sur del área de estudio en la parte alta del sector de Chocarsise presenta una topografía montañosa con pendientes pronunciadas hacia el este del río Jadán y norte del río Paute. Hacia el río Jadán existe un gran escarpe antiguo, cuya longitud es de 640 m, tiene una inclinación de  $38^\circ$  y un desnivel de 138 m. En dirección del río Paute se ha presentado el deslizamiento en estudio, que tiene un escarpe de 28 grados de inclinación y un desnivel de 166 m. Al oeste la ladera tiene una inclinación de 26 grados y un desnivel de 180 m [1].

## **2.5 Prospección Geofísica**

Con el interés de tener un mejor conocimiento de lo que ocurre en el interior de la tierra y como está conformada, a parte de las técnicas de investigación directa y de los ensayos in situ (Resistencia de la roca mediante el martillo de Schmidt), se cuenta también con la prospección geofísica. En este estudio se aplicarán los métodos de sísmica de refracción y resistividad eléctrica.

### **2.5.1 Sísmica de Refracción**

Estudia la energía que regresa a la superficie luego de sufrir refracción total en superficies límite del subsuelo.

Como se puede revisar en el informe geofísico [4], se ejecutaron 8 líneas geofísicas con una longitud total de 1.430 metros. La ubicación de las líneas se presenta en la tabla N° 2.2 y se las puede observar en el plano de ubicación de líneas sísmicas y sondeos eléctricos verticales en el Anexo C.



Nº.	Nombre del perfil	Coordenadas iniciales e	Coordenadas finales e	Coordenadas iniciales n	Coordenadas finales n	Longitud total (m)
1	LS-01	739099,000	739118,440	9684645,000	9684813,885	170
2	LS-02	739186,141	738963,100	9684663,699	9684719,849	230
3	LS-03	738975,000	738754,346	9684571,000	9684635,898	230
4	LS-04	739216,664	739036,615	9684671,638	9684818,920	230
5	LS-05	738825,910	738932,232	9684785,915	9684814,122	120
6	LS-06	738932,232	739014,451	9684814,122	9684726,537	110
7	LS-07	739270,276	739098,188	9684704,869	9684865,991	230
8	LS-08	739149,906	739134,183	9684714,249	9684813,005	110

FUENTE: INFORME GEOFISICO, ING. FABIAN VITERI

**TablaNº 2.2 Ubicación de la líneas sísmicas.**

El número de explosiones para cada base sísmica se detalla en la tabla N° 2.3:

Número	Línea	Abciscado	Geofonos	Identificación	Longitud
LS-01					0+170
1		0-005	1	Tirodirecto	Base A
2		0+085	9 y 10	Tirointermedio	Base A
3		0+175	18	Tiroderegreso	Base A
LS-02					0+230
4		0-005	1	Tirodirecto	Base A
5		0+065	7 y 8	Tirointermediodirecto	Base A
6		0+105	11 y 12	Tirointermedio	Base A
7		0+175	18 y 19	Tirointermedio de regreso	Base A
8		0+235	24	Tiro de regreso	Base A
LS-03					0+230
9		0-002	1	Tirodirecto	Base A
10		0+055	6 y 7	Tirointermediodirecto	Base A
11		0+105	11 y 12	Tirointermedio	Base A





Número	Línea	Abscisado	Geofonos	Identificación	Longitud
12		0+175	18 y 19	Tiointermedio de regreso	Base A
13		0+235	24	Tiro de regreso	Base A
LS-04					0+230
14		0-005	1	Tiroadirecto	Base A
15		0+055	6 y 7	Tiointermedio	Base A
16		0+115	12 y 13	Tiointermedio	Base A
17		0+175	18 y 19	Tiointermedio de regreso	Base A
18		0+235	24	Tiro de regreso	Base A
LS-05					0+120
19		0-005	1	Tiroadirecto	Base A
20		0+055	6 y 7	Tiointermedio	Base A
21		0+115	12	Tiro de regreso	Base A
LS-06					0+110
22		0+115	13	Tiroadirecto	Base A
23		0+175	18 y 19	Tiointermedio	Base A
24		0+235	24	Tiro de regreso	Base A
LS-07					0+230
25		0-005	1	Tiroadirecto	Base A
26		0+055	6 y 7	Tiointermedio	Base A
27		0+115	12 y 13	Tiointermedio	Base A
28		0+175	18 y 19	Tiointermedio de regreso	Base A
29		0+235	24	Tiro de regreso	Base A
LS-08					0+110
30		0-005	1	Tiroadirecto	Base A
31		0+055	6 y 7	Tiointermedio	Base A
32		0+115	12	Tiro de regreso	Base A

FUENTE: INFORME GEOFISICO, ING. FABIAN VITERI

**Tabla N° 2.3 Número de explosiones.**

Con estos datos se construyeron la DROMOCRONAS o diagramas “Distancia-Tiempo”, con lo cual se conoce las velocidades longitudinales de las capas y así determinar los espesores y geometría de las diferentes fronteras sísmicas (el resumen se presenta en la tabla N° 2.4) [4].



Capa	Velocidad Sísmica (Vp) (m/s)	Resistividad eléctrica (Ω-m)	Espesor (m)
Superficial	200 a 280	40 a 342	$0,00 < E < 7,40$
Segunda	530 a 770	65 a 302	$0,00 < E < 28,00$
Tercera	1.200 a 1.700	26 a 594	$5,10 < E < 50,50$
Cuarta	2.200 a 2.600	20 a 51	$1,80 < E < 34,50$
Quinta	3.000 a 4.300	78 a 32106	Desconocido

FUENTE: INFORME GEOFISICO, ING. FABIAN VITERI

**Tabla N° 2.4 Velocidades longitudinales y espesores de cada capa.**

### 2.5.2 Resistividad Eléctrica

Estudia la respuesta del terreno al propagarse a través de él corrientes eléctricas continuas.

Se llevaron a cabo en total 5 Sondeos Eléctricos Verticales con el dispositivo Schlumberger, sobre una longitud de 1.500 metros, cuya localización puede ser apreciada en la tabla N° 2.5 y se observa en el Anexo C en el plano de ubicación de líneas sísmicas y sondeos eléctricos verticales.

N°.	CODIGO	LONGITUD AB (m)	UBICACIÓN	COTA
1	SEV-01	300,00	0+110 de LS-03	2.495,20
2	SEV-02	300,00	0+110 de LS-04	2.350,40
3	SEV-03	300,00	0+150 de LS-07	2.339,80
4	SEV-04	300,00	0+050 de LS-07	2.332,80
5	SEV-05	300,00	0+100 de LS-07	2.332,20

FUENTE: INFORME GEOFISICO, ING. FABIAN VITERI

**Tabla N° 2.5 Ubicación de los sondeos verticales.**

### 2.5.3 Determinación de los Módulos Elásticos Dinámicos

La relación entre los valores de la velocidades Vp y Vs (velocidad de onda de compresión o longitudinal y velocidad de onda de corte o transversal) nos permite determinar los módulos elásticos dinámicos, E (módulo de Young),  $\nu$  (coeficiente de Poisson) y  $\mu$  (módulo de Rigidez). La velocidad de onda de corte es aproximadamente dos tercios de la velocidad de onda longitudinal. Los valores de los módulos elásticos dinámicos se obtienen a partir de las siguientes fórmulas [5] y sus valores se presentan en la tabla 2.6:



$$E_d = 2\rho V_s^2(1 + \nu_d)$$

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left[\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right]}$$

Donde:

$E_d$  = Módulo de Young dinámico

$\nu_d$  = Coeficiente de Poisson dinámico

$V_p$  = Velocidad de onda longitudinal

$V_s$  = Velocidad de onda transversal

<b>Estimación de los Módulos Elásticos Dinámicos de acuerdo a las líneas sísmicas</b>				
<b>Capa</b>	<b><math>V_p</math></b>	<b><math>V_s</math></b>	<b><math>E_d</math> (Mpa)</b>	<b><math>\nu_d</math></b>
Superficial	200	131	93	0.1228
Segunda	530	349	653	0.1184
Tercera	1200	792	3355	0.1140
Cuarta	2200	1457	11304	0.1094
Quinta	3000	2000	21120	0.1000

**Tabla 2.6 Módulos Elásticos Dinámicos.**

Los valores de los módulos elásticos dinámicos así obtenidos pueden tener grandes variaciones debido a que su obtención se realiza por métodos indirectos y además se tiene un amplio rango en el cual varía la velocidad longitudinal de cada capa.

Existe una relación entre el módulo de elasticidad estático y el dinámico, que va desde 1.5 a 2.5 veces el primero del segundo, por lo tanto se asumirá que  $E = E_d/2.5$ , obteniendo así la tabla N° 2.7.




Estimación de los Módulos Elásticos Estáticos de los diferentes materiales que conforman el talud		
Capa	E (Mpa)	$\nu$
Superficial	37	0.1228
Segunda	261	0.1184
Tercera	1342	0.1140
Cuarta	4522	0.1094
Quinta	8448	0.1000




**Tabla 2.7 Módulos Elásticos Estáticos.**

## 2.6 Calicatas a cielo abierto


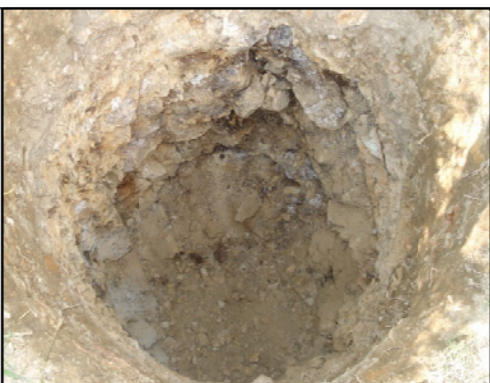

Se llevaron a cabo 12 calicatas a cielo abierto cuya ubicación se encuentra explícitamente el mapa de ubicación de calicatas Anexo D y sus coordenadas y fotografías se presentan en la tabla N° 2.8. Las profundidades varían desde 1.00m hasta 1.80 m., sin haberlas podido profundizar por la dificultad en la ejecución de las mismas por la presencia de roca. Hubiera sido importante realizar perforaciones en roca que permitiría determinar la estratigrafía con exactitud y a mayor profundidad, pero el factor económico fue un impedimento.

Calicata N°	Foto	Coordenada Este	Coordenada Norte
1		738.959	9'684.578






2		738.913	9'684.561
3		738.850	9'684.546
4		738.810	9'684.549



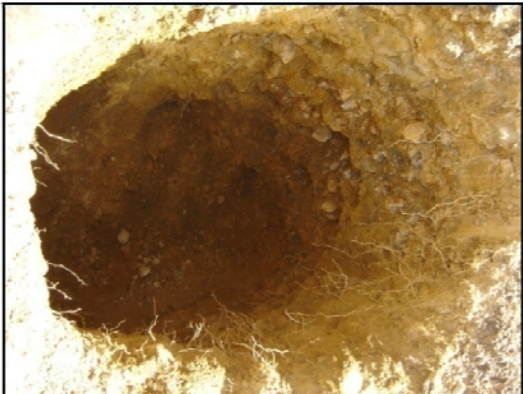

5		738.824	9'684.498
6		738.781	9'684.456
7		738.848	9'684.505





8		738.919	9'684.486
9		739.303	9'684.663
10		739.297	9'684.857



11		739.092	9'684.639
12		738.954	9'684.637

**Tabla 2.8 Coordenadas de ubicación de las calicatas.**

Los ensayos de laboratorio dan los parámetros físicos del suelo objeto de análisis. Las propiedades del suelo se pueden obtener a través de pruebas de laboratorio como:

- Contenido de humedad natural (ASTM D2216).
- Plasticidad a través de los Límites de Atterberg: límite líquido (ASTM 423-66) y límite plástico (ASTM 424-59).
- Distribución granulométrica (ASTM D422-63).

Los resultados de laboratorio se encuentran en detalle en el Anexo E y un resumen se presenta a continuación en la tabla 2.9:





POZO Nº	% PASA EL TAMIZ #200	% $\omega_{nat}$	% LL	% LP	% IP	SUCS	AASHTO	DESCRIPCION
1	1.27	5.43	NP	NP	NP	GP	A-1 (0)	Gravas pobremente gradadas
2	7.20	12.33	35.40	27.91	7.49	GM	A-2 (0)	Gravas limosas de coloración amarillenta rojiza
3	10.80	13.57	36.25	22.75	13.50	SC	A-2 (0)	Suelo areno arcilloso con gravas de color amarillento
4	10.00	8.74	37.40	25.26	12.14	GM	A-2 (0)	Gravas limosas con arena de coloración café oscuro
5	11.70	8.47	39.02	23.11	15.91	GC	A-2 (0)	Gravas arcillosas con arena de coloración gris
6	11.40	9.75	34.10	30.95	3.15	SM	A-1 (0)	Suelo areno limoso con gravas de coloración gris
7	34.40	7.48	30.50	25.22	5.28	SM	A-1 (0)	Suelo areno limoso de coloración amarillenta



8	34.10	19.57	45.25	25.65	19.60	SC	A-2 (1.80)	Suelo areno arcilloso de color negro
9	2.10	7.74	19.30	14.39	4.91	GW	A-1 (0)	Gravas bien gradadas
10	1.10	8.11	23.30	16.92	6.38	GW	A-2 (0)	Gravas bien gradadas
11	5.40	15.41	27.40	18.69	8.71	GC	A-2 (0)	Gravas arcillosas con arena de coloración amarillenta
12	10.20	18.05	44.00	26.42	17.58	SC	A-2 (0)	Suelo areno arcilloso de color habano

**Tabla 2.9 Resultado de los ensayos de laboratorio.**



### **CAPITULO III. CARACTERIZACION DEL MACIZO ROCOSO**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se abarcarán los temas sobre la caracterización geomecánica del macizo rocoso, la determinación de los parámetros geomecánicos de los diferentes materiales que intervienen en el talud y del factor sísmico a emplearse en los análisis.

La caracterización de un macizo rocoso y su comportamiento mecánico y deformacional son complejos debido a la gran diversidad de propiedades que presentan y a un elevado número de factores que pueden condicionarlos. En la mayoría de las masas rocosas podemos encontrar discontinuidades o superficie de debilidad que separan bloques de matriz rocosa, constituyendo en conjunto los macizos rocosos.

El comportamiento mecánico de un macizo rocoso es el resultado de la combinación de las características geológicas y de las condiciones hidrogeológicas y ambientales, que dan lugar a procesos de meteorización, alterando así las propiedades iniciales de las rocas y de los macizos rocosos.

Las rocas pueden ser blandas o duras, siendo la falla de las primeras a través del cuerpo de la masa rocosa y también de sus defectos estructurales. Las fallas de los macizos rocosos se pueden presentar por zonas de debilidad o de discontinuidad estructural.

#### **3.2 Caracterización del Macizo Rcoso**

Para caracterizar el macizo rocoso emplearemos los índices RQD (Rock Quality Designation) y RMR (Rock Mass Rating).

El método RMR para clasificación de macizos rocosos fue desarrollado por Bieniawski (1973, actualizado en 1989), el mismo que sirve para estimar la calidad de un macizo rocoso, cuantificando parámetros que son fáciles de medir en el campo. Estos parámetros son: resistencia a la compresión uniaxial de la roca, RQD, espaciamiento de las discontinuidades, condición de las discontinuidades, condición del agua subterránea, y orientación de las discontinuidades. Una vez obtenido este valor se puede establecer algunas propiedades geotécnicas del macizo que nos sirven para analizar la estabilidad del cerro. El índice RMR varía de 0 a 100. Para emplear este método de clasificación del macizo se debe sectorizar tramos que



representen características geológicas más o menos uniformes. Una vez realizada la toma de datos en el campo se procede a la clasificación utilizando la correlación mediante tablas (Ver tablas N° 3.1)

CLASIFICACION GEOMECHANICA RMR (Bieniawski, 1989)									
PARAMETROS DE CLASIFICACION									
1	Resistencia de la matriz rocosa (Mpa)	Ensayo de carga puntual	>10	10 - 4	4 - 2	2 - 1	Compresion Simple (Mpa)		
		Compresion Simple	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25 - 5	5 - 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	Separacion entre diaclasas		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	0.06 - 0.2 m	< 0.06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro < 5mm	Relleno duro > 5mm	Relleno blando < 5mm	Relleno blando < 5mm		
		Puntuación	6	4	2	2	0		
		Alteracion	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freatica	Caudal por 10m de tunel	Nulo	< 10 litros/min	10-25 litros/min	25-125 litros/min	> 125 litros/min		
		Relacion: Presion de agua/Tension principal mayor	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente humedo	Humedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Puntuación		15	10	7	4	0		
CORRECCION POR LA ORIENTACION DE LAS DISCONTINUIDADES									
Direccion y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
Puntuacion	Tuneles	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
CLASIFICACION									
Clase		I	II	III	IV	V			
Calidad		Muy buena	Buena	Media	Mala	Muy mala			
Puntuacion		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20			

Tabla N° 3.1 Clasificación geomecánica RMR.



CARACTERISTICAS GEOTECNICAS					
Clase	I	II	III	IV	V
Tiempo de mantenimiento y longitud	10 años con 15 m de vano	6 meses con 8 m de vano	1 semana con 5 m de vano	10 horas con 2.5 m de vano	30 minutos con 1 m de vano
Cohesion	> 4 Kg/cm <sup>2</sup>	3-4 Kg/cm <sup>2</sup>	2-3 Kg/cm <sup>2</sup>	1-2 Kg/cm <sup>2</sup>	< 1 Kg/cm <sup>2</sup>
Angulo de rozamiento	> 45 <sup>0</sup>	35 <sup>0</sup> -45 <sup>0</sup>	25 <sup>0</sup> -35 <sup>0</sup>	15 <sup>0</sup> -25 <sup>0</sup>	< 15 <sup>0</sup>
CALIDAD DE MACIZOS ROCOSOS EN RELACION AL INDICE RMR					
Clase	Calidad	Valoracion RMR	Cohesion	Angulo de rozamiento	
I	Muy Buena	100-81	> 4 kg/cm <sup>2</sup>	> 45 <sup>0</sup>	
II	Buna	80-61	3-4 kg/cm <sup>2</sup>	35 <sup>0</sup> -45 <sup>0</sup>	
III	Media	60-41	2-3 kg/cm <sup>2</sup>	25 <sup>0</sup> -35 <sup>0</sup>	
IV	Mala	40-21	1-2 kg/cm <sup>2</sup>	15 <sup>0</sup> -25 <sup>0</sup>	
v	Muy mala	< 20	< 1 kg/cm <sup>2</sup>	< 15 <sup>0</sup>	

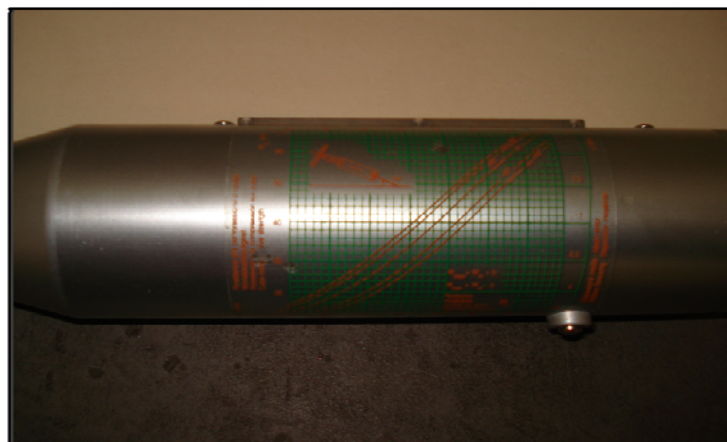
**Tabla Nº 3.1 Clasificación geomecánica RMR (continuación).**

### 3.3 Clasificación Geomecánica

#### *Resistencia de la Matriz Rocosa*

Para determinar la resistencia de la matriz rocosa se emplearon dos métodos:

*Primer método:* El martillo de Schmidt (esclerómetro), para realizar este ensayo primero se limpia la zona a ser probada, la cual debe estar libre de grietas y fisura, luego se aplica el esclerómetro sobre la roca en forma perpendicular al plano de ensayo y presionamos hasta que salte el muelle, obteniendo así el dato de rebote que se puede leer en la escala ubicada al costado del martillo. Se deben tomar al menos 10 percusiones para eliminar los 5 valores más bajos y con los datos restantes sacar un promedio, con este dato del promedio y mediante una sencilla correlación que viene en cada esclerómetro (ver foto No. 3.1) se obtiene la resistencia a la compresión simple, como se observa en la tabla Nº 3.2.



**Foto N° 3.1 Correlación que depende de la inclinación del esclerómetro.**

RESISTENCIA A LA COMPRESION SIMPLE A PARTIR DEL MARTILLO DE SCHMIDT									
FECHA:		14-ABRIL-2011	COORDENADAS:	738.804E	FECHA:		14-ABRIL-2011	COORDENADAS:	738.859E
				9'684.472N					9'684.488N
Rebote	Numeros mayores	Promedio	Resistencia a la compresion(Mpa)	Rebote	Numeros mayores	Promedio	Resistencia a la compresion(Mpa)		
45	45	44	50	35	48	45	53		
35	42			40	44				
37	46			48	44				
38	44			44	46				
28	44			44	42				
42	Observaciones:Afloramiento 1			46	Observaciones:Afloramiento 2				
46				38					
44				36					
36				26					
44				42					
FECHA:		14-ABRIL-2011	COORDENADAS:	739.051E	FECHA:		14-ABRIL-2011	COORDENADAS:	738.859E
				9'684.610N					9'684.488N
Rebote	Numeros mayores	Promedio	Resistencia a la compresion(Mpa)	Rebote	Numeros mayores	Promedio	Resistencia a la compresion(Mpa)		
30	52	48	58	18	42	43	49		
40	41			20	42				
35	46			42	42				
40	47			42	48				
52	52			42	42				
40	Observaciones:Afloramiento 3			48	Observaciones:Afloramiento 4				
41				38					
46				40					
47				42					
52				34					

FUENTE : PROPIA

**Tabla N° 3.2 Resistencia a la compresión simple (martillo de Schmidt).**



*Segundo método:* Extracción de núcleos de los taludes 1 y 2, ya que de los taludes 3 y 4 la roca se encontraba muy diaclasada no se pudo extraer núcleos, además las características de la matriz rocosa eran muy similares a la de los dos primeros taludes, estos taludes se encuentran más adelante de la página 49 a la página 52. La extracción de núcleos se realizó en el laboratorio a donde se trasladaron bloques de roca característicos de cada talud como se puede observar en las fotos N° 16, 17, 18, 19.



Foto N° 16

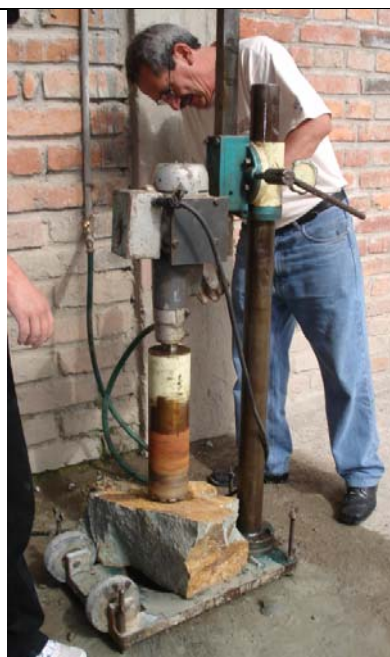


Foto N° 17





**Foto N° 18**



**Foto N° 19**

Una vez extraídas las 4 muestras, 2 de las cuales se fracturaron debido a un diaclasamiento interior de los bloques de roca (ver fotos N° 20 y 21), se procedió a uniformizarlas, esmerilando las caras a ser probadas.



**Foto N° 20**



**Foto N° 21**

Posteriormente se procede a realizar el ensayo de compresión simple para determinar la resistencia uniaxial no confinada de la roca y sus constantes elásticas





(Modulo de Young y Coeficiente de Poisson), el procedimiento de este ensayo consiste en la aplicación gradual de carga axial hasta que se produzca la rotura, previamente se mide el diámetro de la probeta para obtener el área de aplicación de la carga, durante el ensayo se va registrando la curva esfuerzo-deformación (ver fotos N° 22, 23, 24, 25).



**Foto N° 22 Probeta talud 1.**



**Foto N° 23 Probeta talud 1.**



**Foto N° 24 Probeta talud 2.**



**Foto N° 25 Probeta talud 2.**

Los datos registrados en el ensayo y las curvas esfuerzo-deformación se presentan en el Anexo E.



Luego de realizar un promedio de las muestras en el caso del talud 1 y tomando solo uno de los valores en el talud 2, debido a que no se tiene un valor confiable en el caso de la segunda muestra debido a una fisura interna que la debilitaba, se obtienen los siguientes resultados:

	<b>Resistencia a la Compresión Simple (Mpa)</b>
<b>Talud 1</b>	32.85
<b>Talud 2</b>	63.94

También mediante este ensayo se obtiene los módulos de elasticidad de las rocas de cada talud, estos módulos se presentan en la tabla N°3.3:

<b>Talud</b>	<b>Muestra</b>	<b>Módulo de elasticidad (MPa)</b>
1	1	5961.54
1	2	6296.30
2	1	11000
2	2	9032.26

**Tabla N° 3.3 Módulo de Elasticidad de las rocas.**

### ***RQD (Índice de calidad de la roca)***

El índice RQD es la relación entre la suma de las longitudes de los fragmentos de testigo mayores de 10cm y la longitud total del tramo considerado, se representa mediante la siguiente expresión:

$$RQD = \frac{\sum \text{longitud de los trozos de testigo} > 10 \text{ cm}}{\text{longitud total}} \times 100$$

Se consideran solo los fragmentos de testigo de material fresco, excluyendo aquellos que presenten algún grado de alteración importante. La medida del índice RQD se lo debe realizar en cada cambio litológico, pero se recomienda que la longitud de la maniobra no sobrepase el 1.5m, y el diámetro mínimo de los testigos deben ser de 48mm. Mediante la tabla N°3.4 se puede observar la descripción de la calidad de la roca en función del índice RQD.



RQD %	CALIDAD
< 25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy Buena

**Tabla N° 3.4 Calidad de la roca en función del índice RQD.**

Para la obtención de testigos se debe realizar el siguiente procedimiento:

- En suelos se debe realizar una descripción litológica, tamaño de grano, color, textura, grado de meteorización, consistencia y resistencia a la penetración, utilizando un penetrómetro de bolsillo.
- En rocas se debe hacer una descripción de las discontinuidades y el porcentaje de recuperación de testigos.
- Obtener el índice RQD y el  $N_{30}$ .
- Se debe tomar las fotografías de las cajas que contienen los testigos de manera que sea identificable las tablas separadoras con sus respectivas cotas, colores, texturas, fracturas y las profundidades perforadas.
- Debe registrarse la profundidad del nivel freático.

En este caso ya que no se ha podido obtener testigos de la perforación se opta por una metodología que consiste en medir la cantidad de discontinuidades en un metro cuadrado de talud. El valor se determina utilizando la formula empírica propuesta por Bieniawsky(1989) [6]:

$$RQD= 115-3.3(J_v)$$

En donde:  $J_v$  = número de discontinuidades en  $1 \text{ m}^2$ .

A continuación en la tabla N°3.5 se presenta un resumen de los resultados del RQD obtenidos mediante esta metodología:

TALUD N°	$J_v$	RQD %
1	12	49
2	20	75.4
3	15	65.5
4	34	2.8

**Tabla N° 3.5 RQD obtenido.**




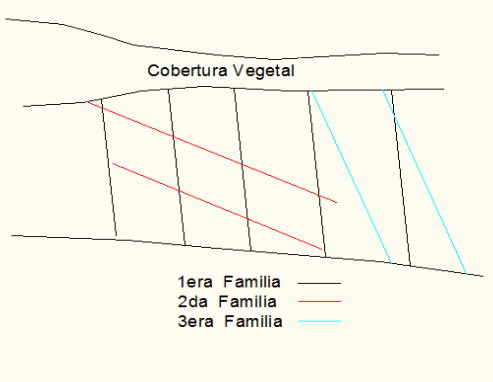
***Estado de las discontinuidades: Medición del espaciamiento, Longitud, Abertura, Rugosidad, Relleno y Alteración***

En función de los requerimientos de los datos de las tablas N°3.1 y 3.4, se procedió a tomar los datos de campo.

En las tablas N° 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9 se presentan la toma de datos de campo de las diaclasas que se observan en los afloramientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.



## Afloramiento Talud1


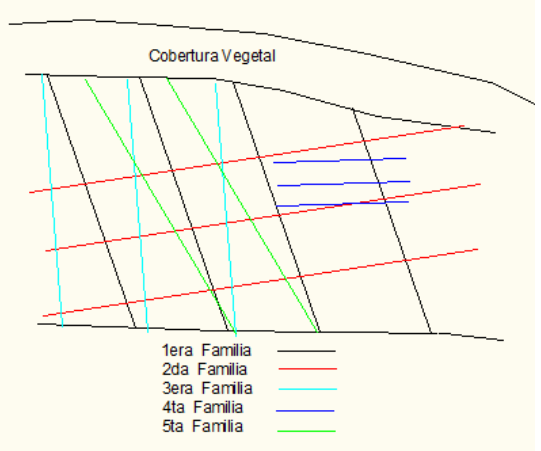
PROYECTO: ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO								
FECHA: 2-ABRIL-2011					COORDENADAS: 738.804E 9'684.472N			
FOTO:					ESQUEMA:			
								
Familia N	Separacion	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteracion	Direccion	Buzamiento
1	0.28 m	1.12 m	2 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N130	82
2	0.22 m	0.5 m	1 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N110	40
3	0.17 m	1.25m	2.5 mm	Rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N210	76
OBSERVACIONES:								

FUENTE : PROPIA

**Tabla N° 3.6 Estado de las discontinuidades del afloramiento en el talud 1.**



## Afloramiento Talud 2


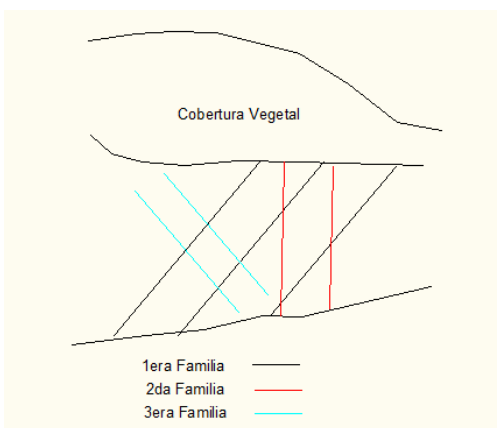
PROYECTO: ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO									
FECHA: 2-ABRIL-2011					COORDENADAS: 738.859E 9'684.488N				
FOTO:					ESQUEMA:				
									
Familia N	Separacion	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteracion	Direccion	Buzamiento	
1	0.70 m	1.33 m	5 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N98/E8S	58	
2	0.80 m	2.10 m	9 mm	Ligeramente rugosa	Blando >5mm	Moderadamente alterada	N126	25	
3	0.45 m	1.35 m	6 mm	Ligeramente rugosa	Blando >5mm	Moderadamente alterada	N120	68	
4	0.24 m	2.10 m	3 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N130	10	
5	0.48 m	3.00 m	5 mm	Rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N175	90	
OBSERVACIONES:									
FUENTE : PROPIA									

**Tabla N° 3.7 Estado de las discontinuidades del afloramiento en el talud 2.**





### Afloramiento Talud 3

PROYECTO: ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO									
FECHA: 14-ABRIL-2011					COORDENADAS: 739.051E 9'684.610N				
FOTO:					ESQUEMA:				
									
Familia N	Separacion	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteracion	Direccion	Buzamiento	
1	0.11 m	0.35 m	1 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N76	35	
2	0.13 m	0.43 m	4 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N270	90	
3	0.08 m	0.48 m	1 mm	Ligeramente rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N358	46	
OBSERVACIONES:									
FUENTE : PROPIA									

**Tabla N° 3.8 Estado de las discontinuidades del afloramiento en el talud 3.**



## Afloramiento Talud 4


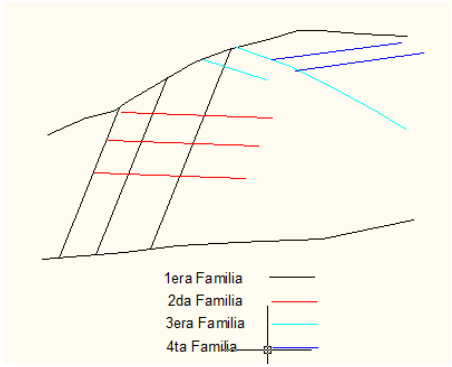
PROYECTO: ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL CERRO SHISHIO									
FECHA: 14-ABRIL-2011					COORDENADAS: 739.098E 9'684.620N				
FOTO:					ESQUEMA:				
									
Familia N	Separacion	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteracion	Direccion	Buzamiento	
1	0.64 m	2.10 m	5 mm	Rugosa	Ninguno	Moderadamente alterada	N324	87	
2	0.31 m	4.30 m	1 mm	Suave	Ninguno	Moderadamente alterada	N265	6	
3	0.21 m	2.70 m	2 mm	Rugosa	Blando <5mm	Moderadamente alterada	N236	24	
4	0.10 m	0.70 m	6 mm	Suave	Blando >5mm	Moderadamente alterada	N3	31	
OBSERVACIONES:									
FUENTE : PROPIA									

Tabla N° 3.9 Estado de las discontinuidades del afloramiento en el talud 4.



Para caracterizar el macizo rocoso se toman todos los datos de los afloramientos y se va dando una puntuación de acuerdo a lo que indica la tabla 3.1, en cada uno se considera el sistema de discontinuidades más desfavorables:

<b>Afloramiento 1</b>		<b>Puntuación</b>
Compresión Simple	32.85 MPa	4
RQD	49%	6
Separación	0.28m	10
Longitud	1.12m	4
Abertura	2mm	1
Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
Relleno	Blando < 5mm	2
Alteración	Moderadamente	3
Agua Freática	Seco	15
<b>SUBTOTAL</b>		<b>48</b>

<b>Afloramiento 1</b>	
<b>Corrección por orientación de discontinuidades</b>	
Dirección y buzamiento: Media	-25
<b>TOTAL =</b>	<b>23</b>

De acuerdo a la tabla N° 3.1 el afloramiento 1 clasifica de la siguiente manera:

<b>Afloramiento 1</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Calidad</b>	Mala
<b>Puntuación</b>	40-21

Según la tabla N° 3.1 (continuación) las características geotécnicas del macizo serían:



<b>Afloramiento 1</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Tiempo de mantenimiento y longitud</b>	10 horas con 2.5m de vano
<b>Cohesión</b>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Angulo de rozamiento</b>	15 - 25

<b>Afloramiento 2</b>		<b>Puntuación</b>
Compresión Simple	63.94	7
RQD	75.4%	17
Separación	0.48m	10
Longitud	3.00m	4
Abertura	5mm	1
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Blando<5mm	2
Alteración	Moderadamen te	3
Agua Freática	Seco	15
<b>SUBTOTAL</b>		64

<b>Afloramiento 2</b>	
<b>Corrección por orientación de discontinuidades</b>	
Dirección y buzamiento: Media	-25
<b>TOTAL =</b>	39

De acuerdo a la tabla N° 3.1 el afloramiento 2 clasifica de la siguiente manera:

<b>Afloramiento 2</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Calidad</b>	Mala
<b>Puntuación</b>	40-21

Según la tabla N° 3.1 (continuación) las características geotécnicas del macizo serían:



<b>Afloramiento 2</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Tiempo de mantenimiento y longitud</b>	10 horas con 2.5m de vano
<b>Cohesión</b>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Angulo de rozamiento</b>	15 - 25

<b>Afloramiento 3</b>		<b>Puntuación</b>
Compresión Simple	58 MPa	7
RQD	65.5	13
Separación	0.08m	10
Longitud	0.48m	6
Abertura	1mm	3
Rugosidad	Ligeramente Rugosa	3
Relleno	Blando<5mm	2
Alteración	Moderadamente	3
Agua Freática	Seco	15
<b>SUBTOTAL</b>		<b>62</b>

<b>Afloramiento 3</b>	
<b>Corrección por orientación de discontinuidades</b>	
Dirección y buzamiento: Media	-25
<b>TOTAL =</b>	<b>37</b>

De acuerdo a la tabla N° 3.1 el afloramiento 3 clasifica de la siguiente manera:



<b>Afloramiento 3</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Calidad</b>	Mala
<b>Puntuación</b>	40-21

Según la tabla N° 3.1 (continuación) las características geotécnicas del macizo serían:

<b>Afloramiento 3</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Tiempo de mantenimiento y longitud</b>	10 horas con 2.5m de vano
<b>Cohesión</b>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Angulo de rozamiento</b>	15 - 25

<b>Afloramiento 4</b>		<b>Puntuación</b>
Compresión Simple	49 MPa	4
RQD	2.8	3
Separación	0.64m	15
Longitud	2.10m	4
Abertura	5mm	1
Rugosidad	Rugosa	5
Relleno	Sin relleno	6
Alteración	Moderadamente	3
Agua Freática	Seco	15
<b>SUBTOTAL</b>		<b>56</b>

<b>Afloramiento 4</b>	
<b>Corrección por orientación de discontinuidades</b>	
Dirección y buzamiento: Media	-25
<b>TOTAL =</b>	<b>31</b>

De acuerdo a la tabla N° 3.1 el afloramiento 4 clasifica de la siguiente manera:





<b>Afloramiento 4</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Calidad</b>	Mala
<b>Puntuación</b>	40-21

Según la tabla N° 3.1 (continuación) las características geotécnicas del macizo serían:

<b>Afloramiento 4</b>	
<b>Clase</b>	IV
<b>Tiempo de mantenimiento de longitud</b>	10 horas con 2.5m de vano
<b>Cohesión</b>	1-2 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Angulo de rozamiento</b>	15 - 25

### 3.4 Criterios de Rotura

Generalmente en los análisis de estabilidad de taludes se consideran el criterio de rotura lineal de Mohr-Coulomb o el criterio empírico no lineal de Hoek & Brown. Estos procedimientos suponen una ley de fluencia asociada, y el valor del coeficiente de seguridad del talud se sobreestima.

Después de numerosos estudios empíricos que se han realizado se ha comprobado que el criterio de rotura del comportamiento del suelo es no lineal. El criterio de no linealidad se presenta en todos los niveles de tensiones pero principalmente en los más bajos.

Los criterios de rotura constituyen la base de los métodos empíricos, permiten evaluar la resistencia de los macizos rocosos a partir de los esfuerzos actuantes y de las propiedades del material [7].

Las formulaciones analíticas de criterios de rotura no lineales se pueden clasificar en tres grupos principales: parabólica, logarítmica e hiperbólica.

Los modelos matemáticos nos permiten estimar la resistencia del macizo, partiendo de la modelización numérica del comportamiento del mismo, además depende también de sus propiedades físicas, mecánicas, de la ley del comportamiento y de los factores como tensiones y agua. Estos modelos son de gran utilidad en la



ejecución del back analysis (análisis inverso), el mismo que se realiza mediante la modelización numérica de la deformaciones y del proceso de rotura del macizo rocoso, para de esta manera obtener los parámetros de resistencia del macizo.

### 3.4.1 Criterio de Rotura de Mohr-Coulomb

El criterio de rotura más conocido en la práctica geotécnica es el establecido por Coulomb, en el año de 1773, éste es un criterio de rotura lineal para determinar la resistencia al esfuerzo cortante en un plano. Este criterio viene determinado por la siguiente expresión [7]:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde

$\tau$  = Tensión tangencial

$c$  = constante de la cohesión

$\sigma_n$  = tensión normal al plano de rotura

$\phi$  = constante del ángulo de rozamiento del suelo o roca

Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma  $\tau = f(\sigma)$ .

El criterio de Mohr – Coulomb implica que tiene lugar una fractura por corte al alcanzarse la resistencia de pico del material. La gran ventaja de utilizar este criterio es su sencillez [6]. Aunque presenta inconvenientes relacionados con el comportamiento tensión-deformación no lineal de los macizos rocosos suele ser utilizado teniendo en cuenta que se deben adoptar valores para la cohesión y para el ángulo de fricción representativos del macizo rocoso, los mismos que propone Bieniawski en función a la calidad del macizo rocoso dada en el índice RMR.

### 3.5 Determinación de los Parámetros de Resistencia

Previo al análisis de la estabilidad del talud se debe determinar los parámetros de resistencia, para lo cual se utilizó los resultados del estudio geofísico.



Además de la información obtenida del mencionado estudio se analiza también la correspondiente al comportamiento geomecánico de los materiales del informe [2]. Esta información se presenta en la tabla N° 3.10.

Material	Parámetros Físico-Mecánicos				Clasific. Bieniawski
	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )	
Material Aluvial	19– 22	0	35 - 45		
Formación Tarqui (Material Rocoso)	23 - 24	0.05 – 0.15	25 - 35	*40 - 100	IV
Intrusivo granodiorita alterada	21 - 24	0.01 – 0.05	25 - 35		V
Intrusivo granodiorita semi-alterada	24 – 26	0.15 – 0.2	35 - 40	200	IV-III

**Tabla N° 3.10 Parámetros geomecánicos obtenidos del informe de PRECUPA.**

A partir de esta información se estiman los parámetros a emplearse en el presente estudio (Tabla N° 3.11)

CAPA	DESCRIPCION	PESO ESPECIFICO (KN/m <sup>3</sup> )	COHESION (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (grados)
Superficial	Deposito Aluvial, Material Deslizado	19	0	35
Segunda	Formación Tarqui	20	20	40
Tercera	Meta basalto alterado	21	50	40
Cuarta	Meta basalto semi-alterado	22	150	45
Quinta	Meta basalto de buena calidad	24	400	50

**Tabla N° 3.11 Parámetros geomecánicos obtenidos para el presente estudio.**



### 3.6 Factor Sísmico

En el análisis de la estabilidad de taludes en el cual influye la fuerza sísmica, se emplean métodos analíticos como el método pseudo-estático, el mismo que permite asignar la acción sísmica a una fuerza estática horizontal, la cual se incorpora a la ecuación de equilibrio límite. Esta fuerza pseudo-estática es el resultado del producto entre el coeficiente sísmico y del peso de la masa analizada:

$$F_h = k_h W$$

$$k_h = \frac{a_h}{g}$$

Donde:

$a_h$  = es la aceleración horizontal

$g$  = gravedad

$W$  = peso de la masa analizada

$F_h$  = Fuerza pseudo-estática

Para determinar el efecto del sismo en la zona en estudio se utilizó la información generada por la Red Nacional de Sismógrafos del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional [8] en donde se establecen cuatro zonas sísmicas, definidas a partir de la aceleración máxima efectiva en roca esperada para el sismo de diseño. La aceleración se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad. En la figura N° 3.1 se presentan los eventos sísmicos con un grado de amenaza superior a VIII [8] y se observa que estos sucesos ocurrieron con mayor intensidad en la parte centro y norte de la región andina, por lo que la zona objeto de estudio no se encuentra afectada por eventos sísmicos catastróficos. En la figura N° 3.2 se presenta el mapa "Amenaza sísmica y de tsunamis en el Ecuador", en donde se observa que la zona I es la de menor peligro y la zona IV la de mayor peligro y se asigna un valor de 0 para la primera zona hasta un valor de 3 para la última zona, con su correspondiente coeficiente sísmico. Estos datos se presentan en la tabla N° 3.12



<b>Zona Sísmica</b>	<b>Valor</b>	<b>Coefficiente Sísmico</b>
Zona I	0	0.15
Zona II	1	0.25
Zona III	2	0.30
Zona IV	3	0.40

**Tabla N° 3.12Valores y coeficientes sísmicos asignados para cada zona.**

Analizando la información presentada se establece que el Cerro Shishío se encuentra en la zona II por lo que le corresponde un coeficiente sísmico de 0.25.

Empleando la información de la figura N° 3.3, se determina que con un factor de seguridad de 1.15 se consigue un coeficiente sísmico de 0.125.

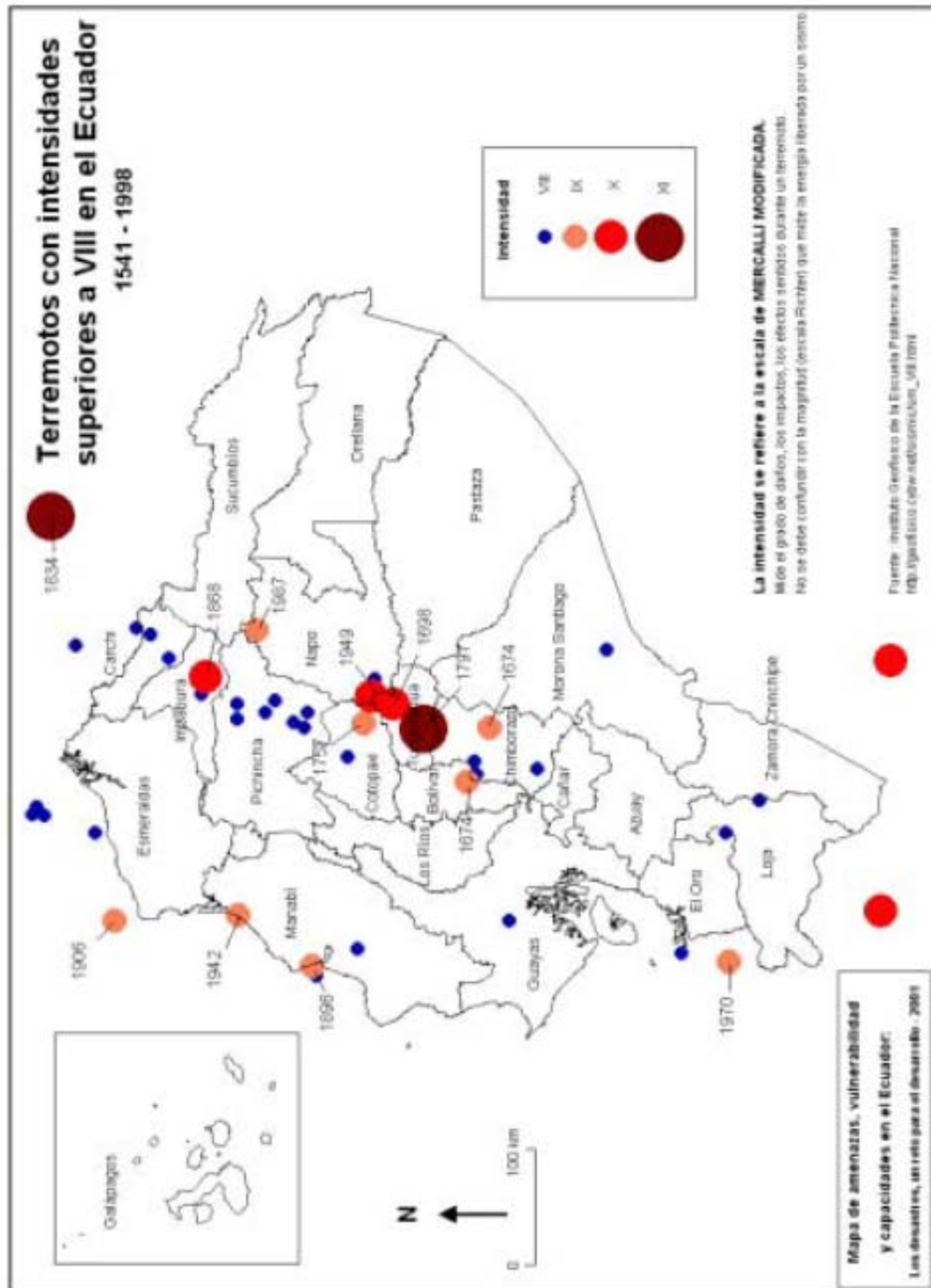


Figura N° 3.1 Eventos sísmicos con intensidades mayores a VIII.



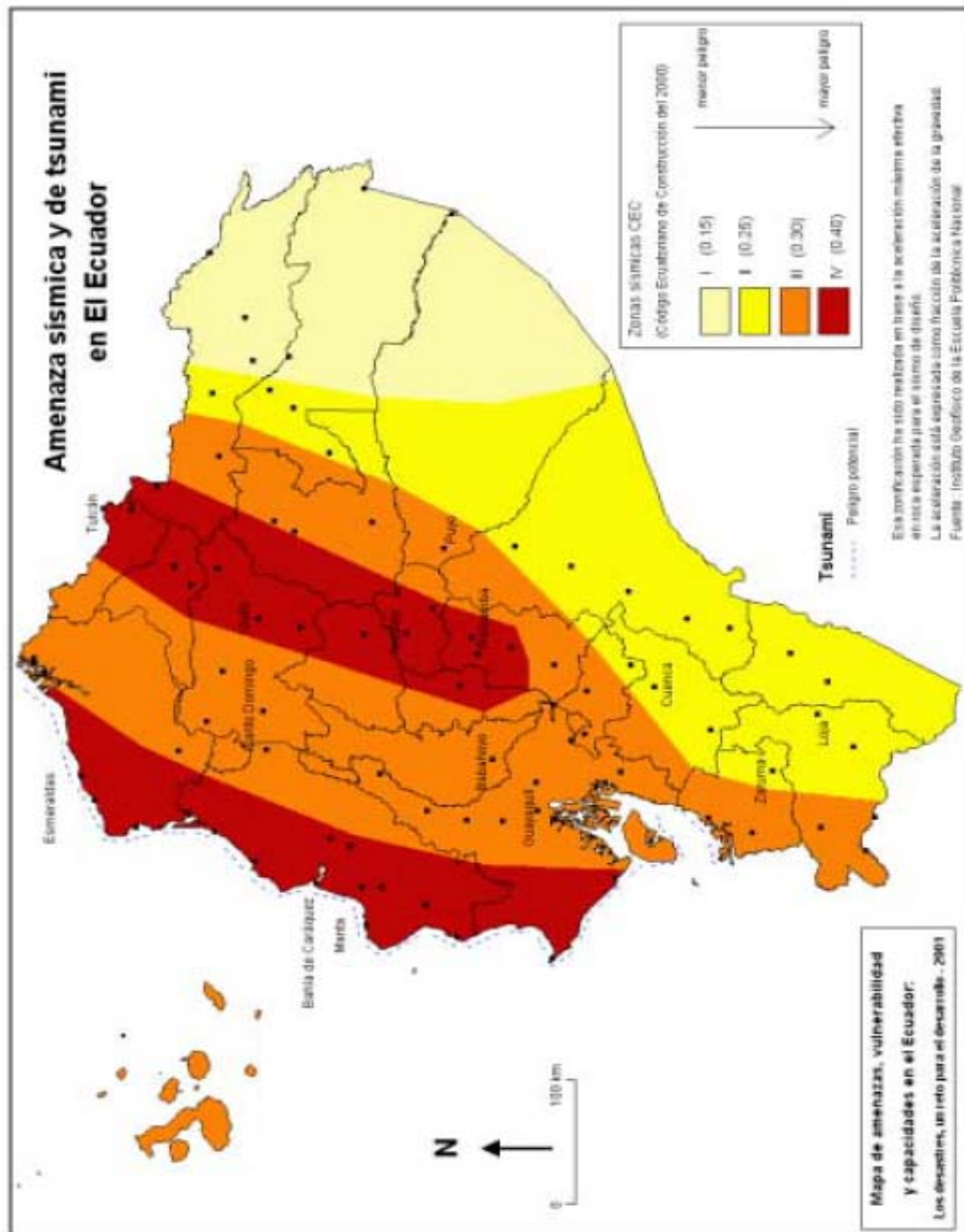
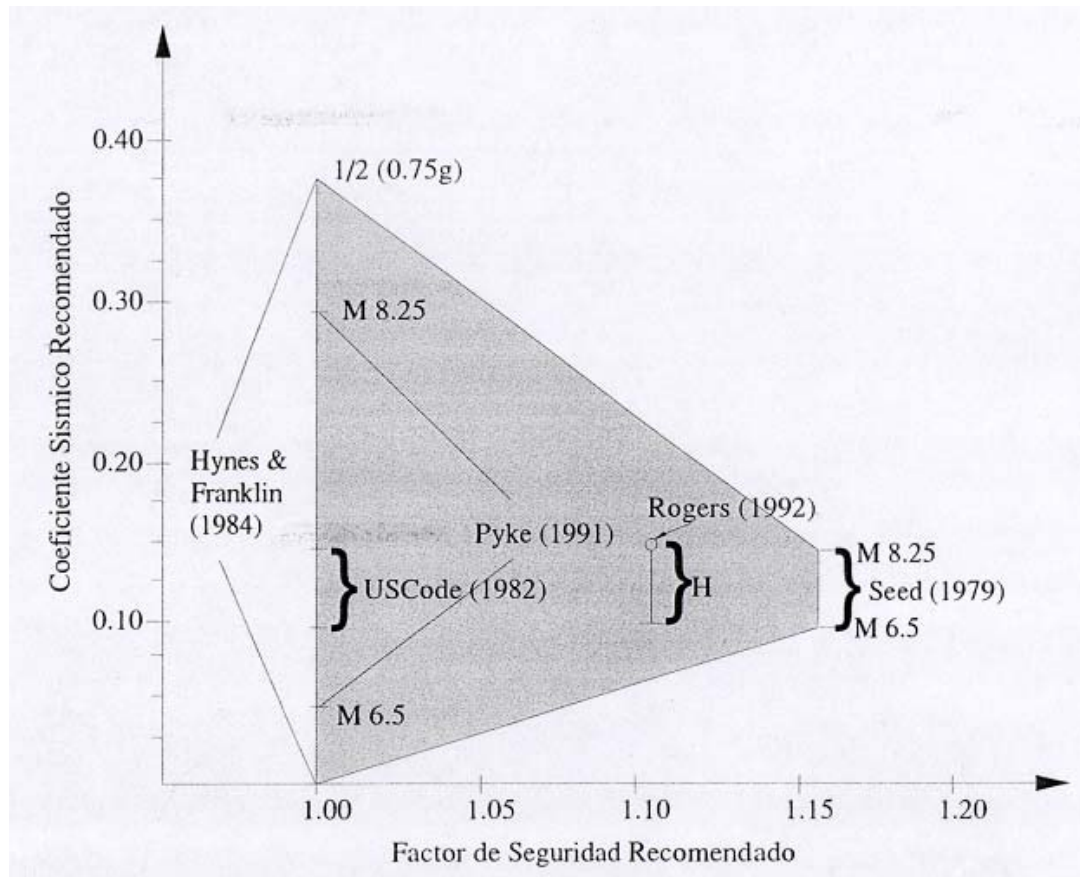


Figura N° 3.2 Mapa de Amenaza sísmica y de tsunami en el Ecuador.



**Figura N° 3.3**Diagrama de correlación entre el factor de seguridad y el coeficiente sísmico[8].



## **CAPITULO IV. ANALISIS DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD**

### **4.1 Introducción**

En este capítulo se realizará el análisis de estabilidad del talud formado por el deslizamiento del Cerro Shishío empleando los métodos de Equilibrio Límite y el Tenso-Deformacional. El primero se ejecutará utilizando los parámetros geomecánicos asumidos empleando el análisis de probabilidades y sensibilidad para posteriormente determinar los parámetros con los que se produce el fallo en el talud. En el segundo caso se escogió el método de los elementos finitos empleando la técnica de reducción del esfuerzo cortante.

En el análisis de estabilidad de un talud se debe elegir apropiadamente el factor de seguridad tomando en cuenta los aspectos económicos, aspectos de seguridad como las consecuencias o riesgos que podría causar la rotura. Los análisis permiten diseñar medidas de estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos. En este caso que ya se produjo la rotura y se conoce la geometría del modelo se realiza el análisis inverso (back-analysis) para determinar los parámetros geomecánicos ( $c$  y  $\phi$ ) de los materiales que conforman el talud ya que los parámetros obtenidos en el estudio geofísico tan solo nos dan una idea de los mismos.

Los métodos de análisis de estabilidad de un talud se basan en el planteamiento físico-matemático en el que interviene fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y determinan su comportamiento.

### **4.2 Geometría del Modelo**

El plano de falla observable en el talud ha sido determinante para la realización de los perfiles más representativos. Valiéndose de la topografía realizada para este estudio y observando los accidentes geográficos del terreno se levantaron tres perfiles en la zona del deslizamiento del cerro. En cada uno de ellos se establecieron el tipo de material del que están conformados cada estrato y sus respectivos espesores, empleando para ello el estudio geofísico, geología y observaciones de campo.



Se evaluaron tres perfiles, el primero A-A, se le evaluó en sus condiciones iniciales, es decir antes del deslizamiento, el mismo que fue obtenido de [9], y también en las condiciones actuales. La geometría de cada uno de ellos se explica de forma explícita en el Anexo B. Su ubicación en el terreno se presenta en el Anexo A.

#### **4.3 Método del Equilibrio Límite**

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite, donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, equivalentes a un factor de seguridad de 1.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla, dividiendo la masa deslizada en rebanadas o dovelas. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión. Una manera de plantear el factor de seguridad es considerando el momento resistente con respecto al momento actuante.

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de rebanadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada dovela se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

#### **Factor de seguridad**

La tarea del ingeniero que está analizando la estabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad. El mismo que se obtiene de la siguiente expresión:



$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

En donde:

$\tau_f$  Resistencia cortante promedio del suelo.

$\tau_d$  Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

Este valor expresa la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable. El resultado final del factor de seguridad depende de:

1. La representatividad de los parámetros mecánicos del suelo.
2. El método de análisis de estabilidad de taludes utilizado.
3. La aproximación con que se definan los valores de las presiones intersticiales.

Se obtendrá un  $FS_{\min}$  para un talud con características geométricas y propiedades de suelo definidas, el cual expresa la magnitud de la reducción que deben llegar a experimentar los índices de resistencia a cortante  $c$  y  $\tan\phi$  para alcanzar un estado de equilibrio límite, y debe cumplir la siguiente condición:

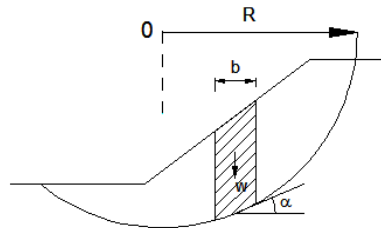
$$FS_{\min} \geq FS_{\text{norma}}$$

#### 4.3.1 Superficies Circulares de Deslizamiento

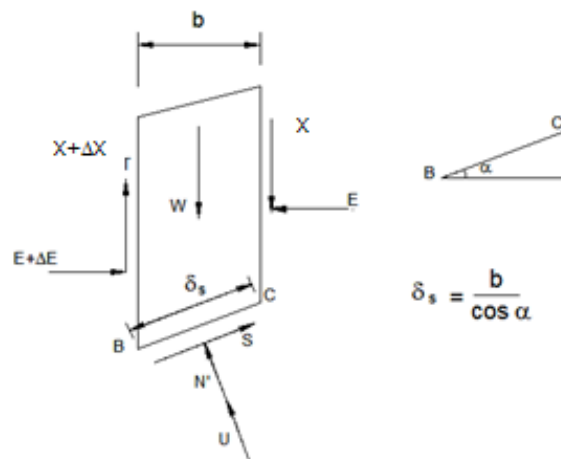
Cuando los suelos que forman un talud están constituidos por materiales homogéneos, puede considerarse, de forma aproximada, que la superficie de deslizamiento es circular. Para hacer el análisis de la estabilidad de un talud es necesario dividir la masa deslizante en dovelas.

Para calcular el factor de seguridad en una superficie de deslizamiento cualquiera, debe resolverse un problema indeterminado desde el punto de vista de la estática, por lo cual deben realizarse hipótesis.

En la figura N° 4.2, se muestra un círculo de tanteo y en la figura N° 4.3 el detalle de una de las dovelas con las fuerzas que actúan sobre la misma [10].



**Figura N°4.2 Círculo de tanteo.**



**Figura N°4.3 Fuerzas actuantes en la dovela.**

En donde:

- E Fuerzas normales totales en los costados de las dovelas.
- X Fuerzas tangenciales totales en los costados de las dovelas.
- W Peso de la dovela.
- N' Esfuerzo efectivo total que actúa en la base de la dovela.
- S Esfuerzo tangencial que actúa en la base de la dovela.
- h Altura del elemento.
- b Ancho de la dovela.





$\delta s$  Longitud de BC.

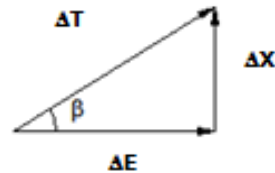
$\alpha$  Angulo entre BC y la horizontal.

$x$  Distancia horizontal desde el centro de la dovela a la vertical que pasa por O.

$c'$  Cohesión efectiva.

$\phi'$  Angulo de rozamiento interno efectivo.

La resultante  $\Delta T$ , de las fuerzas  $\Delta E$  y  $\Delta X$ , forman un ángulo  $\beta$  con respecto a la horizontal (ver figura 4.4).



**Figura N°4.4 Resultante de las fuerzas actuantes.**

En la tabla N°4.1, se listan las incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas y momentos para las  $n$  dovelas en las que se puede dividir la masa deslizante.



**A. Incógnitas asociadas al equilibrio de fuerzas.**

- $n$ : Resultantes normales  $N'$  sobre la base de cada dovela.  
 $1$ : Factor de seguridad.  
 $n-1$ : Resultantes de las fuerzas laterales en la cara de contacto de las dovelas o rebanadas.  
 $n-1$ : Ángulos  $\beta$  que expresan la inclinación de la resultante  $\Delta T$  con respecto al horizonte.  
 $3n-1$ : Incógnitas para  $2n$  ecuaciones.
- 

**B. Incógnitas asociadas al equilibrio de momentos.**

- $n$ : Coordenadas de situación de las resultantes  $N'$  en la base de cada dovela.  
 $n-1$ : Coordenadas de situación de la resultante  $\Delta T$ .  
 $2n-1$ : Incógnitas para  $n$  ecuaciones.
- 

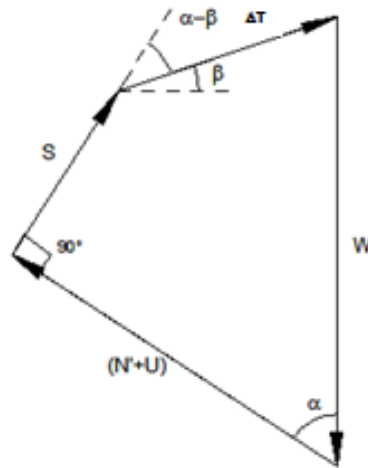
**C. Total de incógnitas**

- $5n-2$ : Incógnitas para  $3n$  ecuaciones.

**Tabla N°4.1 Incógnitas asociadas con las fuerzas resultantes y con los momentos [10].**

En la práctica los métodos más usados no consideran el equilibrio de momentos en cada una de la dovelas, por lo que el problema se reduce a  $3n-1$  incógnitas para  $2n$  ecuaciones. Para eliminar la indeterminación se hacen  $n-1$  hipótesis con respecto al ángulo  $\beta$  y queda un sistema de  $2n$  ecuaciones con  $2n$  incógnitas.

La figura N°4.5, indica el polígono de fuerzas correspondientes a una dovela cuando se supone conocido el ángulo  $\beta$ .



**Figura N°4.5 Polígono de fuerzas [10].**

Proyectando las fuerzas  $W$  y  $\Delta T$  en las direcciones  $N'+U$  y  $S$  se puede obtener las siguientes ecuaciones de equilibrio:

- Para la dirección  $(N'+U)$

$$(N'+U) = W \cos \alpha + \Delta T \sin(\alpha - \beta) \quad (4.1)$$

- Para la dirección  $S$

$$S + \Delta T \cos(\alpha - \beta) = W \sin \alpha \quad (4.2)$$

Sabiendo que el factor de seguridad es la magnitud en la que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se produzca el deslizamiento a lo largo de la superficie más desfavorable, se obtiene:

$$F = \frac{S_r}{S} \quad (4.3)$$



$$S_r = C' + N' \tan \phi' \quad (4.4)$$

Reemplazando (4.4) en (4.3) se obtiene:

$$S = \frac{S_r}{F} = \frac{1}{F} (C' + N' \tan \phi') \quad (4.5)$$

En donde  $C' = c' \cdot \delta s$

Sustituyendo (4.5) en (4.2):

$$\frac{1}{F} (C' + N' \tan \phi') + \Delta T \cos(\alpha - \beta) = W \sin \alpha$$

Se recurre al análisis de equilibrio de la masa deslizante como un todo, ya que se puede afirmar que:

$$\sum W_x = \sum SR \quad (4.7)$$

En donde:

x Distancia horizontal del centro de gravedad de la dovela al centro del círculo.

R Radio del círculo de falla supuesto.

Esto se cumple debido a que las fuerzas internas, así como los empujes inter-dovelas no entran en el equilibrio general.

Reemplazando la ecuación (4.5) en la (4.7) se obtiene la siguiente ecuación del factor de seguridad:



$$F = \frac{\sum (C' + N' \tan \phi') R}{\sum Wx}$$

Se puede reducir el proceso de cálculo por medio de algunas simplificaciones de donde surgen los distintos métodos de análisis. A continuación se desarrollará el método de Bishop Simplificado:

Supone  $\beta = 0$

Considerando que:

$$U = \mu \cdot \delta_s$$

$$C' = c' \cdot \delta_s$$

$$\therefore N' = \frac{(W - c' \cdot b \cdot \tan \alpha - \mu \cdot b) \cdot \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}}$$

Se obtiene:

$$F = \frac{R \cdot \sum c' \cdot \delta_s \cdot \eta}{\sum W \cdot x} + \frac{R \cdot \sum (W - \mu \cdot b) \cdot \tan \phi' \cdot \varepsilon}{\sum W \cdot x} \quad (4.9)$$

Dónde:

$$\varepsilon = \eta \cdot \sec \alpha$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{F}}$$



#### 4.3.2 Análisis de Probabilidades

En los análisis tradicionales de estabilidad de taludes se asume que los valores de los parámetros de ingreso para todo el modelo son conocidos, pero en un estudio real de estabilidad algunos de estos parámetros no son conocidos es por esto que un análisis de probabilidades puede ser muy útil, en el cual se puede asignar una distribución estadística a los parámetros de entrada al modelo, tales como propiedades de los materiales, cargas, ubicación del nivel freático, etc. Esto permite determinar el grado de incertidumbre en los valores de los parámetros. La herramienta computacional que se emplea para realizar este análisis es el programa Slide 5.0 (Rocscience).

Los datos de entrada son generados randomicamente, basados en la definición de la distribución estadística. Una superficie de deslizamiento puede tener diferentes valores del factor de seguridad calculado.

El proceso para llevar a cabo el análisis probabilístico se describe a continuación:

Al iniciar el análisis de estabilidad del talud en opciones del proyecto se activa en el menú "Statistics" la opción "ProbabilisticAnalysis", en el cual se pide elegir el método de prueba con el que se va a trabajar. El método de prueba determinará cómo será la distribución estadística de las variables que se han definido, para ello se tiene en este software dos métodos disponibles: Monte Carlo y LatinHypercube. El método Monte Carlo es el más comúnmente utilizado en una gran variedad de problemas de la ingeniería geotécnica. Además se debe escoger el tipo de análisis de probabilidades que se realizará entre: el método "Global Minimum" o el método "OverallSlope". Una vez activado el menú estadístico se selecciona los parámetros de entrada y se define como variables randómicas. Luego de haber definido las variables se procede al cálculo.

En la interpretación de los resultados lo primero que se obtiene en el análisis de probabilidades es el factor de seguridad mínimo global, seguido del factor de seguridad promedio, la probabilidad de falla y el índice de fiabilidad.

Con este método se puede determinar los parámetros que den un factor de seguridad igual a uno, para el problema que se está analizando se hará variar el ángulo de fricción del material de la formación Tarquiya que es donde se produjo el fallo.





#### **4.3.3 Análisis de Sensibilidad**

El análisis de sensibilidad permite determinar la “sensibilidad” del factor de seguridad a la variación de las variables de entrada. Esto se lo realiza haciendo variar una variable a la vez mientras todas las otras permanecen constante, y se va graficando el factor de seguridad versus la variable analizada.

Además este análisis consiste en la variación individual de cada una de las variables entre los valores mínimos y máximos esperados. Estos resultados permiten determinar que parámetro de entrada tiene mayor efecto sobre el factor de seguridad y cual no lo tiene.

Empleando el software Slide 5.0 (Rocscience) se realiza igualmente el análisis de sensibilidad para las variables correspondientes a los parámetros geomecánicos del material de la formación Tarqui.

El proceso de ejecución entre el análisis de sensibilidad y el de probabilidades tiene una gran similitud, la única diferencia está en la interpretación de resultados, como se mencionó anteriormente, el primero analiza la variación que sufre cada variable de manera individual en cambio el análisis de probabilidades se analizan todas la variables seleccionadas a la vez.

En este caso que se llevará a cabo los dos tipos de análisis, bastará tan solo con activar “SensitivityAnalysis” en la pestaña “Statistics” de opciones del proyecto.

#### **4.3.4 Condiciones de Análisis del Modelo**

El análisis de la estabilidad del cerro Shishio se lo realizó empleando el software SLIDE 5.0 (Rocscience), el mismo que permite modelar suelos heterogéneos, con geometría y superficie de falla complejas.

Debido a que el deslizamiento tiene un superficie de falla circular aproximadamente se empleará para el análisis de la estabilidad del cerro el método de Bishop que es muy apto para este tipo de fallas y también el método GLE (General LimitEquilibrium).

La evaluación se la realizó mediante el análisis inverso del talud que existía antes del deslizamiento para poder determinar los parámetros geomecánicos del material de la formación Tarqui que es en la que se produjo el deslizamiento y con estos resultados se procede a realizar el análisis de la estabilidad del talud en sus condiciones actuales [9].



#### 4.3.5 Análisis de la Estabilidad del Cerro antes del Deslizamiento

Se llevó a cabo el análisis inverso de estabilidad con la estimación de la topografía antigua del talud[9], para obtener los parámetros geotécnicos que generen un factor de seguridad igual a la unidad.

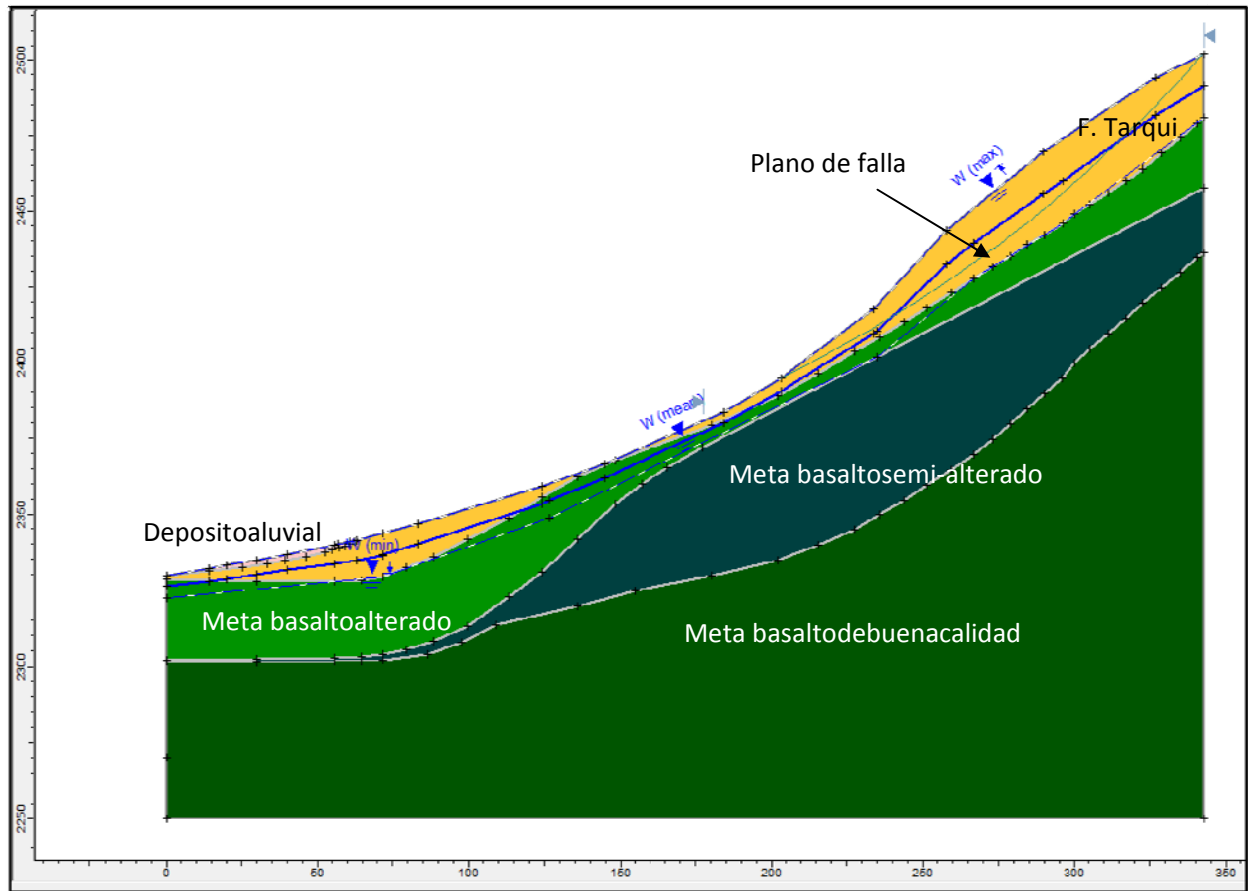
El software se empleará tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas. En las condiciones estáticas se le analizará con los parámetros geomecánicos determinados en la tabla N° 3.14 y una variación en el nivel freático. En las condiciones pseudo-estáticas se empleará el coeficiente sísmico máximo para obtener un factor de seguridad igual a la unidad.

CAPA	DESCRIPCION	PESO ESPECIFICO (KN/m <sup>3</sup> )	COHESION (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (grados)
Superficial	Deposito Aluvial	19	0	35
Segunda	Formación Tarqui	20	20	40
Tercera	Meta basalto alterado	21	50	40
Cuarta	Meta basalto semi-alterado	22	150	45
Quinta	Meta basalto de buena calidad	24	400	50

**Cuadro N° 3.14 Parámetros geomecánicos obtenidos para el presente estudio.**

En el análisis inverso se estiman los parámetros geomecánicos del material de la formación Tarqui ya que fue por donde se produjo el fallo y se establece el nivel freático antes del deslizamiento. Una vez obtenido el factor de seguridad igual a la unidad, estos parámetros empleados son utilizados para análisis posteriores.

El perfil utilizado para el análisis inverso se presenta en la figura N° 4.6, en donde se observa que se ha impuesto el plano de falla ya que se conoce aproximadamente la ubicación del mismo y que tiene lugar en la formación Tarqui.



**Figura N° 4.6. Perfil utilizado en el análisis inverso.**



En la figura N° 4.6 se observa que se trabaja con una variación en el nivel freático para llevar a cabo el análisis de sensibilidad, tanto de esta variable como la de la cohesión y el ángulo de fricción.

En el programa SLIDE 5.0 la masa deslizante se divide en 50 dovelas, con una tolerancia de 0.001 y 100 iteraciones, teniendo como resultado que con los valores asumidos y un nivel freático ubicado a 10 m de profundidad, el factor de seguridad es 1.106 en condiciones estáticas, como se muestra en la figura N° 4.7, lo que indica las propiedades del talud en estado incipiente próximo al momento del fallo, ya que el mínimo factor de seguridad recomendado que se debe obtener en estas condiciones es 1.50.

Para poder determinar los valores exactos al momento que se produce el fallo del talud se ejecuta el análisis de sensibilidad y probabilidades, tomando como variables randómicas los parámetros geomecánicos ( $c$  y  $\phi$ ) del material donde se produjo la falla, es decir la formación Tarqui, y la ubicación del nivel freático. El rango de variación de la cohesión va desde 10 kPa a 30 kPa, el ángulo de fricción varía entre 30 a 50 y el nivel freático máximo sería el que se ubicaría en la superficie del talud. En la figura N° 4.8 se encuentra los resultados del análisis de sensibilidad.

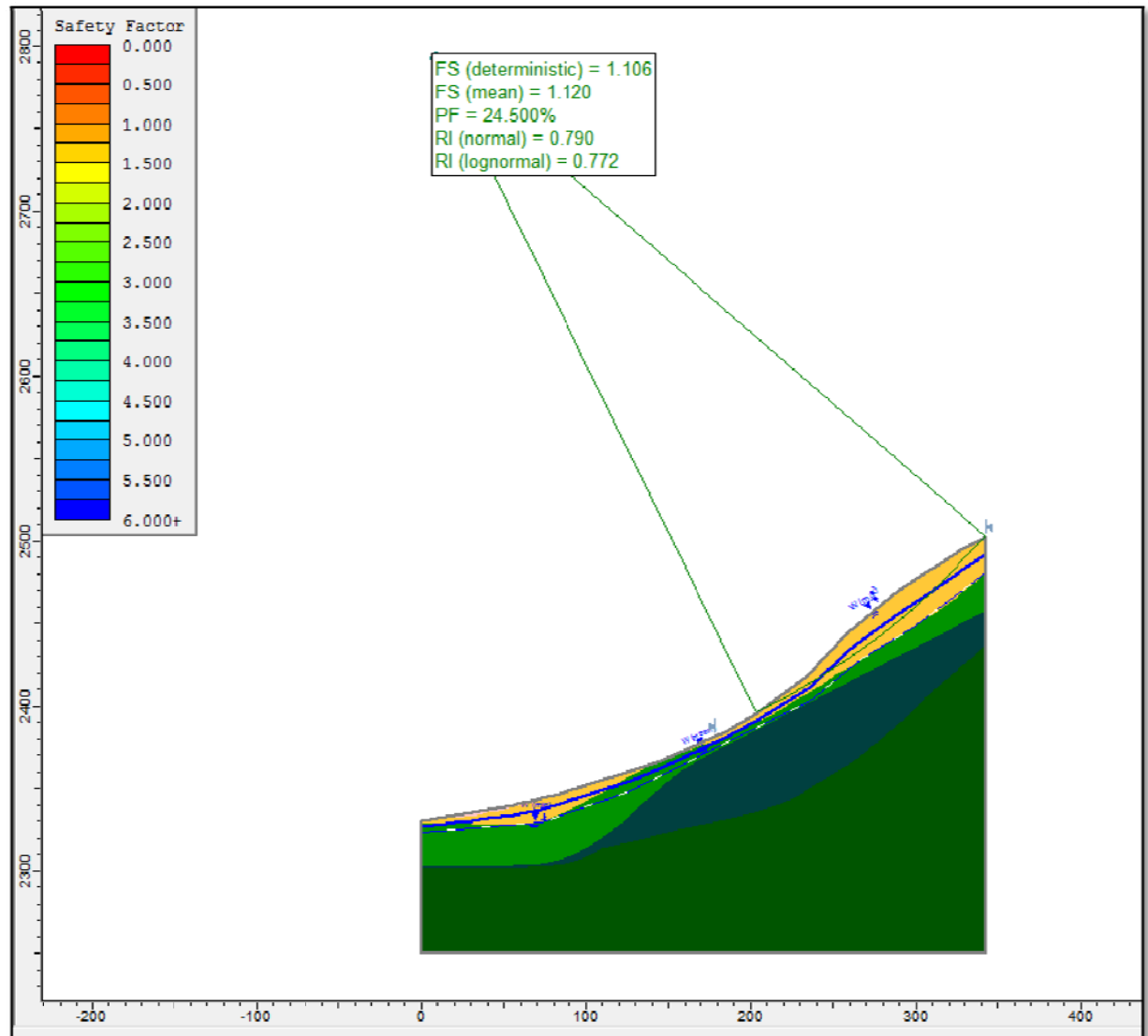
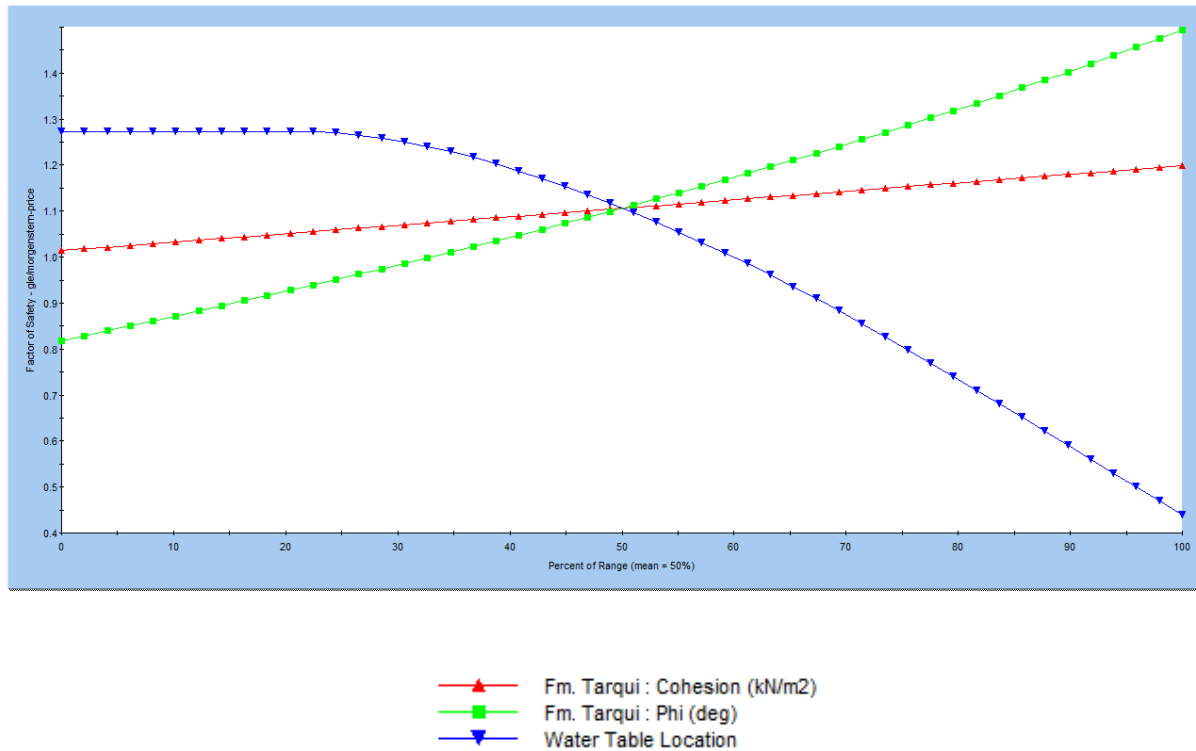


Figura N° 4.7. Resultados del modelo del análisis inverso



**Figura N° 4.8. Resultados del análisis de sensibilidad**





Se concluye del análisis de sensibilidad que las variables ángulo de fricción y nivel freático influye notablemente en la estabilidad del talud, por lo que cualquier variación en alguna de ellas provocaría el fallo del talud. Asumiendo el  $FS=1$  se tiene un  $\phi=36$ . El histograma de la variable  $\phi$  y el diagrama de dispersión da el mismo resultado que el análisis de sensibilidad como se puede apreciar en las figuras N° 4.9 y 4.10. Como resultado del análisis de probabilidades se obtiene un factor de seguridad promedio igual a 1.12, una probabilidad de falla del 24.50% y un índice de fiabilidad normal=0.79 y un índice de fiabilidad lognormal=0.772, estos resultados se observan en la figura N° 4.7.

Además se realiza el análisis del modelo en diferentes situaciones: considerando el nivel freático profundo, el nivel freático en la superficie y la acción de la fuerza sísmica, las gráficas de los análisis de estabilidad se presentan en el anexo F y un resumen se encuentra en la tabla N° 4.2 a continuación:

Condiciones del análisis	Factor de Seguridad
Parámetros asumidos originalmente y nivel freático en la superficie	0.470
Parámetros asumidos originalmente y nivel freático a profundidad	1.286
Parámetros asumidos originalmente, nivel freático a profundidad y con un sismo de fuerte intensidad $k_h=0.25$	0.814
Parámetros asumidos originalmente, nivel freático a profundidad y con un sismo de menor intensidad $k_h=0.125$ , que en el capítulo 3.4 sugiere un $FS=1.15$	1.007

**Tabla N° 4.2. Resultados del análisis de estabilidad en diferentes condiciones.**

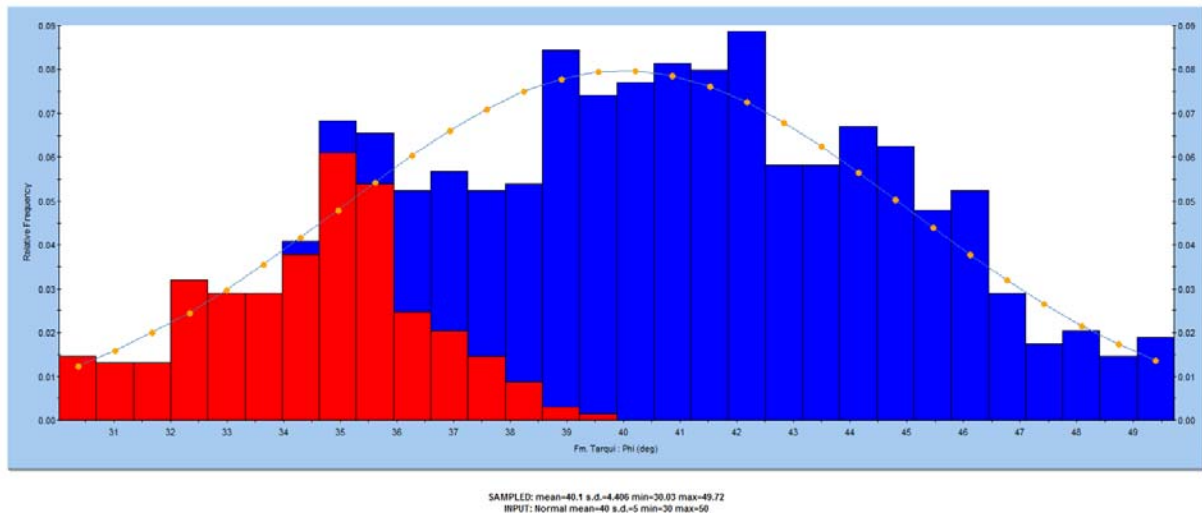


Figura N° 4.9. Análisis de probabilidades: Histograma de la variable  $\phi$ .

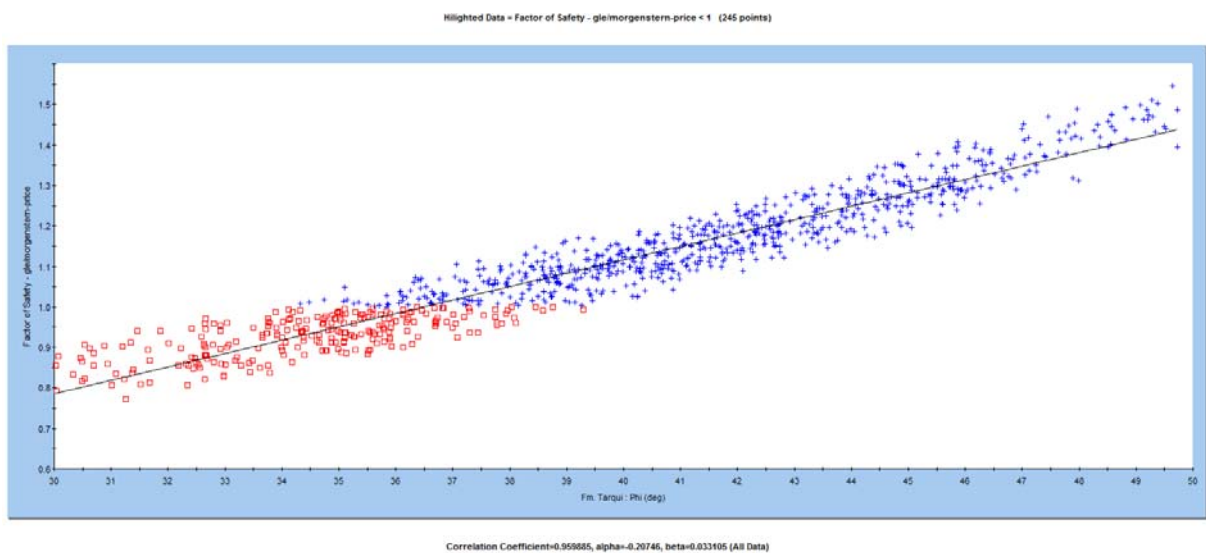


Figura N° 4.10 Análisis de probabilidades: Diagrama de dispersión de  $\phi$ .



#### 4.3.6 Análisis de la Estabilidad del Cerro en condiciones actuales

El análisis del talud en las condiciones actuales en las que se encuentra se lo llevará a cabo mediante tres perfiles. Previo al análisis de estabilidad en las condiciones actuales se resume los resultados obtenidos en el análisis inverso en la tabla N° 4.3, los cuales conforman los nuevos parámetros geomecánicos del talud, agregándose el material, producto del deslizamiento (Figuras N 4.11, 4.12 y 4.13):

CAPA	DESCRIPCION	DENSIDAD (KN/m <sup>3</sup> )	COHESION (KN/m <sup>2</sup> )	φ(grados)
Superficial	Deposito Aluvial, Material Deslizado, Depósito antrópico	19	0	35
Segunda	Formación Tarqui	20	20	36
Tercera	Meta basalto alterado	21	50	40
Cuarta	Meta basalto semi-alterado	22	150	45
Quinta	Meta basalto de buena calidad	24	400	50

**Tabla N° 4.3 Parámetros geomecánicos obtenidos del análisis inverso.**

Se considera la ubicación del nivel freático a 10 m de profundidad. El análisis se lo realiza también en condiciones estáticas y pseudo-estáticas.

El resultado del análisis de estabilidad en condiciones actuales se presenta en el Anexo G y un resumen en la tabla N° 4.4, en las salidas graficas del programa solo se presentan los resultados obtenidos por el método gle/morgenstern-price.

Perfil	Condiciones del análisis	FS (Bishop)	FS (gle/morgenstern-price)
A – A	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	1.191	1.188
A – A	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático kh=0.125	0.930	0.927
A – A	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático kh=0.25	0.738	0.737
B – B	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	1.974	1.974
B – B	Modelo en condiciones actuales, análisis	1.535	1.533



	pseudo-estaticokh=0.125		
B – B	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estaticokh=0.25	1.233	1.231
C – C	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	1.388	1.389
C – C	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estaticokh=0.125	1.042	1.043
C – C	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estaticokh=0.25	0.813	0.811

**Tabla N° 4.4 Resultados del análisis de estabilidad en condiciones actuales.**

En las salidas graficas que da el programa (Anexo G) se puede observar las diferentes superficies de fallas seleccionadas por rangos de colores que distingue las zonas de peligrosidad o susceptibilidad dentro del modelo, lo que se puede llamar como un mapa de seguridad.



Perfil A-A

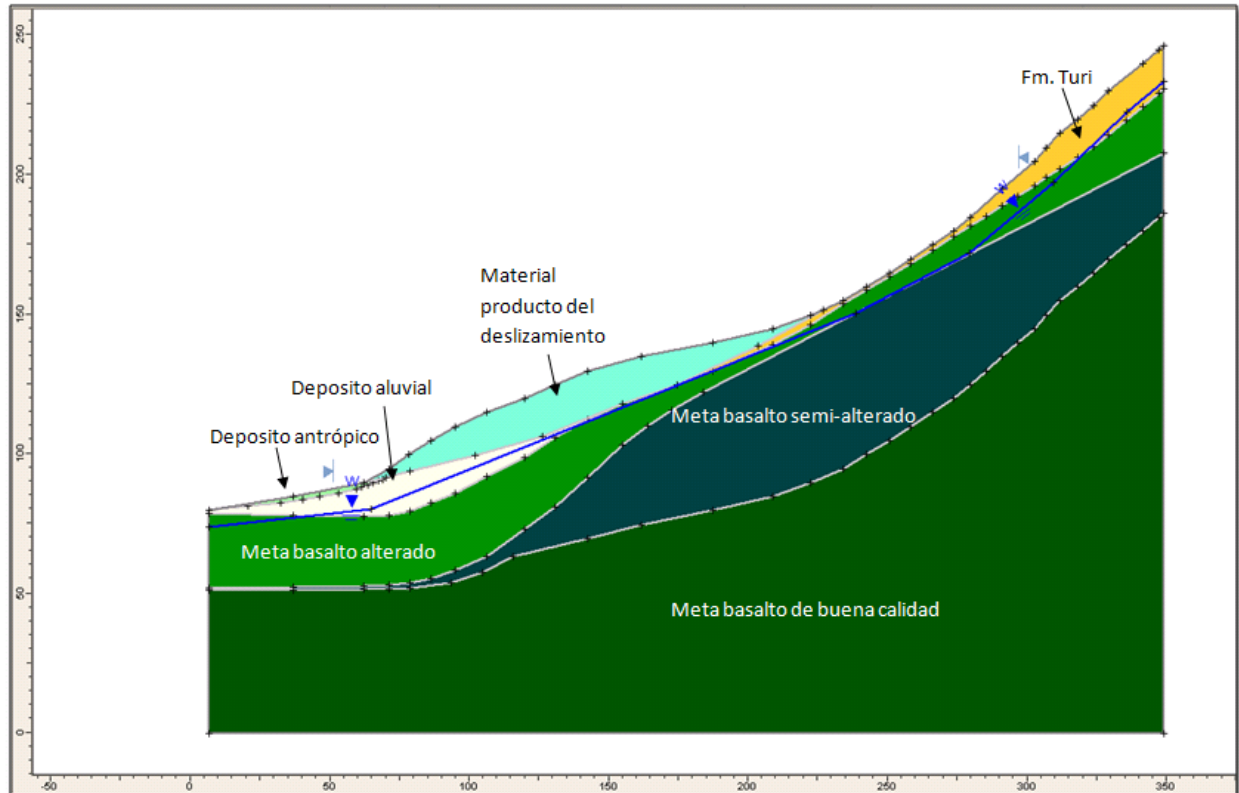
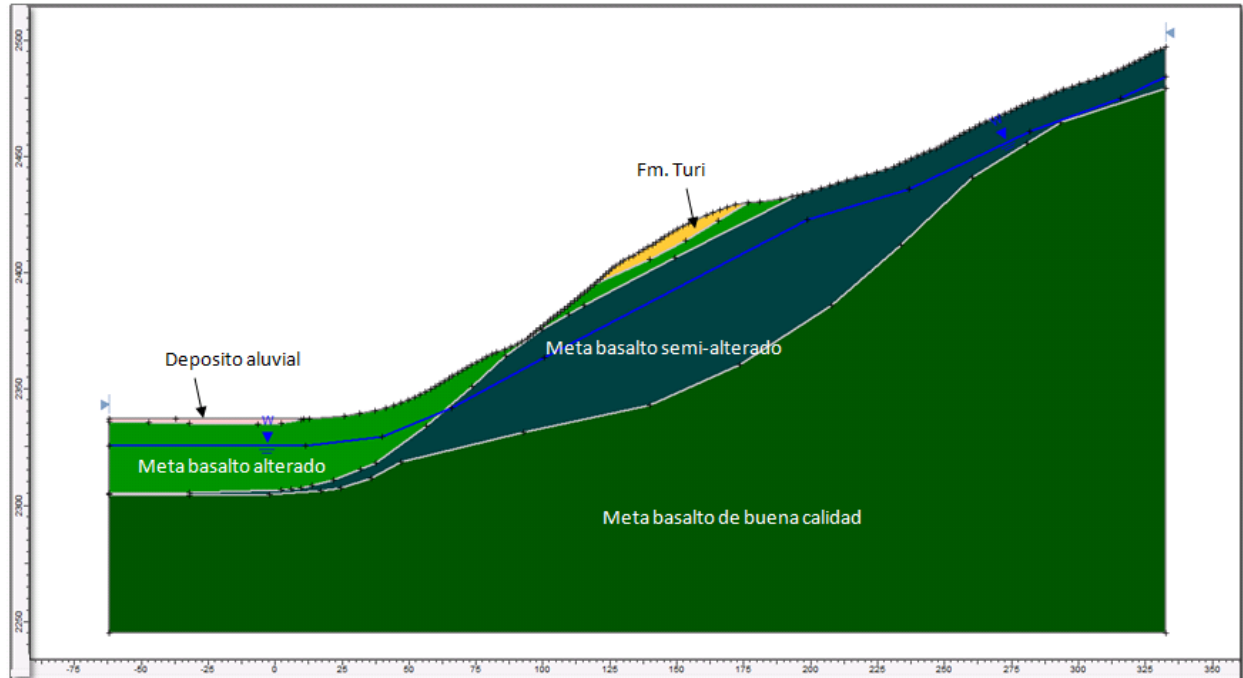


Figura N° 4.11 Modelación del perfil A-A.



**Perfil B-B**

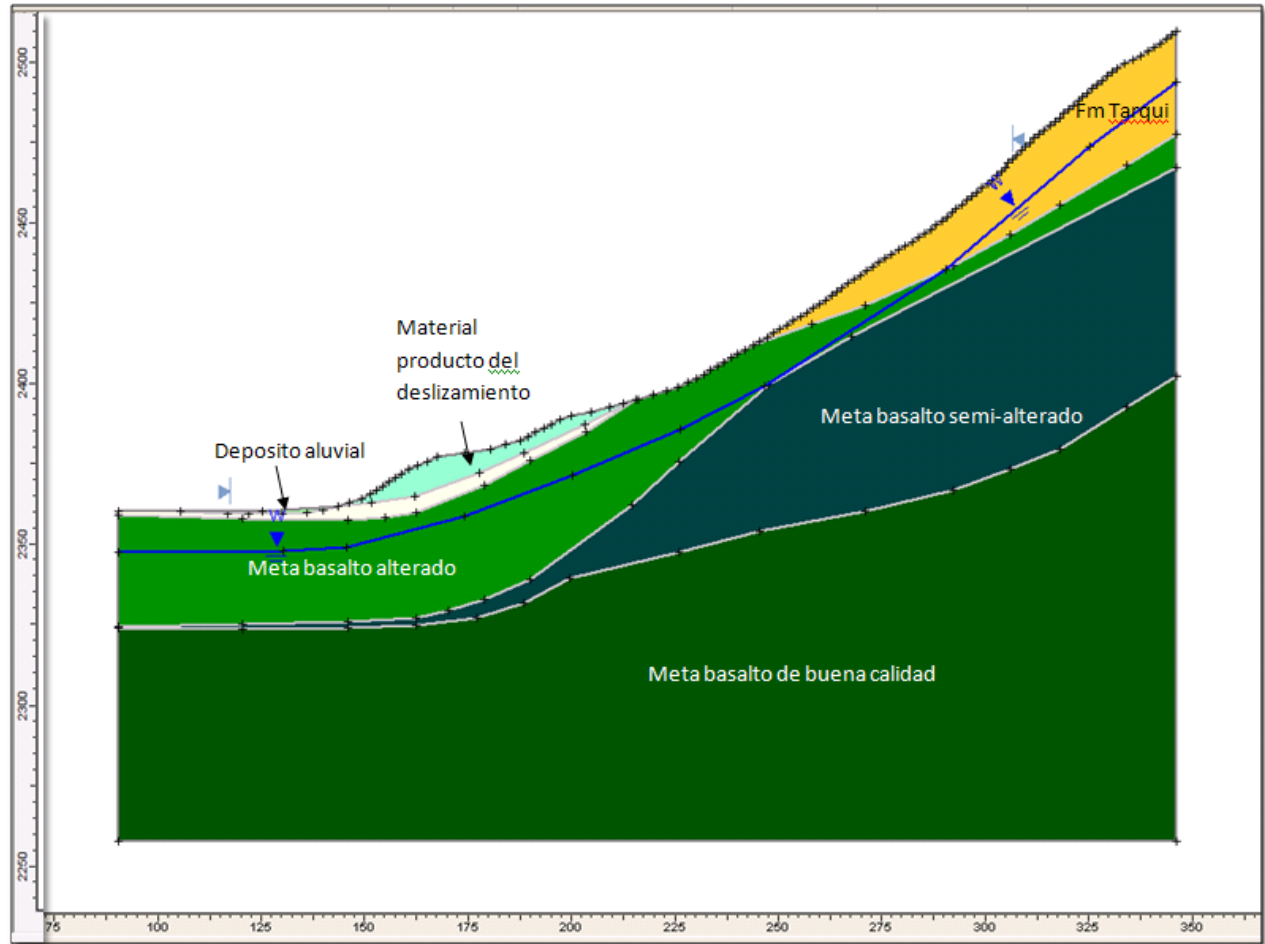


**Figura N° 4.12 Modelación del perfil B-B.**





**Perfil C-C**



**Figura N° 4.13 Modelación del perfil C-C.**



#### **4.4 Método Tenso-Deformacional**

Este método considera las relaciones tensión – deformación que soporta el suelo antes y cuando se produce la rotura y permite modelar esta evolución a partir de un modelo geométrico representativo del talud, con su respectiva litología, nivel freático o cualquier consideración adicional que se deba hacer.

Con este método se obtienen los valores de los desplazamientos, deformaciones y tensiones que se van generando en el modelo a partir de la resolución de las ecuaciones de plasticidad mediante el método de los elementos finitos.

##### **4.4.1 Método de los Elemento Finitos (MEF)**

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

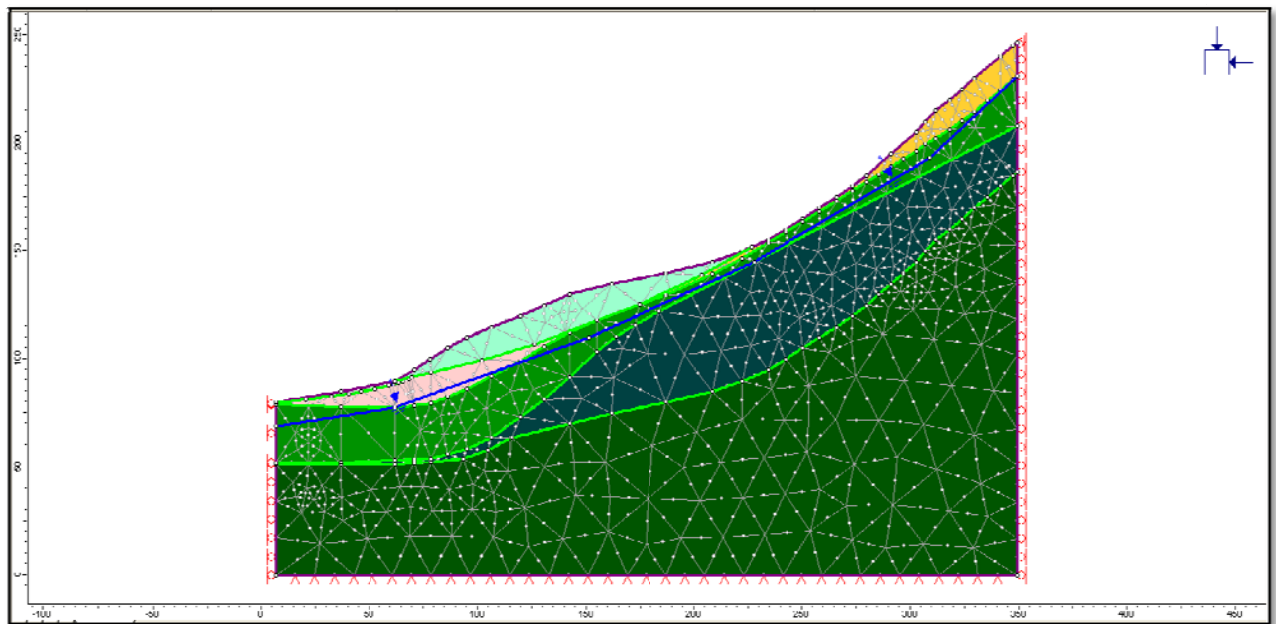
Para la generación de la malla y de los cálculos en general se empleará el programa Phase2. Estos tipos de programas permiten calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o en un problema de mecánica de medios continuos. Dada la imposibilidad de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

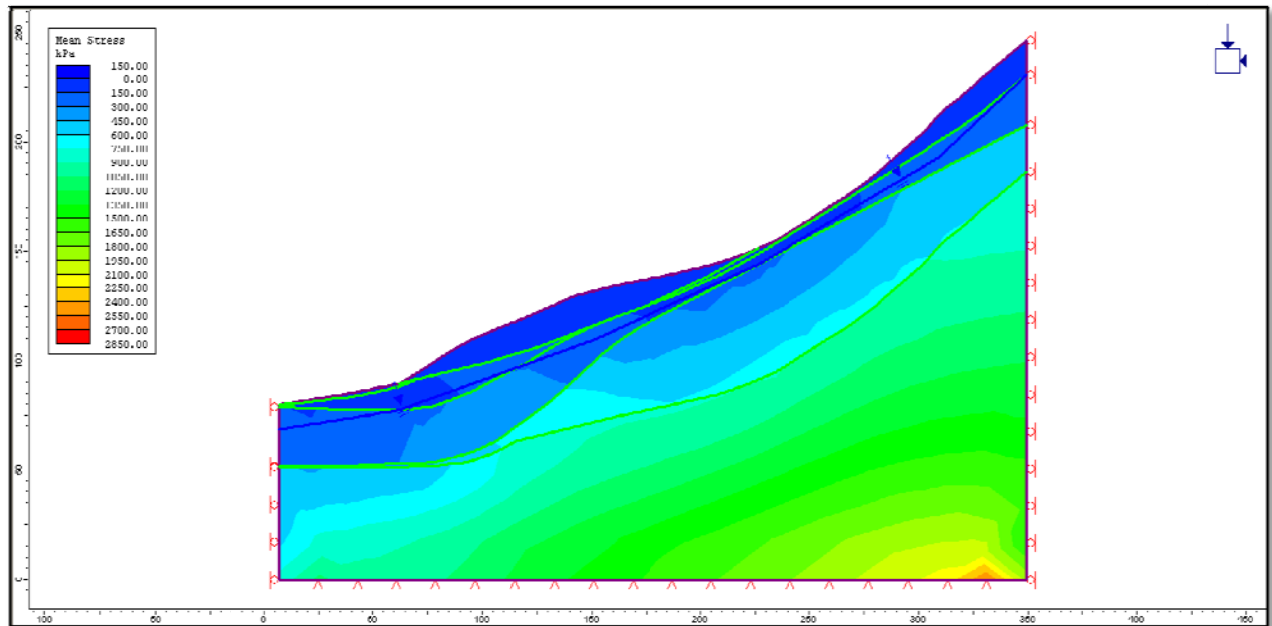


#### 4.4.2 Condiciones de contorno

Para el análisis de estabilidad del talud por el método de MEF se requiere establecer las condiciones de contorno del modelo, en el cual se ha restringido los movimientos horizontales y verticales en la base, en cambio en la paredes laterales del modelo solo se ha limitado los movimientos horizontales como se puede observar en la figura N° 4.14.



**Figura N° 4.14 Perfil A-A: modelización del talud en el MEF, geometría, materiales, mallado y condiciones de contorno.**



**Figura N° 4.15 Perfil A-A: Distribución del Esfuerzo principal mediante el proceso de carga gravitacional.**



#### **4.4.3 Método de la Reducción de la Resistencia a Cortante (SSR)**

En cuanto a las propiedades de los materiales que intervienen en el análisis, se tiene ya definido por los valores obtenidos en el análisis mediante el método de equilibrio límite, tan solo con la diferencia que para cada criterio de rotura se exigen otros parámetros adicionales. En el caso del criterio de rotura de Mohr-Coulomb además del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson se considera al material plástico por lo que al tensor de fuerza se le asigna el mismo valor de la cohesión, el ángulo de fricción y la cohesión residuales tienen el mismo valor del ángulo de fricción y cohesión pico, ya que el material tiene la capacidad de mantenerse constante después de la plastificación. El ángulo de dilatación será igual a cero ya que no existe un incremento de volumen y los materiales que conforman el talud responden a la regla de flujo no asociada. Mediante este método se obtiene el factor de seguridad crítico que se define por la relación entre la resistencia al corte original del suelo y la resistencia al corte para la que se ha producido la rotura.

#### **4.4.4 Aplicación del Método de los Elementos Finitos**

Para la aplicación de este método se ha utilizado el criterio de falla de Mohr-Coulomb para un criterio de falla lineal.

En el programa Phase2 se habilita la opción SSR (ShearStrengthReduction). En el mallado se utiliza elementos triangulares de seis nodos y en el campo de fuerza se emplea el gravitacional, ya que solo interviene el peso propio del talud. El número de iteraciones son 500 y la tolerancia del 0.001.

#### **4.4.5 Criterio de Falla de Mohr Coulomb**

Los parámetros geomecánicos a aplicarse para este criterio de falla se presentan en la tabla N°4.5, como resultado de cálculos realizados en acápites anteriores.



CAPA	DESCRIPCION	PESO ESPECIFICO (KN/m <sup>3</sup> )	COHESION (KN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (grados)	E (Kpa)	$\nu$
Superficial	Deposito Aluvial, Material Deslizado, Depósito antrópico	19	0	35	37000	0.1228
Segunda	Formación Tarqui	20	20	36	261000	0.1184
Tercera	Meta basalto alterado	21	50	40	1342000	0.1140
Cuarta	Meta basalto semi-alterado	22	150	45	4522000	0.1094
Quinta	Meta basalto de buena calidad	24	400	50	8448000	0.1000

**Tabla N° 4.5 Parámetros geomecánicos para la modelación en el MEF.**

Para realizar el análisis pseudo-estático se emplearán dos coeficientes sísmicos  $k_h=0.25$  para un sismo de gran intensidad y para condiciones menos desfavorables  $k_h=0.125$

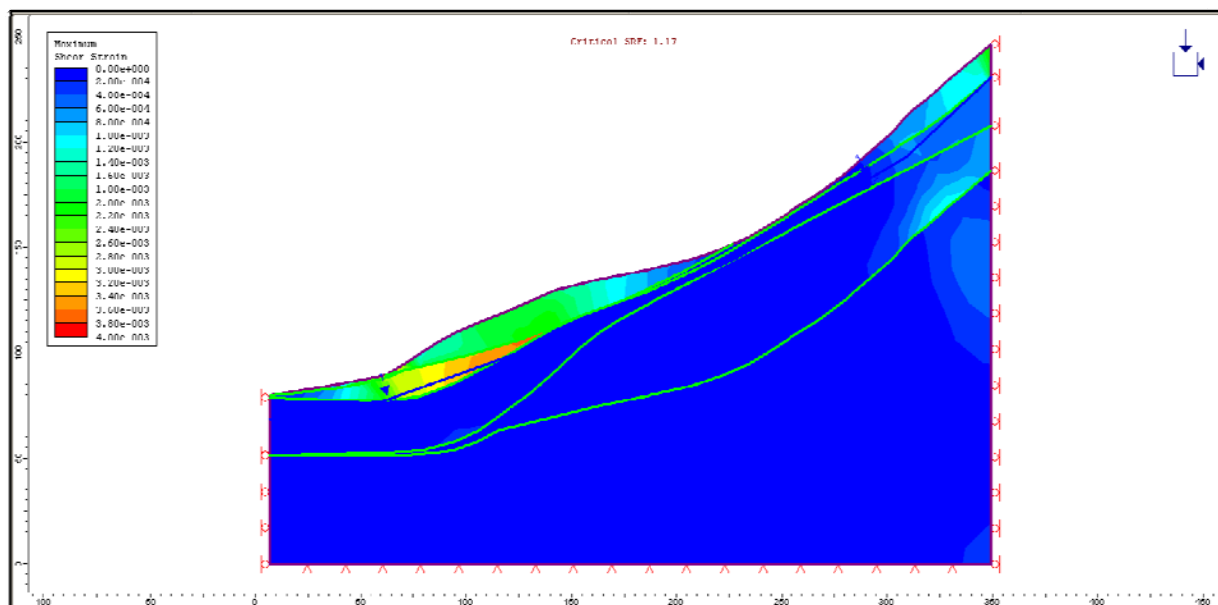


Figura N° 4.16 Perfil A-A: Máximas deformaciones por corte.

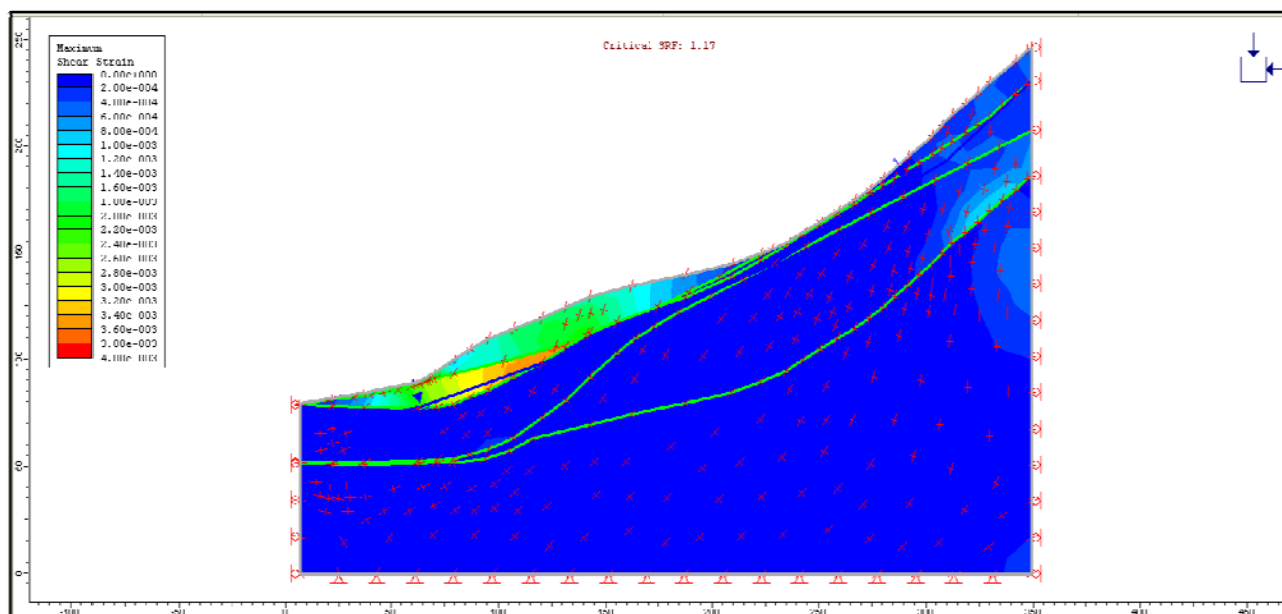
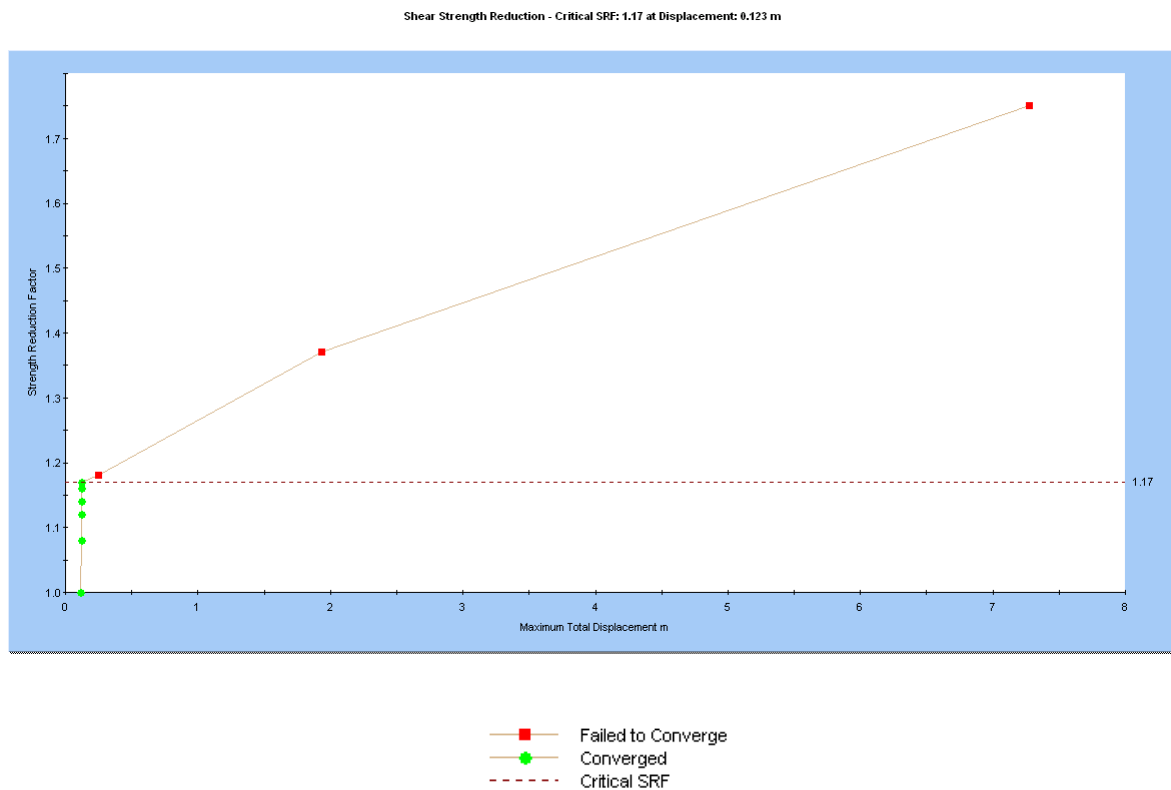
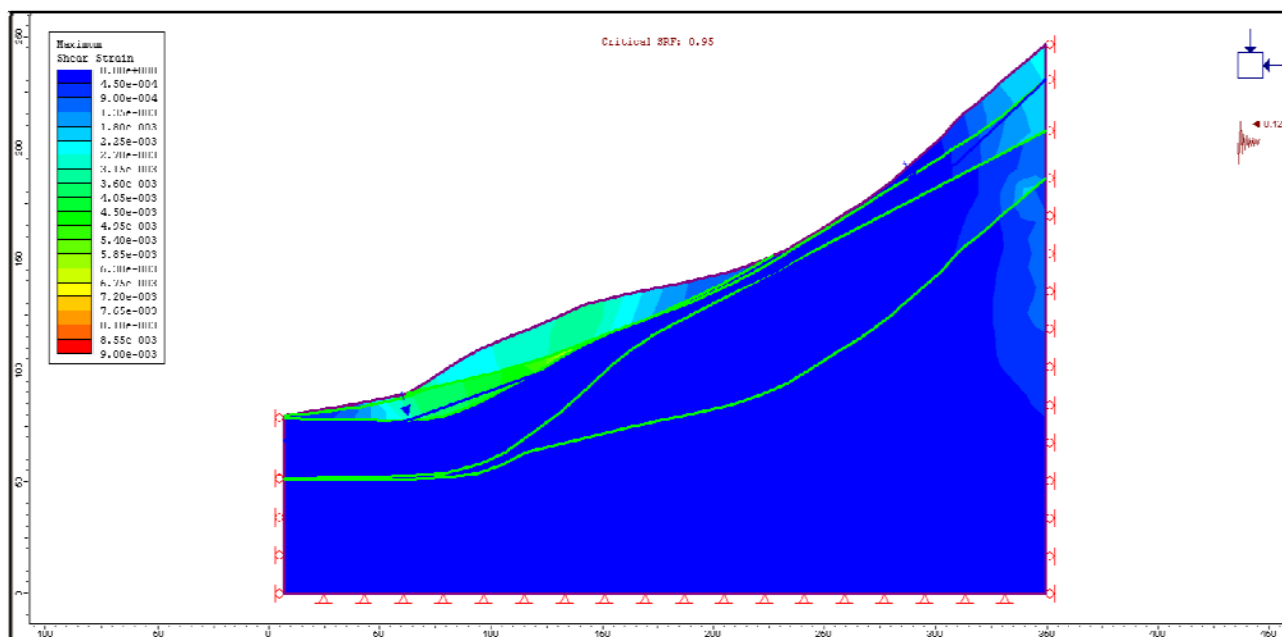


Figura N° 4.17 Perfil A-A: Trayectoria de las tensiones.

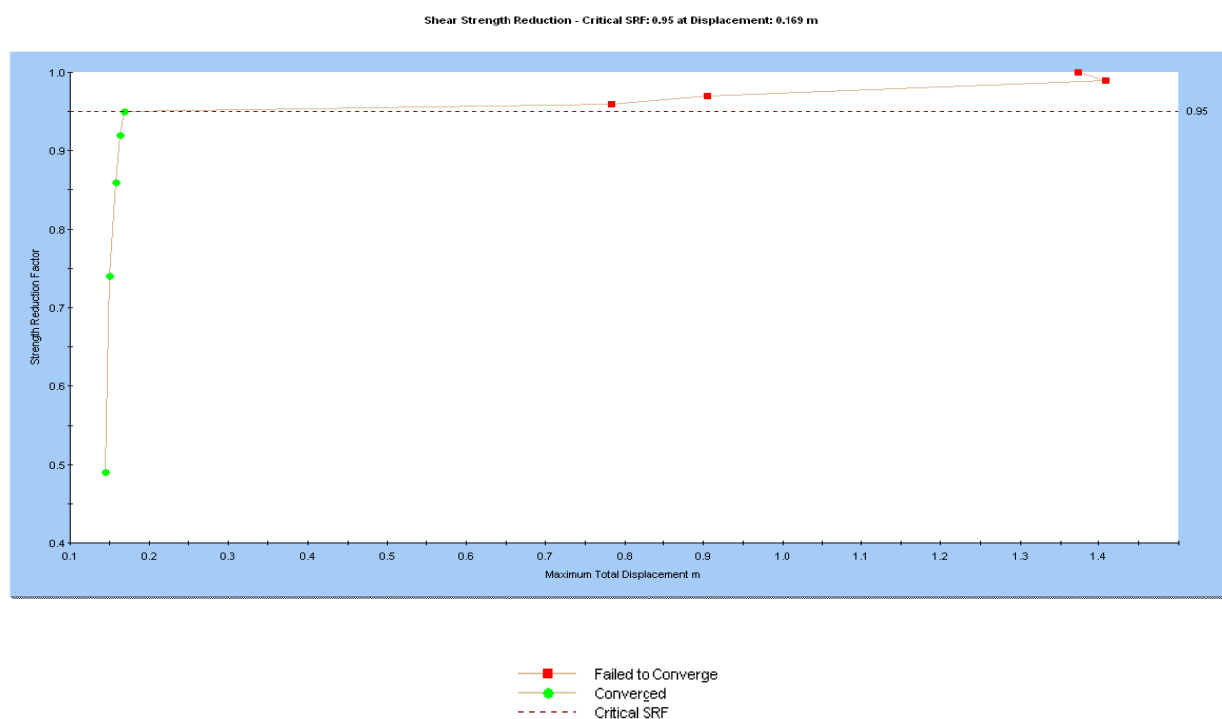




**Figura N° 4.18 Perfil A-A: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo.**



**Figura N° 4.19 Perfil A-A: Análisis pseudo-estático  $kh=0.125$ .**



**Figura N° 4.20 Perfil A-A: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo, análisis pseudo-estático  $kh=0.125$ .**

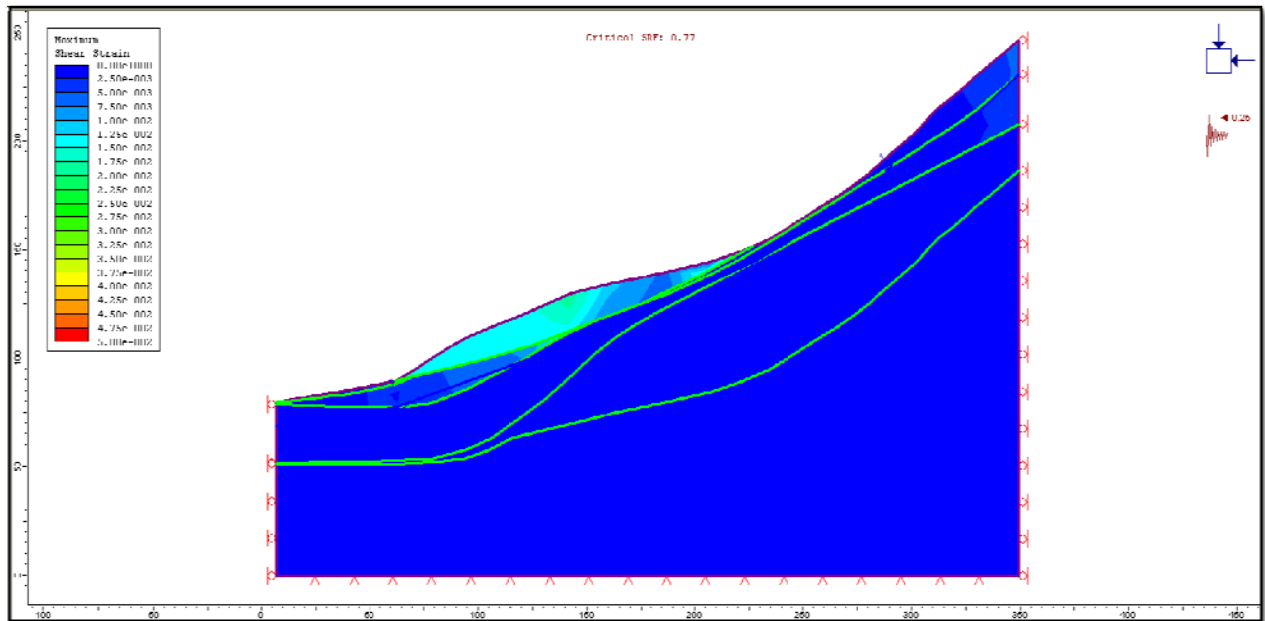


Figura N° 4.21 Perfil A-A: Análisis pseudo-estático  $kh=0.25$ .

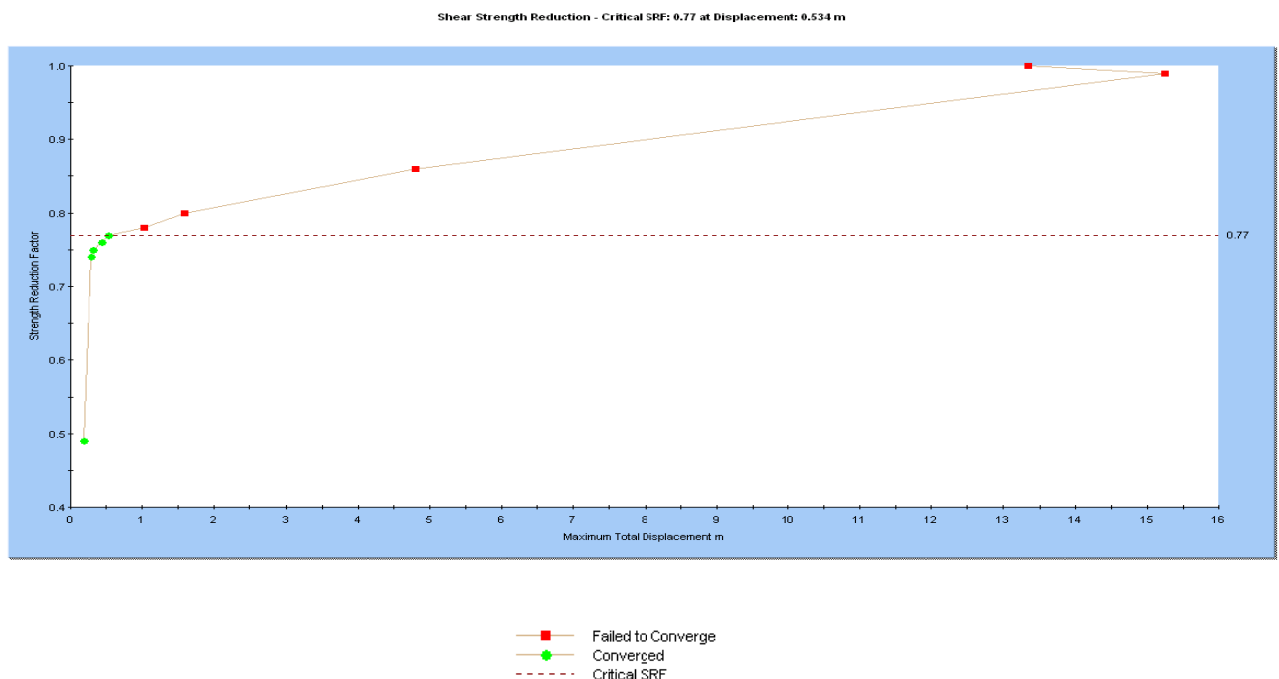


Figura N° 4.22 Perfil A-A: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo, análisis pseudo-estático  $kh=0.25$ .



#### 4.4.6 Resultados de la Modelación mediante el criterio de Mohr-Coulomb

Los resultados obtenidos de los tres perfiles, mediante el criterio de rotura de Mohr Coulomb, se presenta en la tabla N°4.6.

Perfil	Condiciones del análisis	FS	Desplazamiento total máximo (m)
A – A	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	1.17	0.123
A – A	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.125$	0.95	0.169
A – A	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.25$	0.77	0.534
B – B	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	2.00	0.025
B – B	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.125$	1.52	0.033
B – B	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.25$	1.22	0.063
C – C	Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso	1.12	0.043
C – C	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.125$	0.83	0.030
C – C	Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático $\alpha_h=0.25$	0.6	0.043

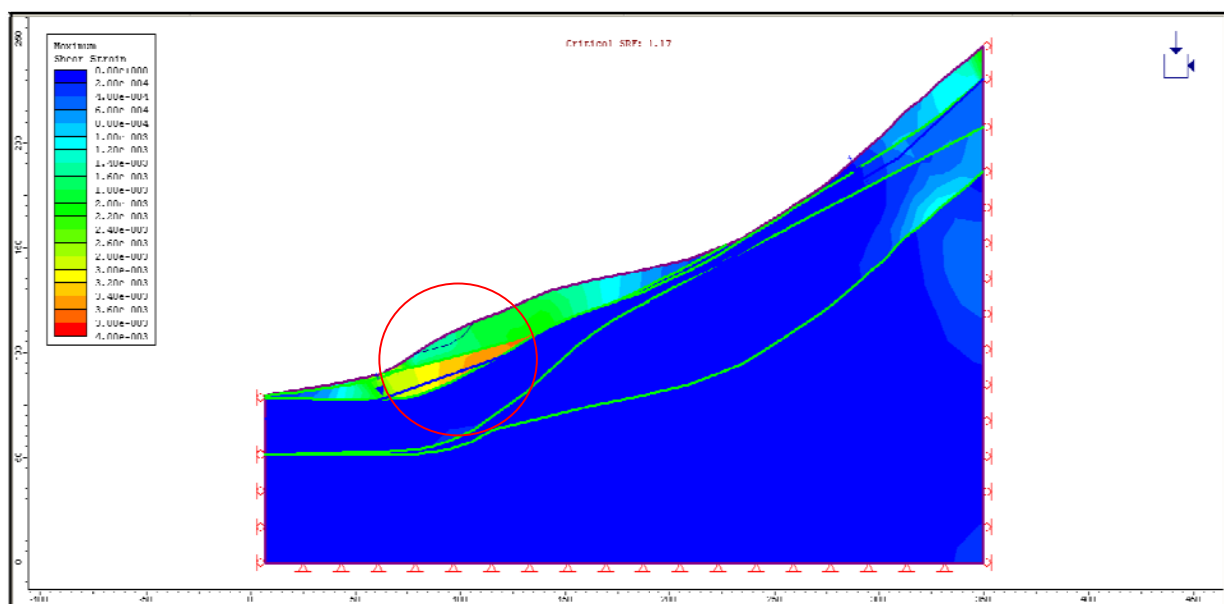
**Tabla N° 4.6 Resultados del análisis de estabilidad con el MEF, criterio de Mohr-Coulomb.**

Estos resultados indican que en el análisis de los perfiles A–A y C–C en condiciones estáticas se encuentran estables pero próximos a la falla y en condiciones pseudo-estáticas ambos se encuentran fallados, a diferencia del perfil B-B que en condiciones estáticas cumple con el factor de seguridad establecido para el diseño. El factor de seguridad mediante el método de los elementos finitos se obtiene aplicando la técnica de Reducción de la Resistencia a Cortante en donde ya no se trabaja tan solo en el rango elástico sino ya se habla de la plastificación del material.



#### 4.5 Comparación de Resultados

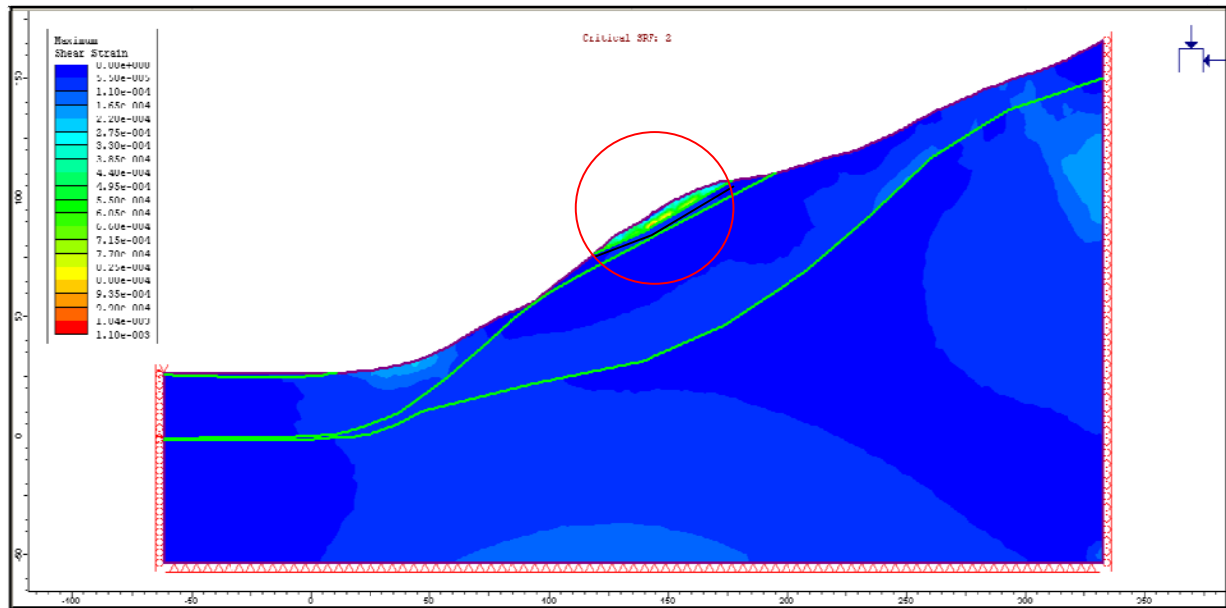
Para realizar la comparación de resultados entre los métodos del equilibrio límite (MEL) y el de elementos finitos (MEF), se procedió a colocar la superficie de falla obtenida mediante el MEL en la gráfica resultante del MEF, en el perfil A-A, como se puede observar en la figura N° 4.23.



**Figura N° 4.23 Perfil A-A: Comparación entre el MEL y el MEF.**

Como se observa en la figura N° 4.23 la superficie de falla se encuentra cerca de la zona de mayores esfuerzos y los factores de seguridad  $FS_{MEL\ A-A}=1.205$  y  $FS_{MEF\ A-A}=1.17$  son similares.

De igual manera sucede en el perfil B-B (figura N° 4.24), en donde la superficie de falla es coincidente con la zona de mayores esfuerzos cortantes y los factores de seguridad  $FS_{MEL\ B-B} = 1.974$  y  $FS_{MEF\ B-B} = 2.00$  son similares.



**Figura N° 4.24 Perfil B-B: Comparación entre el MEL y el MEF.**

En el caso del perfil C-C (figura N° 4.25) se puede observar una variación debido a la presencia de dos zonas que acumulan esfuerzos cortante, siendo la mayor la que se ubica en la corona del talud, pero la superficie de falla obtenida en el MEL se en la base del talud donde se encuentra el material deslizado. Por lo tanto también existe diferencia en los factores de seguridad:  $FS_{MEL\ C-C} = 1.389$  y  $FS_{MEF\ C-C} = 1.12$

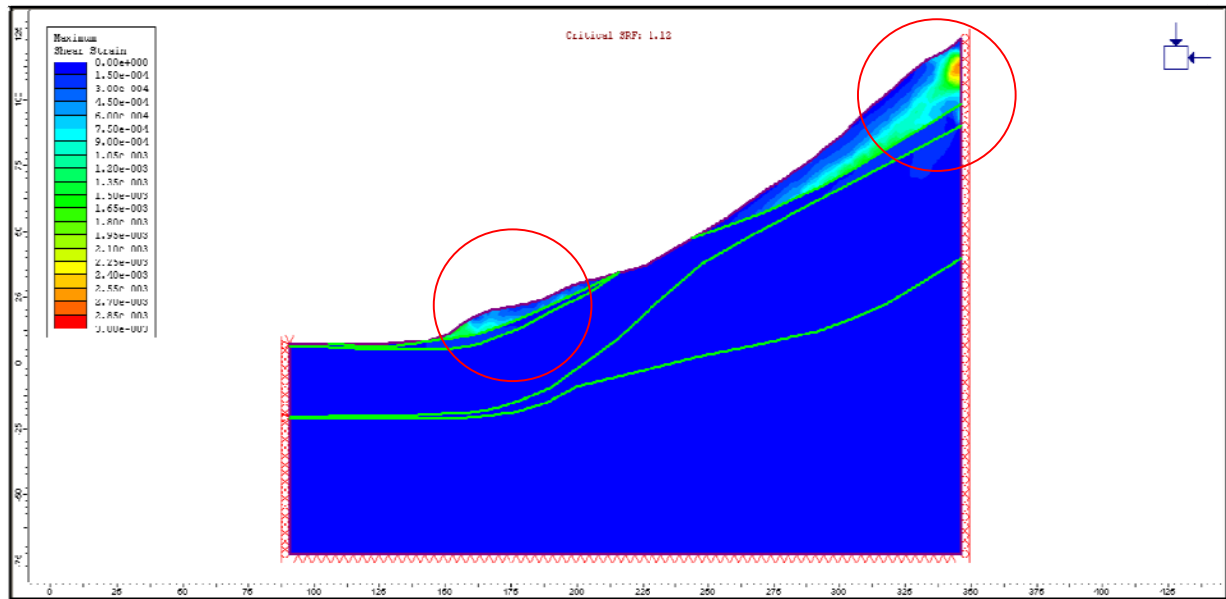


Figura N° 4.25 Perfil C-C: Comparación entre el MEL y el MEF.





## CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Desde el punto de vista geológico el Cerro Shishío se encuentra conformado por una gran cámara de rocas intrusivas sobre la cual descansa la formación Tarqui. En sectores puntuales se observa la presencia de Depósitos Aluviales y Coluviales, además se encuentra también material producto de la explotación minera y el generado por el deslizamiento.
- La caracterización del macizo rocoso se la llevo a cabo haciendo una observación de campo el mismo que consistió en hacer un recorrido de toda la extensión del Cerro Sishio, haciendo ensayos in situ de la roca (martillo de Schmidt) y de la laboratorio (compresión simple) utilizando la clasificación de Bieniawski dando como resultado que el macizo rocoso que aflora en el talud es de mala calidad (IV).
- Las técnicas de punta empleadas para la obtención de los factores de seguridad (FS) utilizando un software especializado (Rocscience) son: Método del Equilibrio Limite y el Método de Elementos Finitos. Los resultados obtenidos son similares y además las superficies de falla y las zonas de mayor esfuerzo coinciden. Para el análisis de estabilidad se empleó el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. La investigación realizada se ha incorporado dentro de un modelo constitutivo elástico perfectamente plástico, considerando la dilatación nula, implementando el método de los elementos finitos, por lo que para definir el factor de seguridad se emplea el método de reducción de la resistencia al corte.
- Otra de las técnicas de punta utilizadas en el back-analysis son: el análisis de sensibilidad y el de probabilidades, con las cuales se determinó el valor del ángulo de fricción del material que falló, ya que es el parámetro que mayor influencia presenta sobre el factor de seguridad. Mediante ambos métodos se obtuvo un  $\phi=36$ .
- Del análisis global de estabilidad se obtuvo que en condiciones estáticas el talud se encuentra estable, pero que con cualquier intervención antrópica o un fenómeno natural como un sismo de gran magnitud o lluvias excesivas que elevarían el nivel freático disminuyendo la resistencia del suelo, podría generarse un nuevo deslizamiento.



- En caso de producirse una gran catástrofe no se espera un represamiento de las aguas del río Paute, ya que el área de la playa es extensa e impediría este suceso.
- En la parte superior del talud se encuentran viviendas y áreas de cultivo por lo que no es viable la reconfiguración del talud mediante el movimiento de tierras.

## 5.2 Recomendaciones

- En la corona del talud debe construirse cunetas de coronación que recojan el agua presente en la zona.
- Es indispensable llevar a cabo un monitoreo del cerro mediante la instalación de mojones superficiales que ayudaría a establecer las condiciones dinámicas del talud. Además se deben continuar con visitas periódicas para la observación de cualquier cambio que se dé en el cerro Shishio.
- En el plano de falla y en el material producto del deslizamiento es indispensable una inmediata reforestación para evitar la erosión del talud.
- La explotación de materiales pétreos debe ser terminantemente prohibida en esta zona, por cuanto se seguiría socavando el pie del talud.

Futuras líneas de investigación:

- Realizar un análisis de estabilidad en 3D, del cual se obtendría una importante información sobre las condiciones reales del talud.
- Ejecutar un análisis empleando el criterio de rotura no lineal de Hoek & Brown.
- Realizar un monitoreo constante para poder llevar a cabo un estudio a detalle que permita conocer con mayor precisión los desplazamientos medidos con la instrumentación implementada.



## REFERENCIAS

- [1] Ing. Martha Roura, Estudio Geotectónico del Deslizamiento del Cerro Shishio, 3-19 (2011)
- [2] Proyecto PRECUPA, Corporación CSS (Cooperación Ecuador-Suiza), B17-B44(1998)
- [3] Núñez del Arco, Geología del Ecuador, 149- 179(2003).
- [4] Ing. Iván Viteri, Informe geofísico, 2-10(2011).
- [5] Alfonso Álvarez Manilla, et al., Instituto Mexicano del Transporte, Evaluación Indirecta de los Módulos Elásticos de Rigidez In Situ y la Relación entre  $V_p/V_s$  y el Angulo de Fricción Interna, 17-18 (2003).
- [6] CarrilloMaureen et al. Clasificación Geomecánica y Análisis de Estabilidad de Taludes del Macizo Rocosó Coris, Cartago, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, 91-93 (2002)
- [7] Luis I.González de Vallejo, Ingeniería Geológica, 118-163, 192-200, 445-469 (2002).
- [8] Demorales, F & D'Ercole, R. Mapas de amenazas, vulnerabilidad y capacidades en el Ecuador: Los desastres un reto para el desarrollo, 27-32 (2001)
- [9] Universidad de Cuenca y CGPaute, Estudio Geotectónico del Deslizamiento de los Cerros Shishío y Misquiyacu, 59-74 (2011)
- [10] Rolando Armas Novoa, Presas de Tierra, CUJAE, 217-222 (1987)

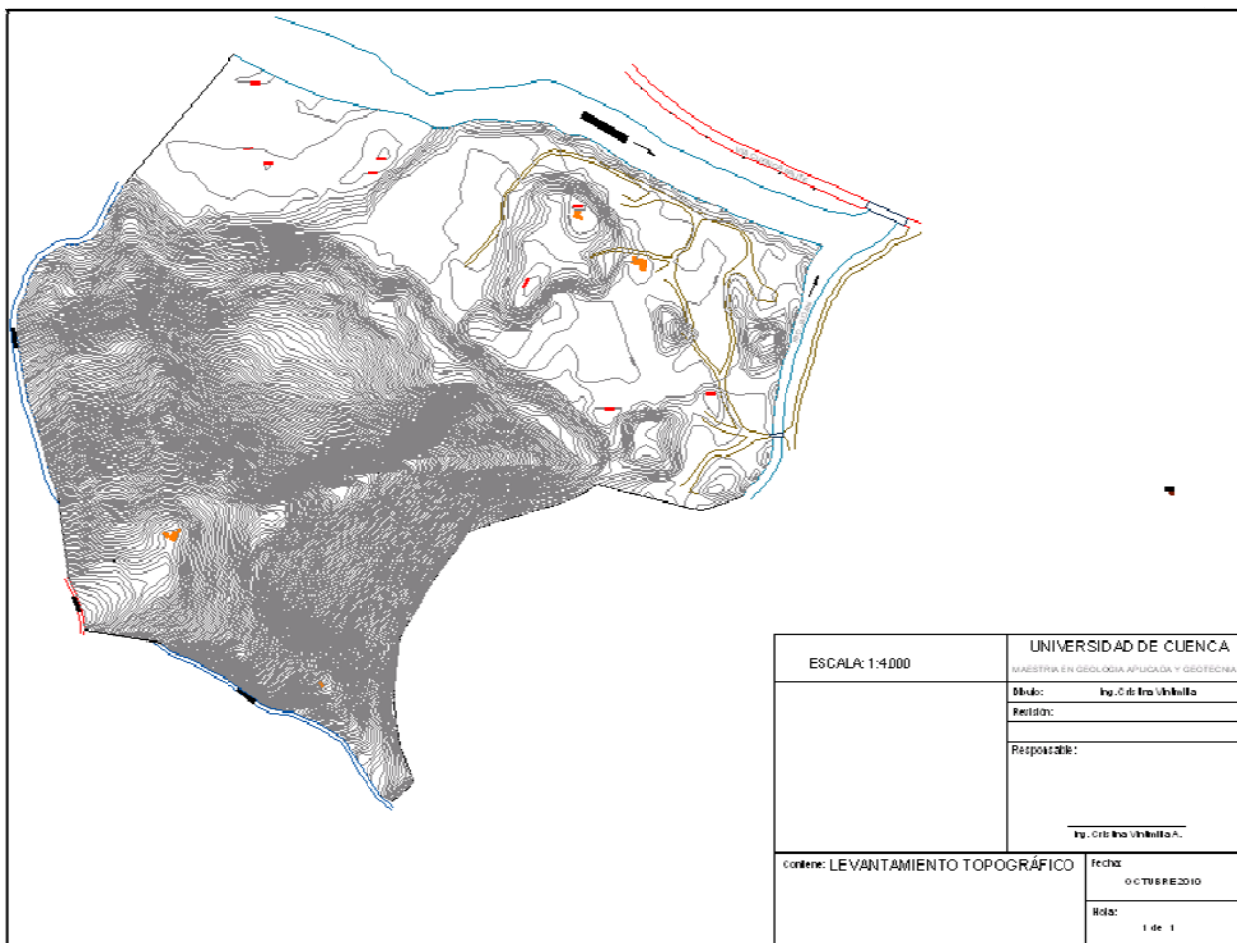


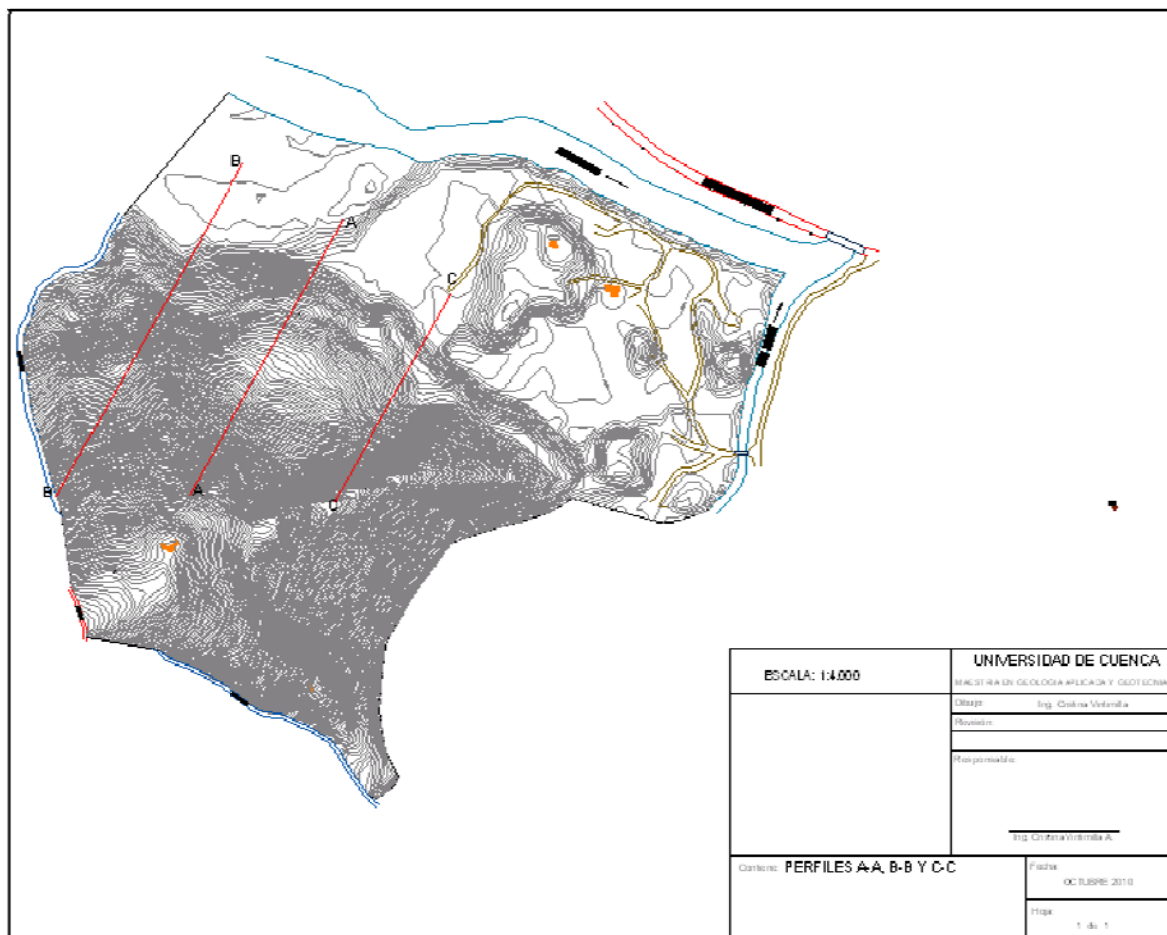
UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **ANEXO A**

### **PLANO TOPOGRAFICO Y PERFILES EN PLANTA**

Ing. Cristina Vintimilla A.







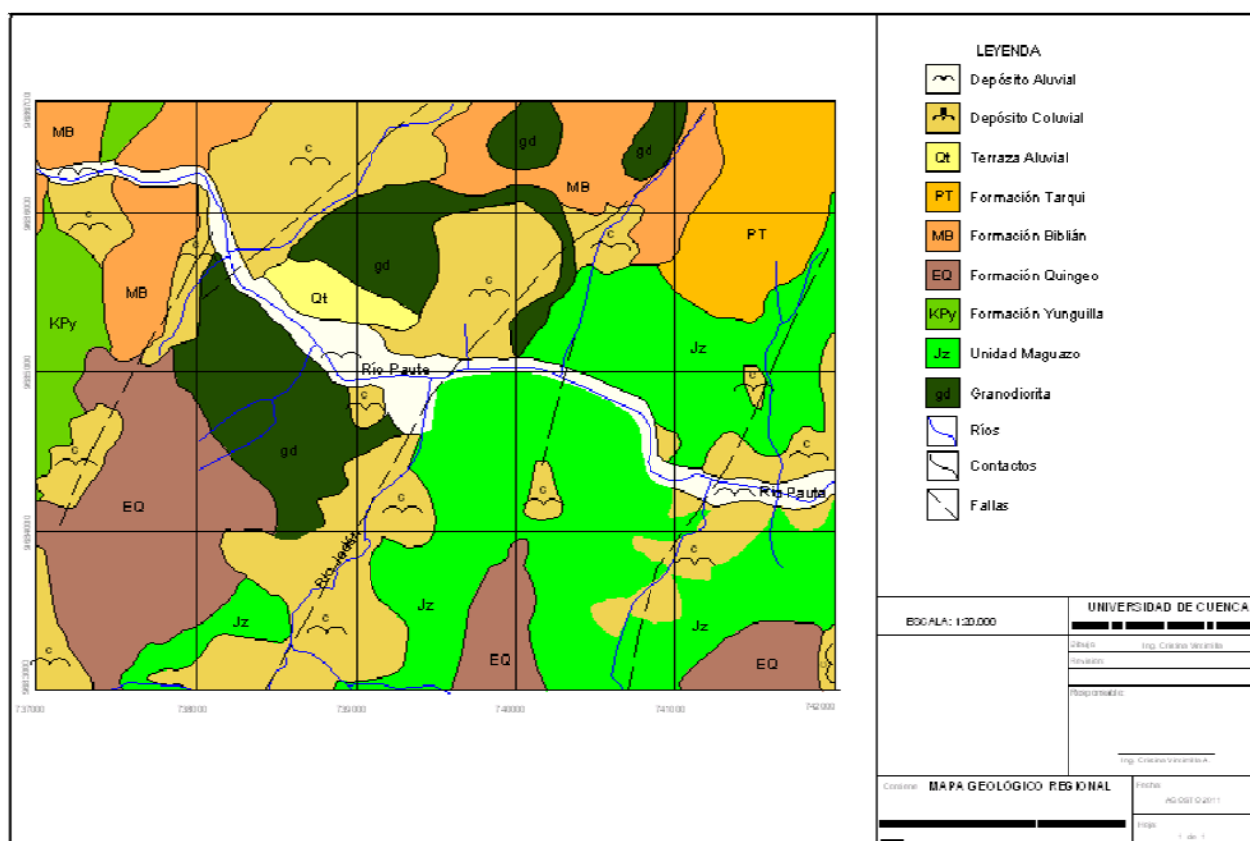
UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

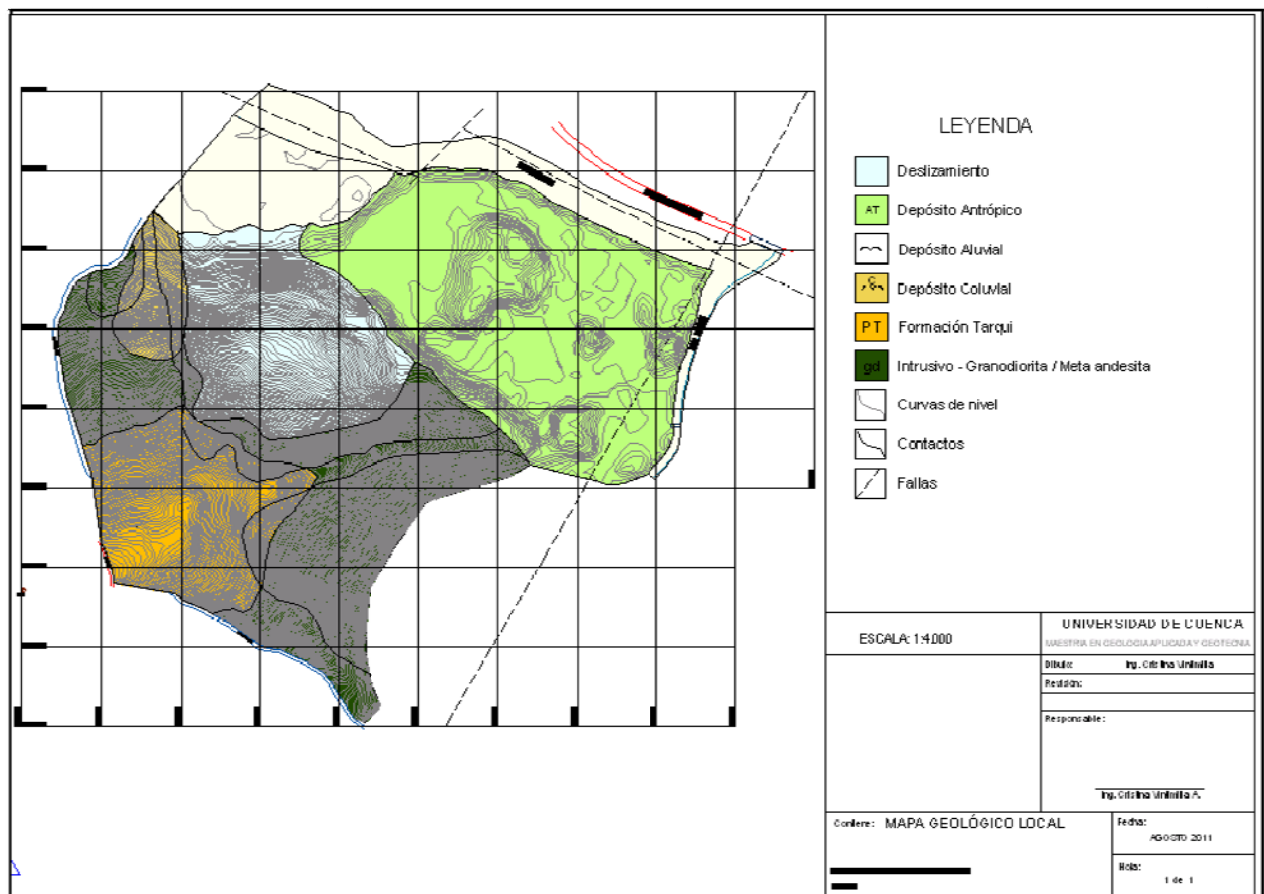
## **ANEXO B**

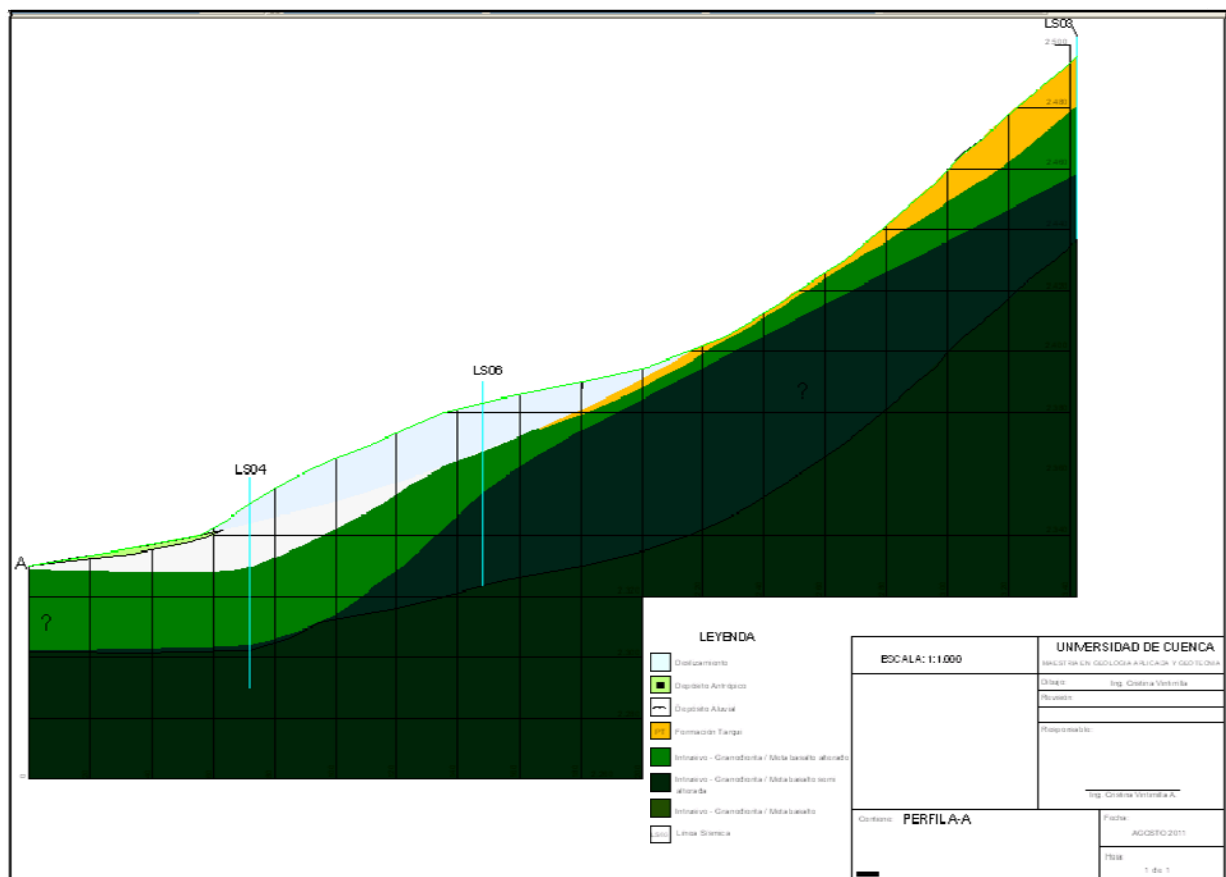
### **MAPA GEOLOGICO REGIONAL, LOCAL Y PERFILES**

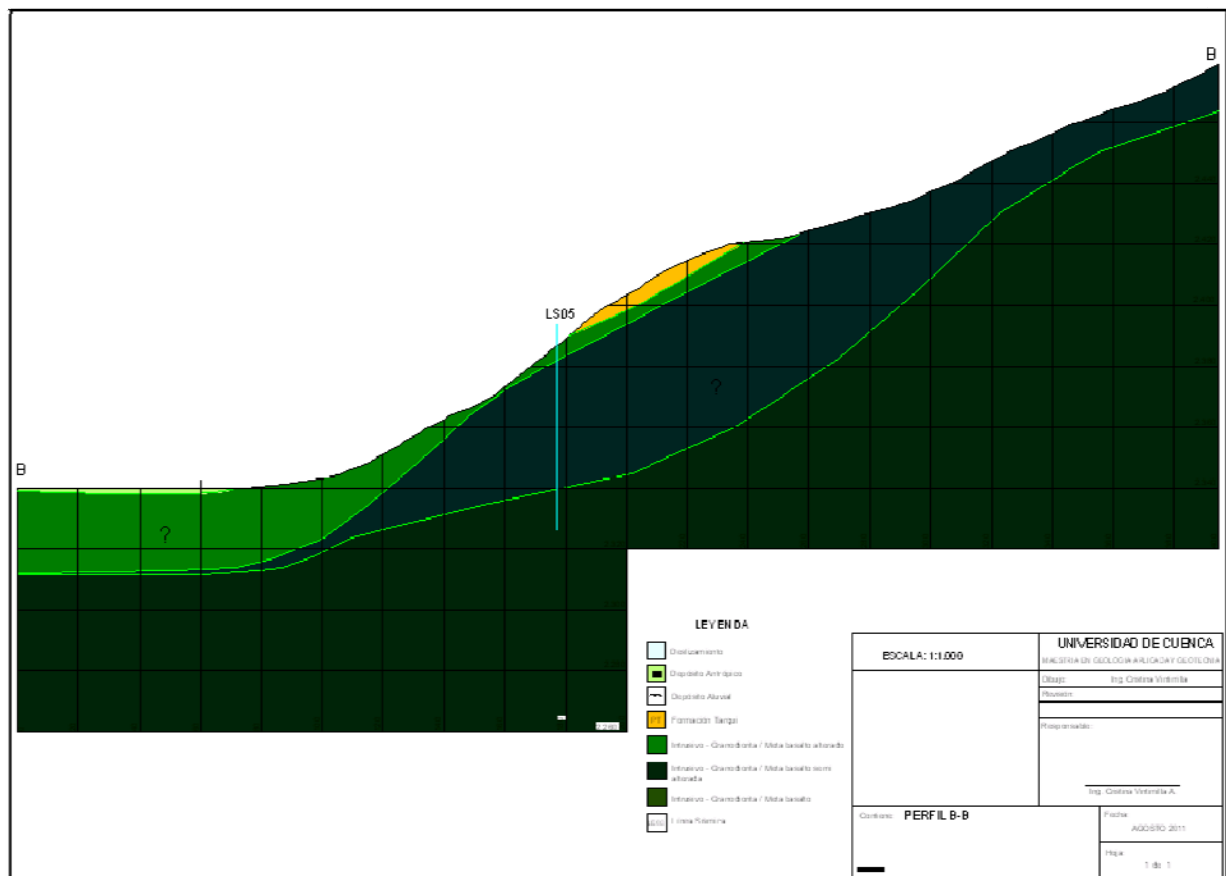
Ing. Cristina Vintimilla A.

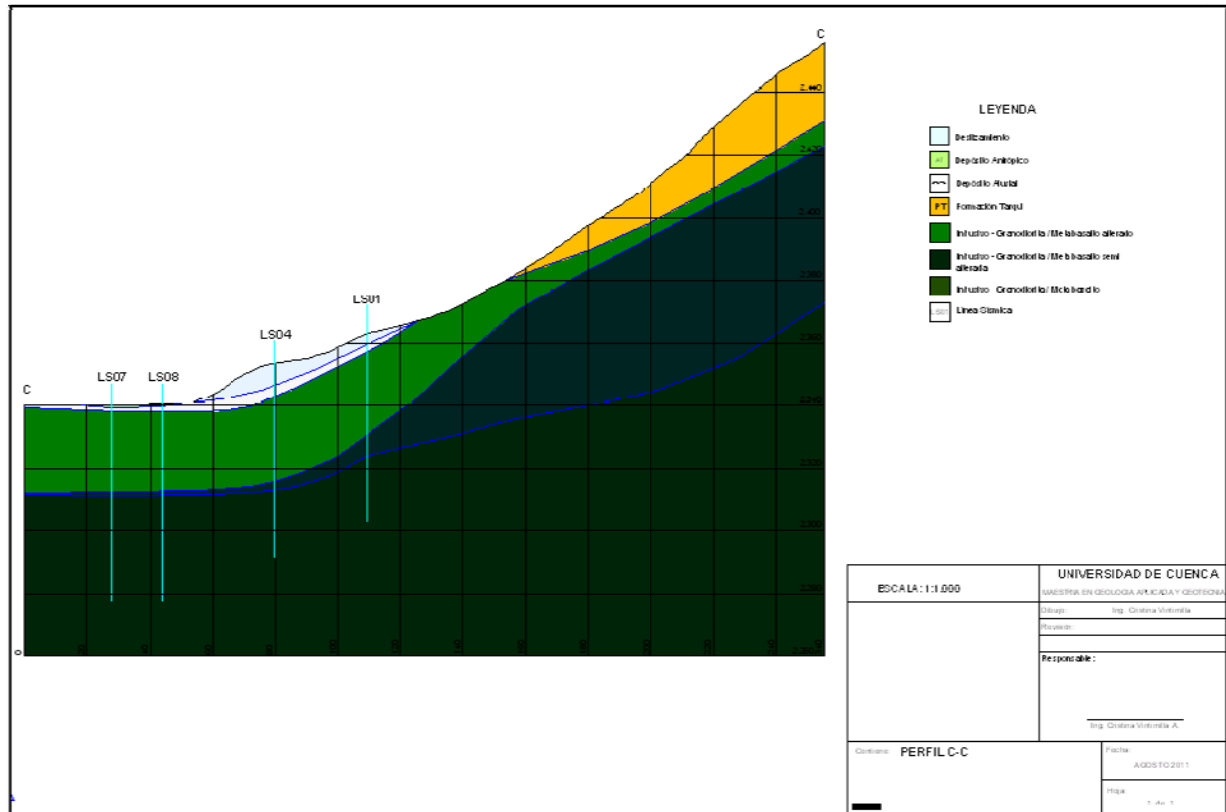












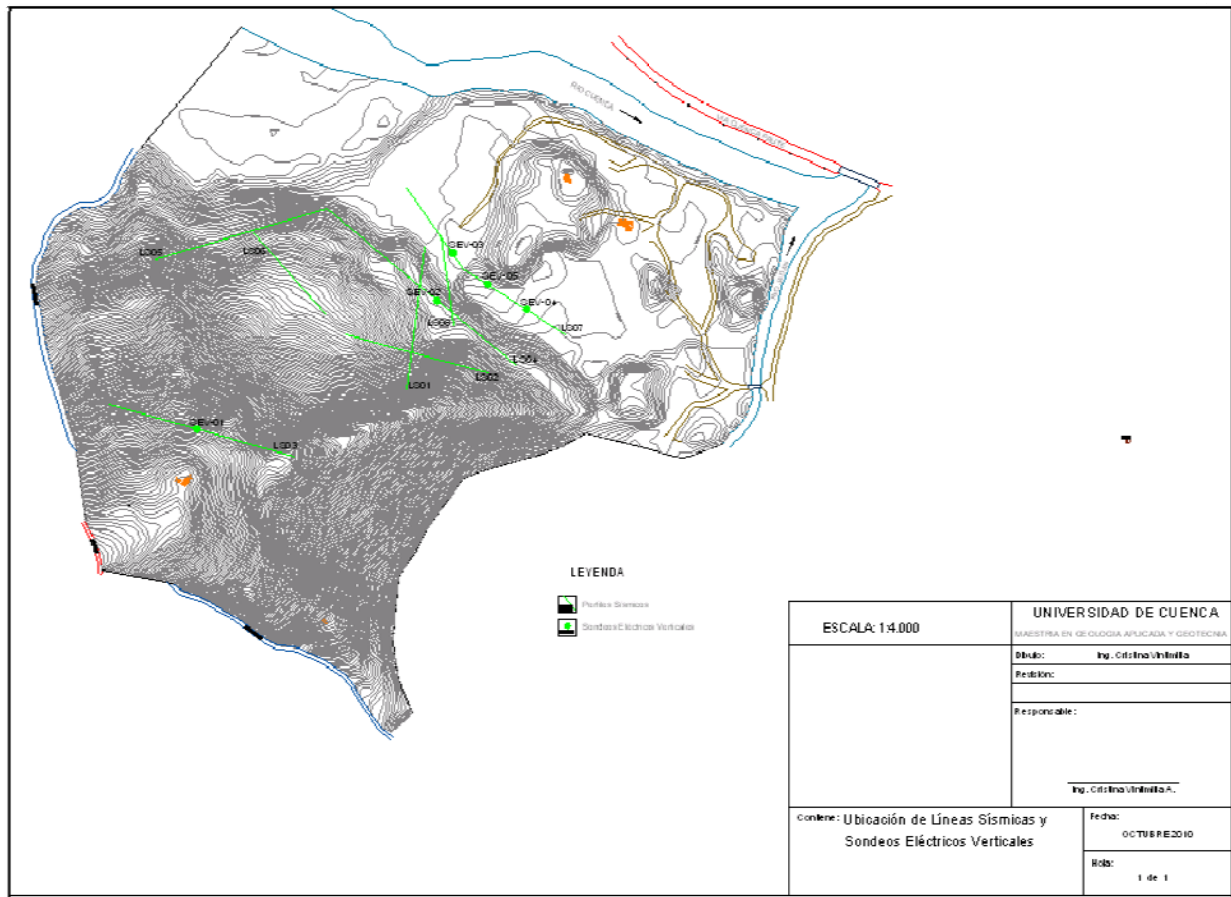


UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **ANEXO C**

### **MAPA DE UBICACIÓN DE LÍNEAS SÍSMICAS Y SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES**

Ing. Cristina Vintimilla A.





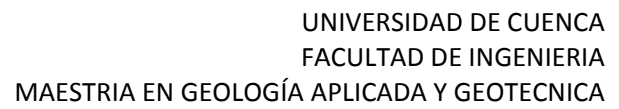


UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **ANEXO D**

### **MAPA DE UBICACIÓN DE CALICATAS**

Ing. Cristina Vintimilla A.





UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

## **ANEXO E**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO**

Ing. Cristina Vintimilla A.



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 1      Fecha: 29 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

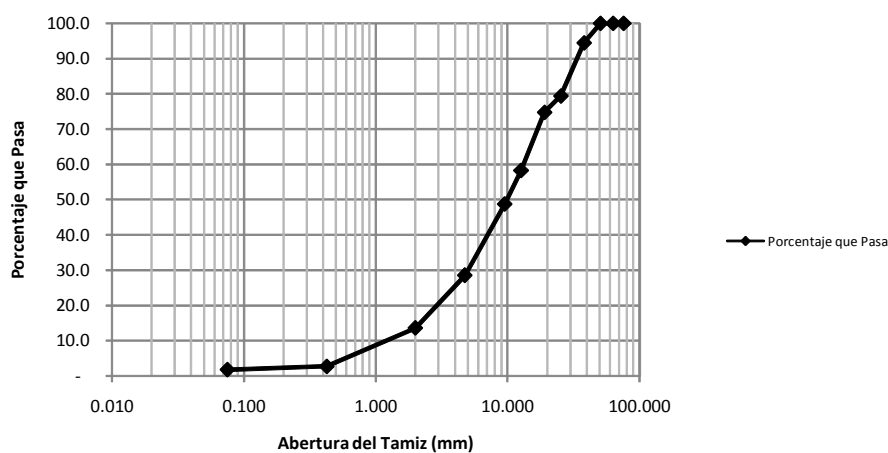
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	84	84	5.6	94.4		
1"	25.400	225	309	20.6	79.4		
3/4 "	19.050	70	379	25.3	74.7		
1/2 "	12.700	247	626	41.8	58.3		
3/8 "	9.525	143	769	51.3	48.7		
Nº 4	4.750	304	1,073	71.5	28.5		
< Nº 4	4.750	1,073	427	(28.5)	28.5		
Nº 10	2.000	261.8	261.8	86.4	13.6		
Nº 40	0.425	190.8	452.6	97.3	2.7		
Nº 200	0.075	17.1	469.7	98.3	(1.7)		
< Nº 200	<0.075	30.1	30.3	(1.7)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

<b>PESO TOTAL DE LA MUESTRA</b>		<b>1,500.00</b>	<b>CUARTEO</b>	
<b>CLASIFICACIÓN</b>		GRAVA = 72%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS GP		ARENA= 27%	Peso total después del lavado	469.70
AASHTO A-1		FINOS = 2%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320





**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 1

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 24/05/2011

Diametro =	0.100 m
Altura =	0.170 m
Volumen =	0.001 m <sup>3</sup>
Peso =	2.07 Kg
Densidad =	1550.36 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 2      Fecha: 29 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

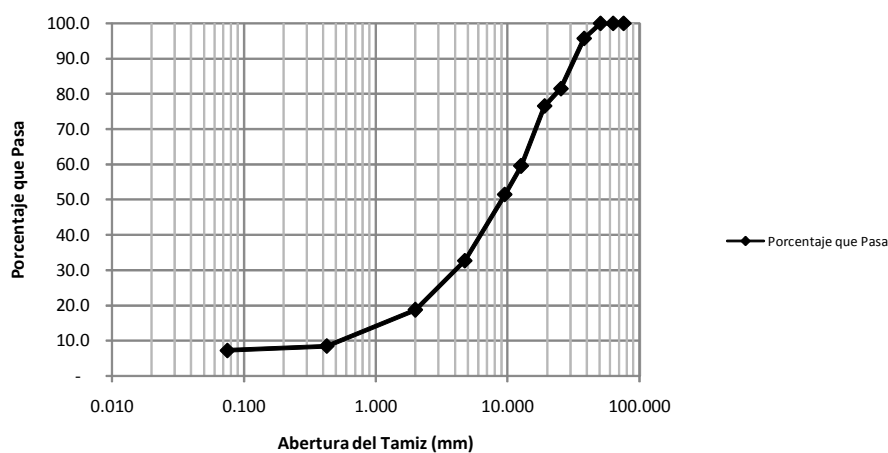
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	65	65	4.3	95.7		
1"	25.400	213	278	18.5	81.5		
3/4 "	19.050	75	353	23.5	76.5		
1/2 "	12.700	255	608	40.5	59.5		
3/8 "	9.525	121	729	48.6	51.4		
Nº 4	4.750	281	1,010	67.3	32.7		
< Nº 4	4.750	1,010	490	(32.7)	32.7		
Nº 10	2.000	214.3	214.3	81.3	18.7		
Nº 40	0.425	156.8	371.1	91.6	8.4		
Nº 200	0.075	18.6	389.7	92.8	(7.2)		
< Nº 200	<0.075	110.1	110.3	(7.2)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		1,500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN				
SUCS	GM	GRAVA = 67%	Peso total antes del lavado	500.00
AASHTO	A - 2	ARENA = 25%	Peso total después del lavado	389.70
		FINOS = 7%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320

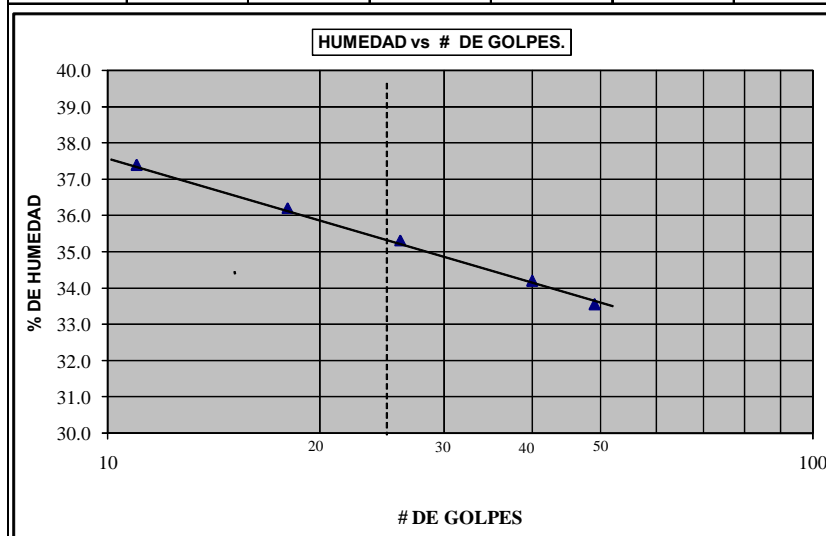




### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 2      Fecha: 29 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
Nº de Tarro	Nº de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
25	----	36.91	33.60	5.50	11.78	12.33
10	----	40.53	36.55	5.68	12.89	
7	----	39.73	36.00	5.74	12.33	
LIMITE LIQUIDO						
22	11	24.81	19.54	5.45	37.40	
24	18	24.5	19.46	5.54	36.21	
18	26	23.89	19.14	5.69	35.32	
20	40	23.36	18.79	5.43	34.21	
15	49	24.12	19.49	5.69	33.55	35.40
LIMITE PLASTICO						
9	----	6.34	6.18	5.67	31.37	27.91
6	----	6.08	5.94	5.42	26.92	
3	----	6.25	6.10	5.51	25.42	



Límite Líquido a 25 golpes = 35.40%      Índice de plasticidad = 7.49  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio  
Uso: Subrasante Natural  
Pozo: 3  
Muestra: 1

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Procedencia: La Josefina  
Fecha: 30 de noviembre de 2010

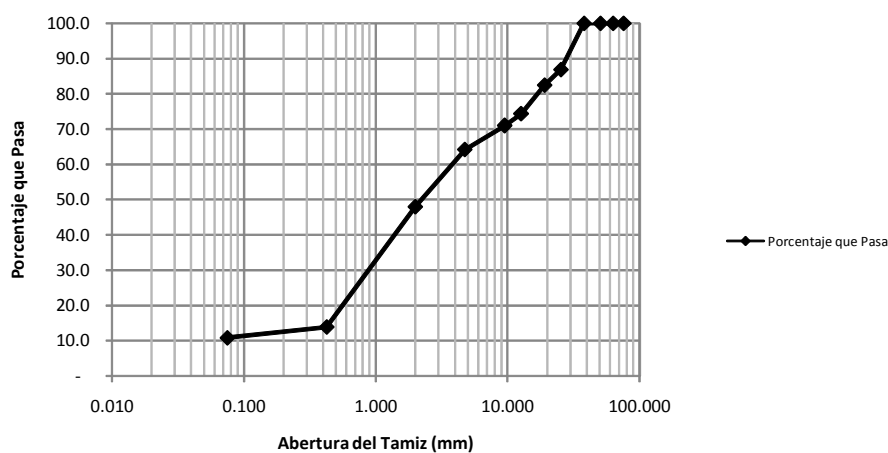
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
3"	76.200	-	-	-	100.0
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0
2"	50.800	-	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0
1"	25.400	197	197	13.2	86.9
3/4 "	19.050	67	264	17.6	82.4
1/2 "	12.700	122	386	25.7	74.3
3/8 "	9.525	51	436	29.1	70.9
Nº 4	4.750	102	538	35.9	64.2
< Nº 4	4.750	538	962	(64.2)	64.2
Nº 10	2.000	242.7	242.7	52.0	48.0
Nº 40	0.425	512.4	755.1	86.2	13.8
Nº 200	0.075	45.0	800.1	89.2	(10.8)
< Nº 200	<0.075	162.0	162.2	(10.8)	

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		1,500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN				
SUCS	SC	GRAVA = 36%	Peso total antes del lavado	962.30
AASHTO	A - 2	ARENA = 53%	Peso total después del lavado	800.10
		FINOS = 11%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 3      Fecha: 30 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

#### HUMEDAD NATURAL

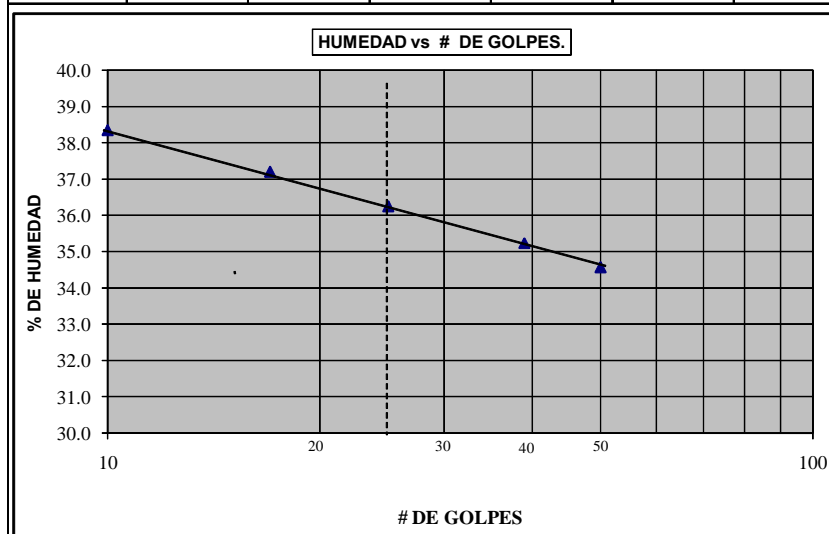
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
1	----	46.75	42.01	5.53	12.99	13.57
21	----	43.89	39.25	5.41	13.71	
2	----	46.70	41.66	5.64	13.99	

#### LIMITE LIQUIDO

21	10	24.42	19.15	5.41	38.36	
5	17	22.95	18.21	5.47	37.21	
23	25	24.44	19.39	5.46	36.25	
11	39	23.75	19.01	5.56	35.24	
20	50	23.84	19.11	5.43	34.58	36.25

#### LIMITE PLASTICO

13	----	6.27	6.16	5.66	22.00	22.75
16	----	6.20	6.10	5.68	23.81	
24	----	6.14	6.03	5.54	22.45	



Límite Líquido a 25 golpes = 36.25%      Índice de plasticidad = 13.50  
Índice de grupo = 0.00

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 4      Fecha: 30 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

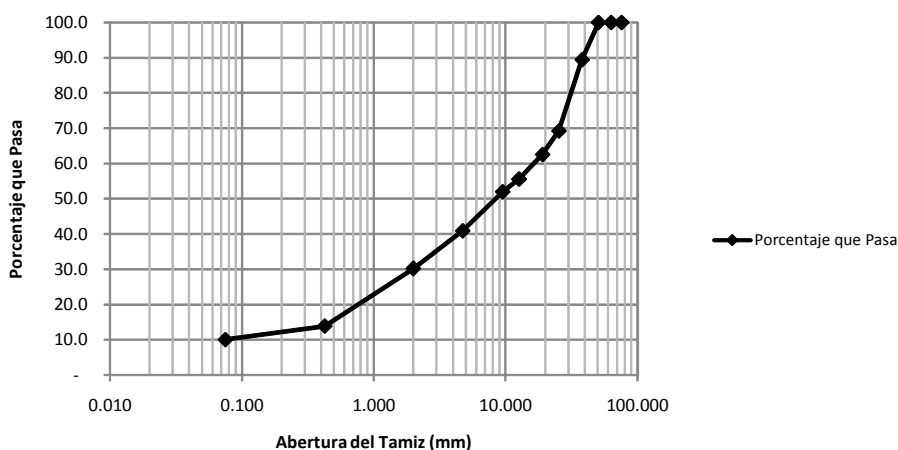
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	159	159	10.6	89.4		
1"	25.400	303	462	30.8	69.2		
3/4 "	19.050	100	562	37.5	62.6		
1/2 "	12.700	105	667	44.4	55.6		
3/8 "	9.525	54	720	48.0	52.0		
Nº 4	4.750	167	887	59.1	40.9		
< Nº 4	4.750	887	613	(40.9)	40.9		
Nº 10	2.000	131.4	131.4	69.9	30.1		
Nº 40	0.425	199.3	330.7	86.2	13.8		
Nº 200	0.075	46.6	377.3	90.0	(10.0)		
< Nº 200	<0,075	122.5	122.7	(10.0)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		1,500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN	GRAVA =	59%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS GM	ARENA=	31%	Peso total después del lavado	377.30
AASHTO A - 2	FINOS =	10%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



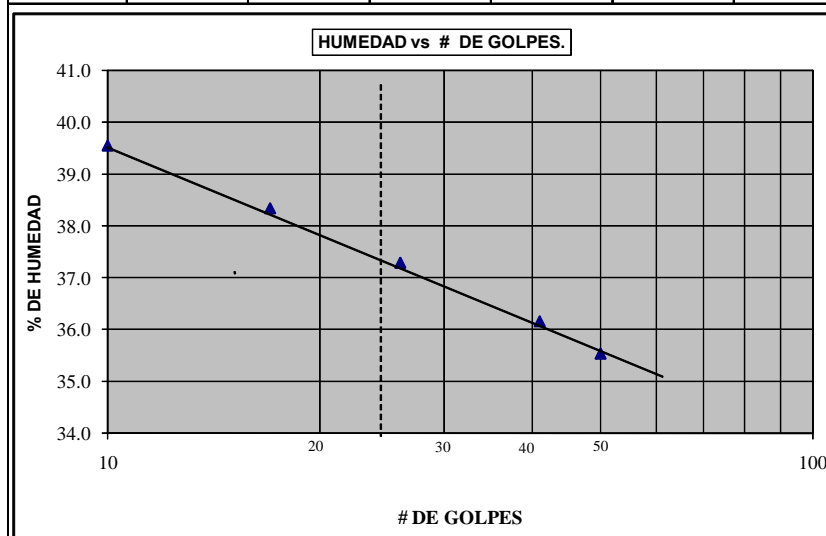
ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 4      Fecha: 30 de noviembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
Nº de Tarro	Nº de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
25	----	34.04	31.73	5.50	8.81	8.74
16	----	39.02	36.23	5.68	9.13	
11	----	38.17	35.68	5.56	8.27	
LIMITE LIQUIDO						
6	10	23.52	18.39	5.42	39.55	
3	17	26.87	20.95	5.51	38.34	
17	26	23.68	18.75	5.53	37.29	
1	41	22.40	17.92	5.53	36.16	
5	50	23.55	18.81	5.47	35.53	37.40
LIMITE PLASTICO						
2	----	6.37	6.22	5.64	25.86	25.26
21	----	6.14	6.00	5.41	23.73	
15	----	6.22	6.11	5.69	26.19	



Límite Líquido a 25 golpes = 37.40%      Índice de plasticidad = 12.14  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 4

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 25/05/2011

Diametro =	0.100 m
Altura =	0.170 m
Volumen =	0.001 m <sup>3</sup>
Peso =	2.04 Kg
Densidad =	1527.89 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 5      Fecha: 6 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

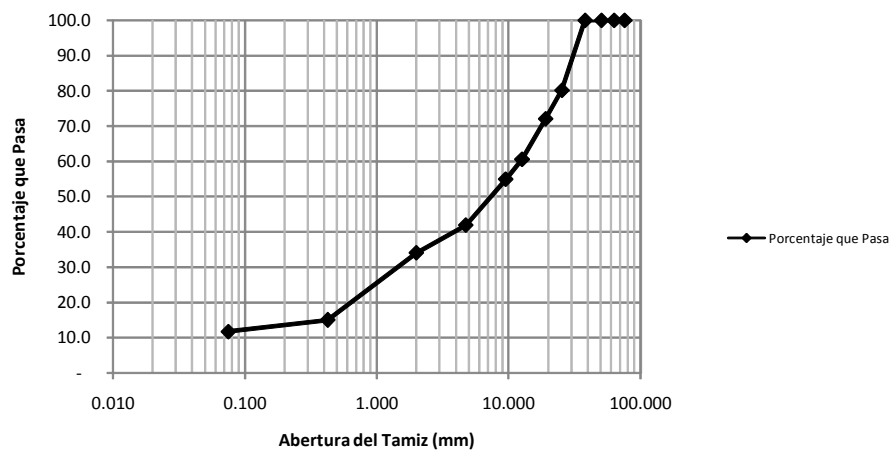
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0		
1"	25.400	298	298	19.9	80.1		
3/4 "	19.050	122	420	28.0	72.0		
1/2 "	12.700	171	591	39.4	60.6		
3/8 "	9.525	86	677	45.1	54.9		
Nº 4	4.750	195	872	58.1	41.9		
< Nº 4	4.750	872	628	(41.9)	41.9		
Nº 10	2.000	93.5	93.5	66.0	34.0		
Nº 40	0.425	227.8	321.3	85.0	15.0		
Nº 200	0.075	39.4	360.7	88.3	(11.7)		
< Nº 200	<0.075	139.3	139.3	(11.7)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

<b>PESO TOTAL DE LA MUESTRA</b>		<b>1,500.00</b>	<b>CUARTEO</b>	
<b>CLASIFICACIÓN</b>	GRAVA =	58%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS GC	ARENA=	30%	Peso total después del lavado	360.70
AASHTO A - 2	FINOS =	12%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320

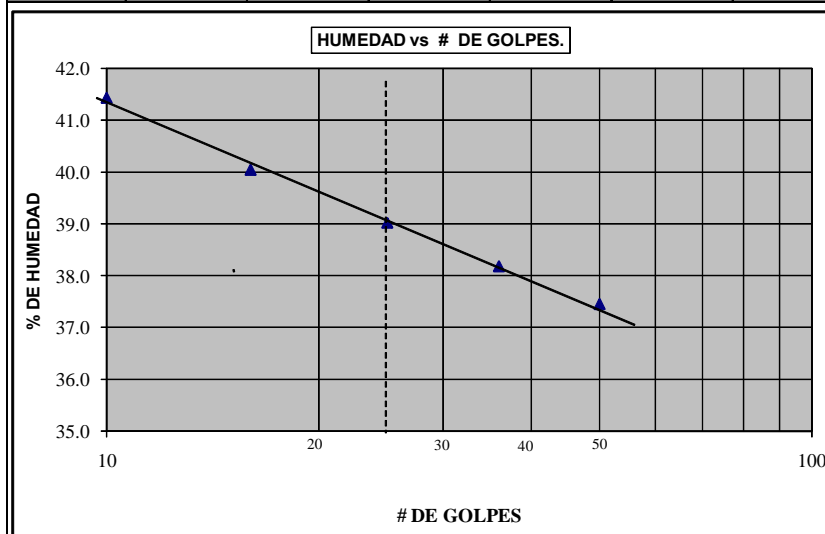




### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 5      Fecha: 6 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
6	----	39.40	36.85	5.42	8.11	8.47
23	----	37.09	34.56	5.46	8.69	
10	----	38.88	36.25	5.68	8.60	
LIMITE LIQUIDO						
7	10	26.46	20.39	5.74	41.43	
25	16	24.42	19.01	5.50	40.04	
13	25	23.90	18.78	5.66	39.02	
23	36	24.17	19.00	5.46	38.18	
10	50	24.14	19.11	5.68	37.45	39.02
LIMITE PLASTICO						
16	----	6.68	6.49	5.68	23.46	23.11
11	----	6.43	6.27	5.56	22.54	
4	----	6.36	6.22	5.62	23.33	



Límite Líquido a 25 golpes = 39.02%      Índice de plasticidad = 15.91  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio  
Uso: Subrasante Natural  
Pozo: 6  
Muestra: 1

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Procedencia: La Josefina  
Fecha: 6 de diciembre de 2010

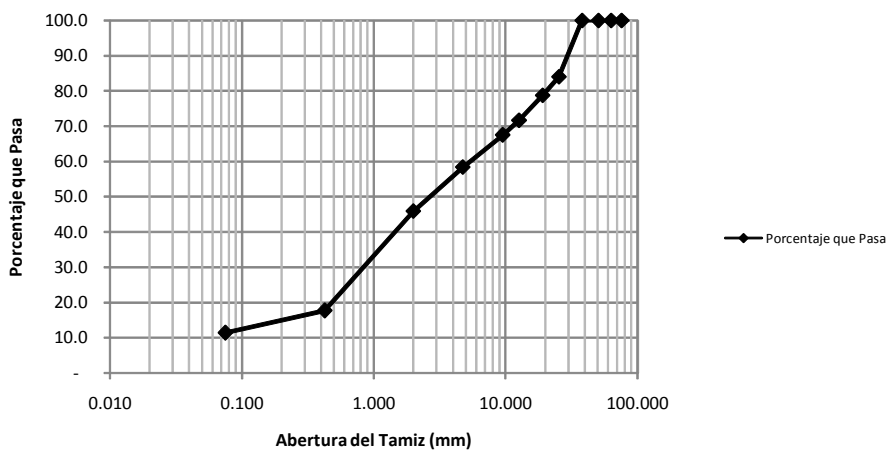
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
3"	76.200	-	-	-	100.0
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0
2"	50.800	-	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0
1"	25.400	241	241	16.1	83.9
3/4 "	19.050	79	320	21.3	78.7
1/2 "	12.700	106	425	28.3	71.7
3/8 "	9.525	63	488	32.6	67.5
Nº 4	4.750	136	625	41.6	58.4
< Nº 4	4.750	625	875	(58.4)	58.4
Nº 10	2.000	107.2	107.2	54.2	45.8
Nº 40	0.425	241.6	348.8	82.4	17.6
Nº 200	0.075	53.9	402.7	88.6	(11.4)
< Nº 200	<0.075	96.9	97.3	(11.4)	

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		1,500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN	GRAVA =	42%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS SM	ARENA=	47%	Peso total después del lavado	402.70
AASHTO A - 1	FINOS =	11%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320

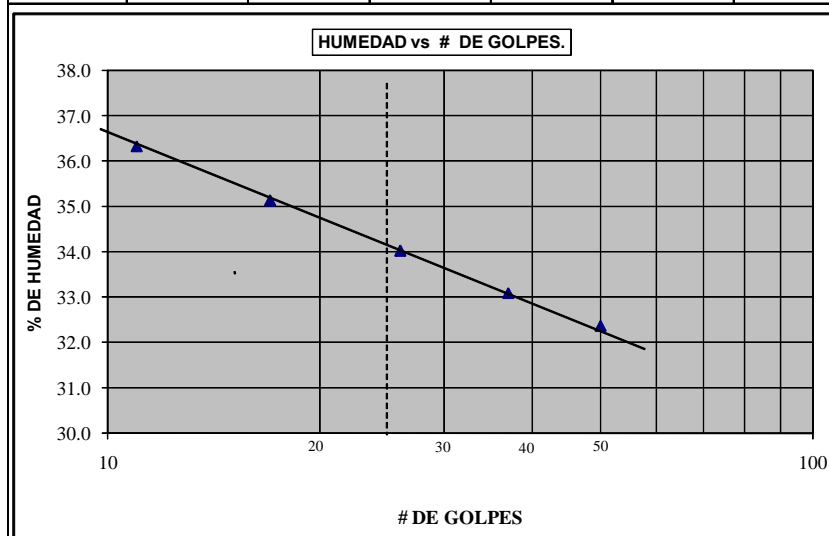
Ing. Cristina Vintimilla A.



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 6      Fecha: 6 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
24	----	34.00	31.42	5.54	9.97	9.75
13	----	34.16	31.69	5.66	9.49	
6	----	32.31	29.91	5.42	9.80	
LIMITE LIQUIDO						
10	11	23.88	19.03	5.68	36.33	
4	17	24.62	19.68	5.62	35.14	
12	26	23.14	18.73	5.77	34.03	
15	37	24.19	19.59	5.69	33.09	
20	50	23.75	19.27	5.43	32.37	34.10
LIMITE PLASTICO						
1	----	6.32	6.13	5.53	31.67	30.95
2	----	6.19	6.06	5.64	30.95	
8	----	6.24	6.11	5.68	30.23	



Límite Líquido a 25 golpes = 34.10%      Índice de plasticidad = 3.15  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio  
Uso: Subrasante Natural  
Pozo: 7  
Muestra: 1

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Procedencia: La Josefina  
Fecha: 7 de diciembre de 2010

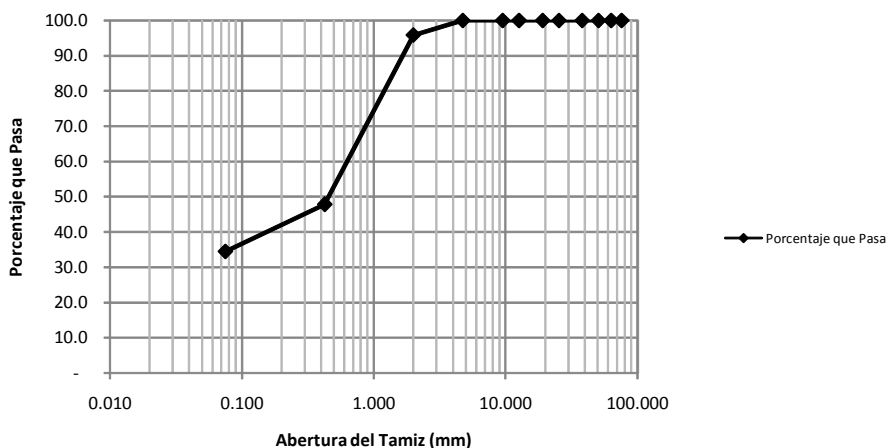
NORMAS: AASHTO T-11 T-27 ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA
3"	76.200	-	-	-	100.0
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0
2"	50.800	-	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	-	100.0
3/4 "	19.050	-	-	-	100.0
1/2 "	12.700	-	-	-	100.0
3/8 "	9.525	-	-	-	100.0
Nº 4	4.750	-	-	-	100.0
< Nº 4	4.750	-	500	(100.0)	100.0
Nº 10	2.000	21.1	21.1	4.2	95.8
Nº 40	0.425	240.1	261.2	52.2	47.8
Nº 200	0.075	66.7	327.9	65.6	(34.4)
< Nº 200	<0,075	171.9	172.1	(34.4)	

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN	GRAVA =	0%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS SM	ARENA=	66%	Peso total después del lavado	327.90
AASHTO A - 1	FINOS =	34%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320

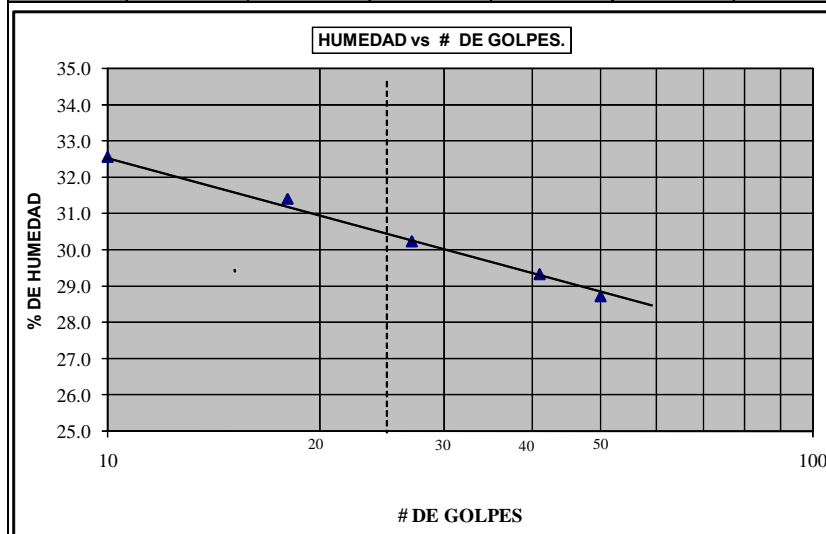
Ing. Cristina Vintimilla A.



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 7      Fecha: 7 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
Nº de Tarro	Nº de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
4	----	48.75	45.90	5.62	7.08	7.48
12	----	49.97	46.92	5.77	7.41	
20	----	48.78	45.59	5.43	7.94	
LIMITE LIQUIDO						
1	10	23.89	19.38	5.53	32.56	
7	18	23.52	19.27	5.74	31.41	
25	27	23.12	19.03	5.50	30.23	
2	41	24.25	20.03	5.64	29.33	
10	50	23.16	19.26	5.68	28.72	30.50
LIMITE PLASTICO						
3	----	6.19	6.05	5.51	25.93	25.22
23	----	6.28	6.12	5.46	24.24	
9	----	6.31	6.18	5.67	25.49	



Límite Líquido a 25 golpes = 30.50%      Índice de plasticidad = 5.28  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 7

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 26/05/2011

Diametro =	0.100 m
Altura =	0.170 m
Volumen =	0.001 m <sup>3</sup>
Peso =	2.09 Kg
Densidad =	1565.34 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 8      Fecha: 7 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

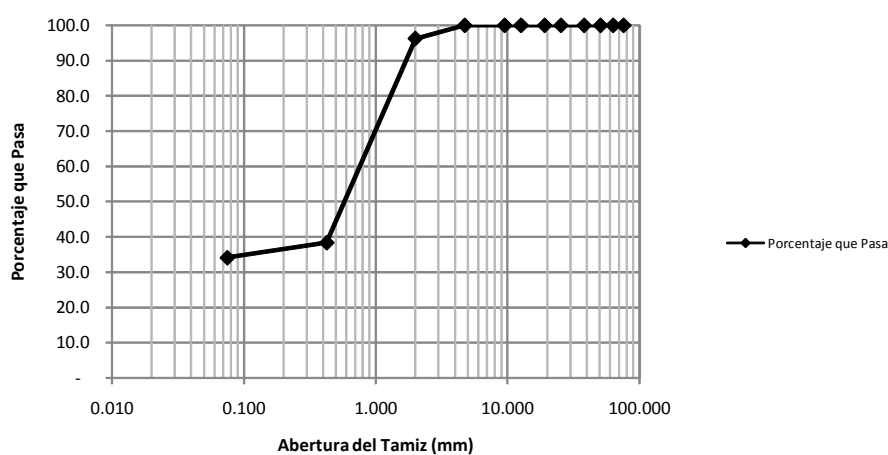
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0		
1"	25.400	-	-	-	100.0		
3/4 "	19.050	-	-	-	100.0		
1/2 "	12.700	-	-	-	100.0		
3/8 "	9.525	-	-	-	100.0		
Nº 4	4.750	-	-	-	100.0		
< Nº 4	4.750	-	500	(100.0)	100.0		
Nº 10	2.000	19.0	19.0	3.8	96.2		
Nº 40	0.425	289.4	308.4	61.7	38.3		
Nº 200	0.075	21.3	329.7	65.9	(34.1)		
< Nº 200	<0.075	170.0	170.3	(34.1)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN				
SUCS	SC	GRAVA = 0%	Peso total antes del lavado	500.00
AASHTO	A - 2	ARENA = 66%	Peso total después del lavado	329.70
		FINOS = 34%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



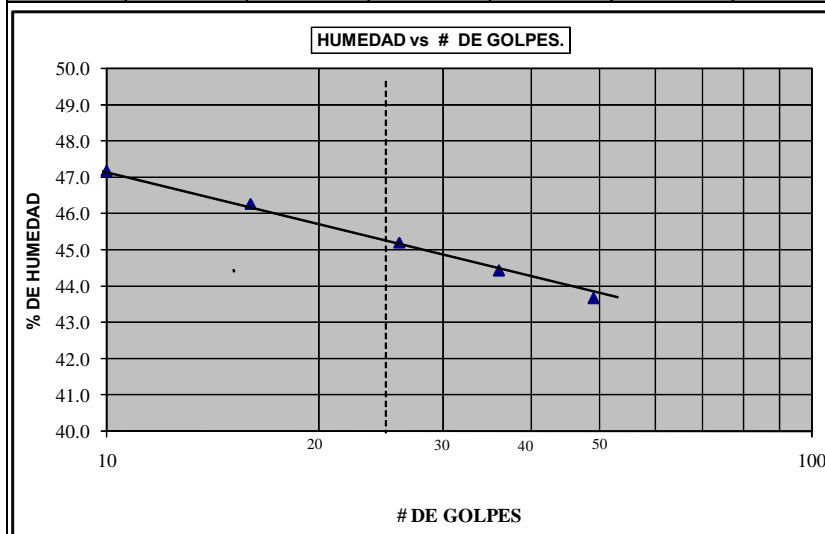
**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 8      Fecha: 7 de diciembre de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
Nº de Tarro	Nº de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
5	----	36.34	31.40	5.47	19.05	19.57
3	----	35.85	30.80	5.51	19.97	
23	----	38.04	32.68	5.46	19.69	
LIMITE LIQUIDO						
6	10	23.42	17.65	5.42	47.18	45.25
22	16	22.71	17.25	5.45	46.27	
4	26	22.42	17.19	5.62	45.20	
7	36	22.09	17.06	5.74	44.43	
10	49	22.46	17.36	5.68	43.66	
LIMITE PLASTICO						
2	----	6.25	6.13	5.64	24.49	25.65
25	----	6.45	6.25	5.50	26.67	
1	----	6.31	6.15	5.53	25.81	



Límite Líquido a 25 golpes = 45.25%      Índice de plasticidad = 19.60  
Índice de grupo = 1.80

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320





**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 8

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 27/05/2011

Diametro =	0.100 m
Altura =	0.170 m
Volumen =	0.001 m <sup>3</sup>
Peso =	1.77 Kg
Densidad =	1325.67 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio de Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 9      Fecha: 14 de mayo de 2010  
Muestra: 1

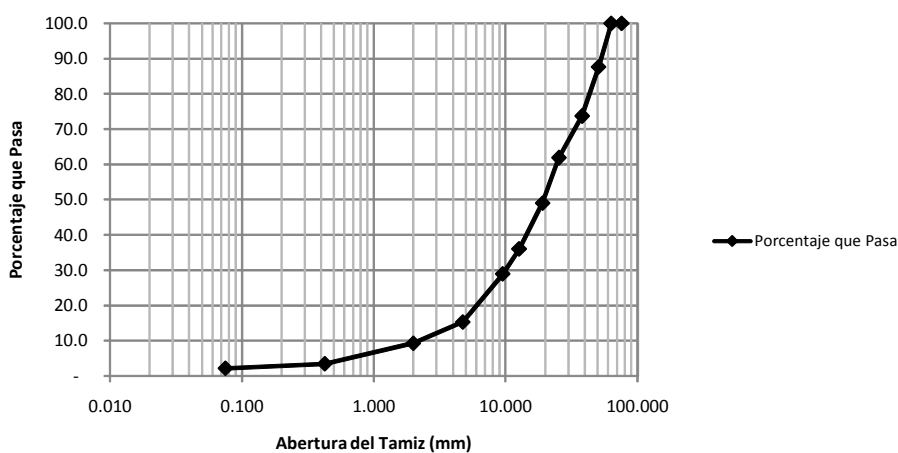
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	1,903	1,903	12.4	87.6		
1 1/2"	38.100	2,131	4,034	26.4	73.6		
1"	25.400	1,812	5,846	38.2	61.8		
3/4 "	19.050	1,955	7,801	51.0	49.0		
1/2 "	12.700	1,996	9,797	64.0	36.0		
3/8 "	9.525	1,087	10,884	71.1	28.9		
Nº 4	4.750	2,074	12,958	84.7	15.3		
< Nº 4	4.750	12,958	2,344	(15.3)	15.3		
Nº 10	2.000	193.9	193.9	90.7	9.3		
Nº 40	0.425	188.0	381.9	96.6	3.4		
Nº 200	0.075	40.8	422.7	97.9	(2.1)		
< Nº 200	<0,075	67.6	67.6	(2.1)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		15,302.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN				
SUCS	GP	GRAVA = 85%	Peso total antes del lavado	490.30
AASHTO	A - 1	ARENA = 13%	Peso total después del lavado	422.70
		FINOS = 2%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



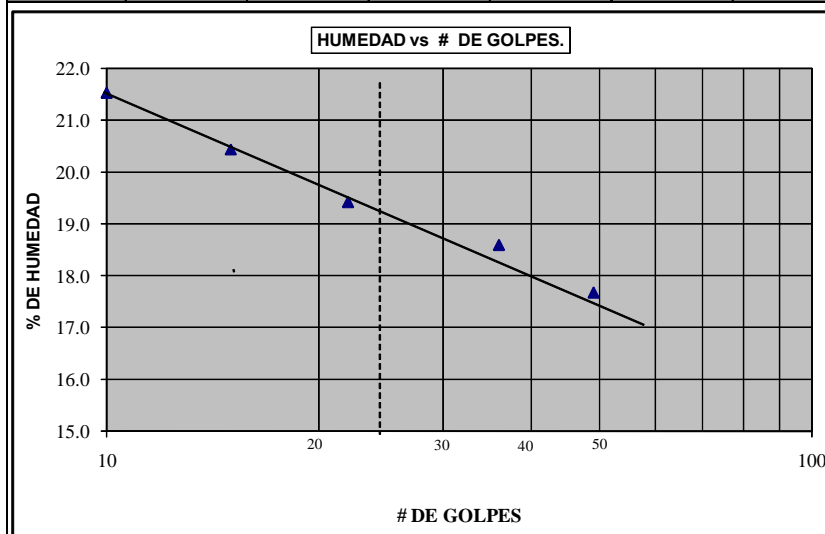
**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio de Geotecnico del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 9      Fecha: 14 de mayo de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
1	----	29.41	27.65	5.53	7.96	7.74
17	----	31.05	29.25	5.53	7.59	
4	----	30.46	28.69	5.62	7.67	
LIMITE LIQUIDO						
6	10	24.44	21.07	5.42	21.53	
5	15	24.62	21.37	5.47	20.44	
25	22	25.24	22.03	5.50	19.42	
3	36	23.37	20.57	5.51	18.59	
7	49	24.98	22.09	5.74	17.68	19.30
LIMITE PLASTICO						
23	----	6.21	6.12	5.46	13.64	14.39
24	----	6.08	6.01	5.54	14.89	
14	----	6.12	6.06	5.65	14.63	



Límite Líquido a 25 golpes = 19.30%      Índice de plasticidad = 4.91  
Índice de grupo = 0.00

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 10      Fecha: 14 de mayo de 2010  
Muestra: 1

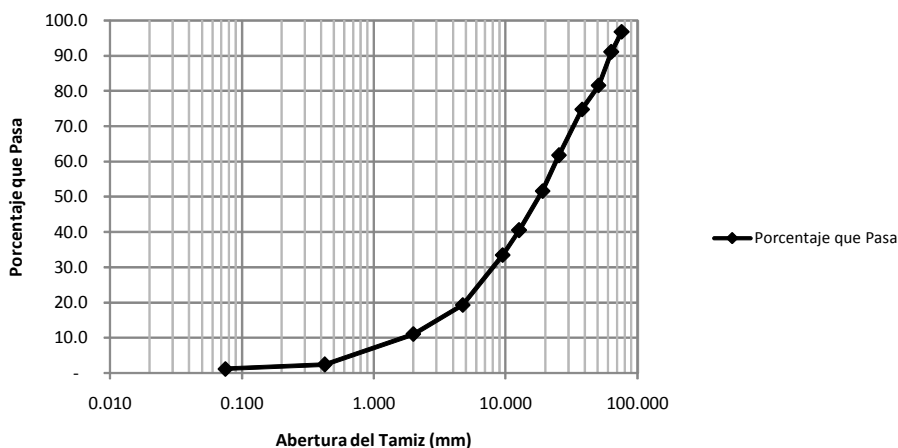
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	617	617	3.3	96.8		
2 1/2"	63.500	1,092	1,709	9.0	91.0		
2"	50.800	1,802	3,511	18.5	81.5		
1 1/2"	38.100	1,289	4,800	25.3	74.7		
1"	25.400	2,487	7,287	38.3	61.7		
3/4 "	19.050	1,914	9,201	48.4	51.6		
1/2 "	12.700	2,119	11,320	59.6	40.4		
3/8 "	9.525	1,334	12,654	66.6	33.4		
Nº 4	4.750	2,688	15,342	80.7	19.3		
< Nº 4	4.750	15,342	3,663	(19.3)	19.3		
Nº 10	2.000	211.0	211.0	89.0	11.0		
Nº 40	0.425	221.5	432.5	97.7	2.3		
Nº 200	0.075	31.0	463.5	98.9	(1.1)		
< Nº 200	<0,075	28.9	29.0	(1.1)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		19,005.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN	GRAVA =	81%	Peso total antes del lavado	492.50
SUCS GP	ARENA=	18%	Peso total después del lavado	463.50
AASHTO A - 2	FINOS =	1%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



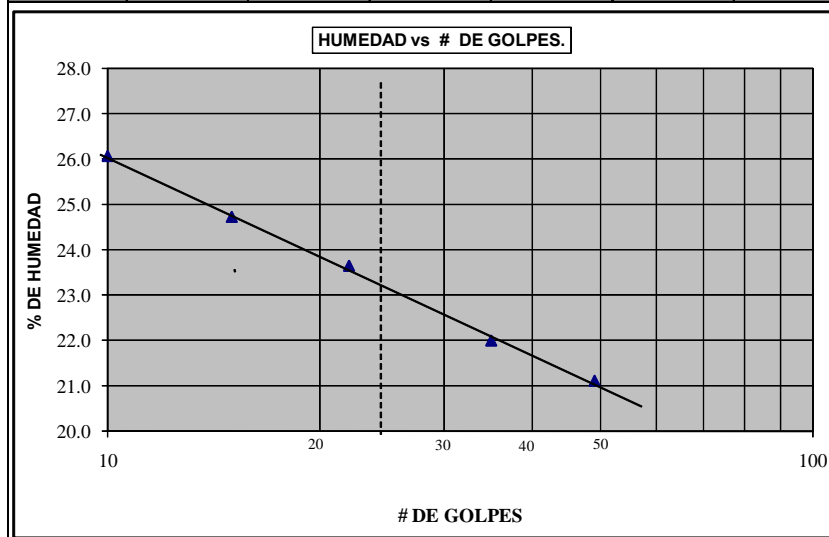
ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 10      Fecha: 14 de mayo de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
1	----	29.80	27.95	5.53	8.25	8.11
3	----	32.08	30.04	5.51	8.32	
8	----	30.15	28.39	5.68	7.75	
LIMITE LIQUIDO						
2	10	23.29	19.64	5.64	26.07	
7	15	24.2	20.54	5.74	24.73	
5	22	27.43	23.23	5.47	23.65	
15	35	25.71	22.10	5.69	22.00	
6	49	27.10	23.32	5.42	21.12	23.30
LIMITE PLASTICO						
24	----	5.85	5.81	5.54	16.98	16.92
25	----	6.21	6.11	5.50	16.39	
11	----	6.37	6.25	5.56	17.39	



Límite Líquido a 25 golpes = 23.30%      Índice de plasticidad = 6.38  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 11      Fecha: 16 de mayo de 2010  
Muestra: 1

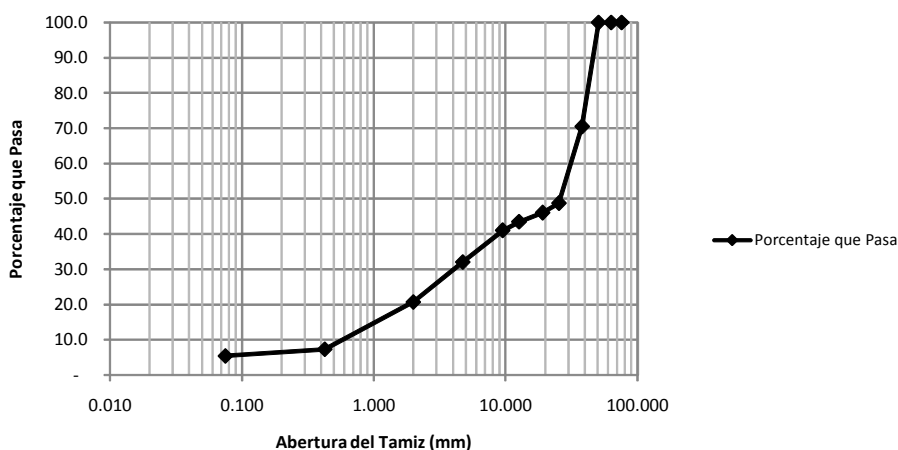
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	739	739	29.6	70.4		
1"	25.400	544	1,283	51.3	48.7		
3/4 "	19.050	68	1,351	54.0	46.0		
1/2 "	12.700	64	1,415	56.6	43.4		
3/8 "	9.525	62	1,476	59.1	41.0		
Nº 4	4.750	224	1,700	68.0	32.0		
< Nº 4	4.750	1,700	800	(32.0)	32.0		
Nº 10	2.000	176.5	176.5	79.3	20.7		
Nº 40	0.425	210.1	386.6	92.7	7.3		
Nº 200	0.075	29.0	415.6	94.6	(5.4)		
< Nº 200	<0,075	84.8	84.4	(5.4)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		2,500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN	GRAVA =	68%	Peso total antes del lavado	500.00
SUCS GC	ARENA=	27%	Peso total después del lavado	415.60
AASHTO A - 2	FINOS =	5%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



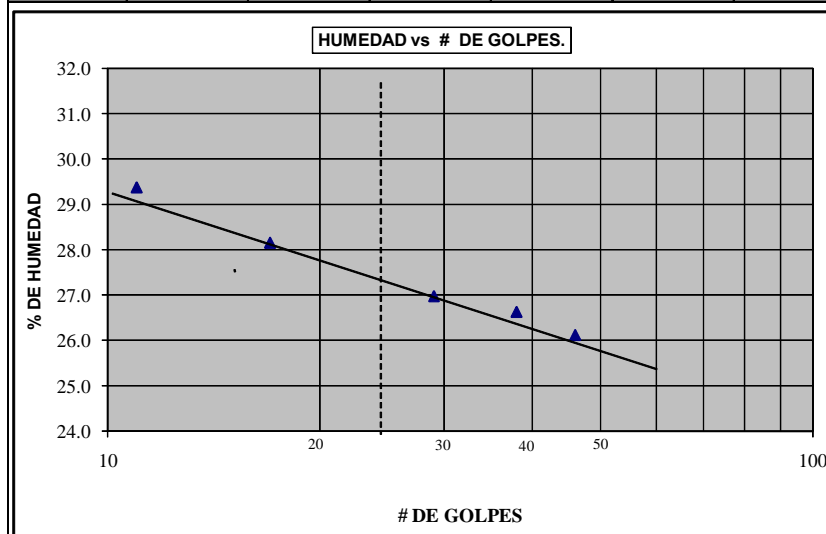
ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 11      Fecha: 16 de mayo de 2010  
Muestra: 1

HUMEDAD NATURAL						
Nº de Tarro	Nº de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
12	----	30.01	27.05	5.77	13.91	15.41
15	----	31.58	28.13	5.69	15.37	
10	----	29.56	26.10	5.68	16.94	
LIMITE LIQUIDO						
16	11	26.16	21.51	5.68	29.37	
19	17	27.57	22.75	5.63	28.15	
3	29	22.08	18.56	5.51	26.97	
8	38	20.85	17.66	5.68	26.63	
21	46	24.24	20.34	5.41	26.12	27.40
LIMITE PLASTICO						
17	----	6.20	6.10	5.53	17.54	18.69
12	----	6.25	6.17	5.77	20.00	
5	----	6.11	6.01	5.47	18.52	



Límite Líquido a 25 golpes = 27.40%      Índice de plasticidad = 8.71  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 11

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 20/05/2011

Diametro =	0.149 m
Altura =	0.305 m
Volumen =	0.005 m <sup>3</sup>
Peso =	9.28 Kg
Densidad =	1744.96 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**





**LABORATORIO DE SUELOS**  
**ENSAYO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO**

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 12      Fecha: 16 de mayo de 2010  
Muestra: 1

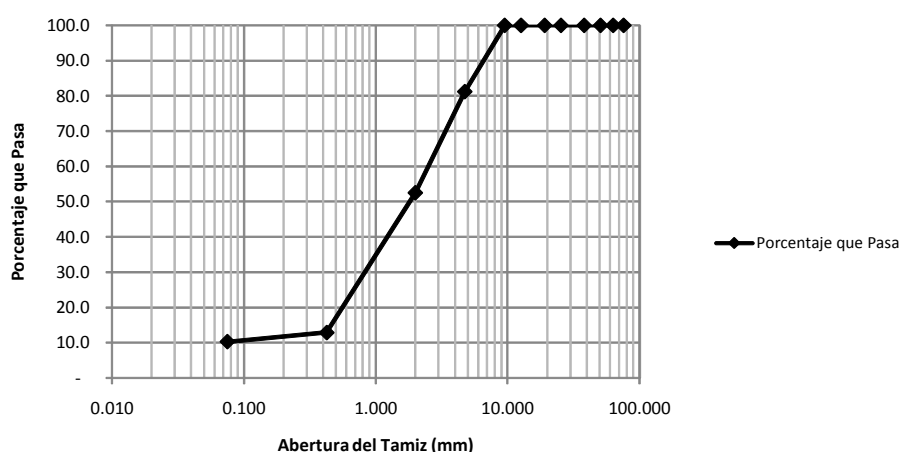
NORMAS: AASHTO T-11 T-27      ASTM: D422-63

TAMIZ (mm)	Pulg.	PESO RETENIDO PARCIAL (g)	PESO RETENIDO ACUMULADO (g)	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO QUE PASA		
3"	76.200	-	-	-	100.0		
2 1/2"	63.500	-	-	-	100.0		
2"	50.800	-	-	-	100.0		
1 1/2"	38.100	-	-	-	100.0		
1"	25.400	-	-	-	100.0		
3/4 "	19.050	-	-	-	100.0		
1/2 "	12.700	-	-	-	100.0		
3/8 "	9.525	-	-	-	100.0		
Nº 4	4.750	94	94	18.8	81.2		
< Nº 4	4.750	94	406	(81.2)	81.2		
Nº 10	2.000	143.5	143.5	47.5	52.5		
Nº 40	0.425	197.9	341.4	87.1	12.9		
Nº 200	0.075	13.3	354.7	89.8	(10.2)		
< Nº 200	<0.075	51.0	51.1	(10.2)			

\* Abertura de los tamices tomado del libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", Braja M. Das, Pg. 8

PESO TOTAL DE LA MUESTRA		500.00	CUARTEO	
CLASIFICACIÓN				
SUCS	SC	GRAVA = 19%	Peso total antes del lavado	405.80
AASHTO	A - 2	ARENA = 71%	Peso total después del lavado	354.70
		FINOS = 10%		

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
CONESUP 1007-05-605320



### LABORATORIO DE SUELOS

Proyecto: Estudio de Estabilidad del Cerro Shishio      Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Uso: Subrasante Natural      Procedencia: La Josefina  
Pozo: 12      Fecha: 16 de mayo de 2010  
Muestra: 1

#### HUMEDAD NATURAL

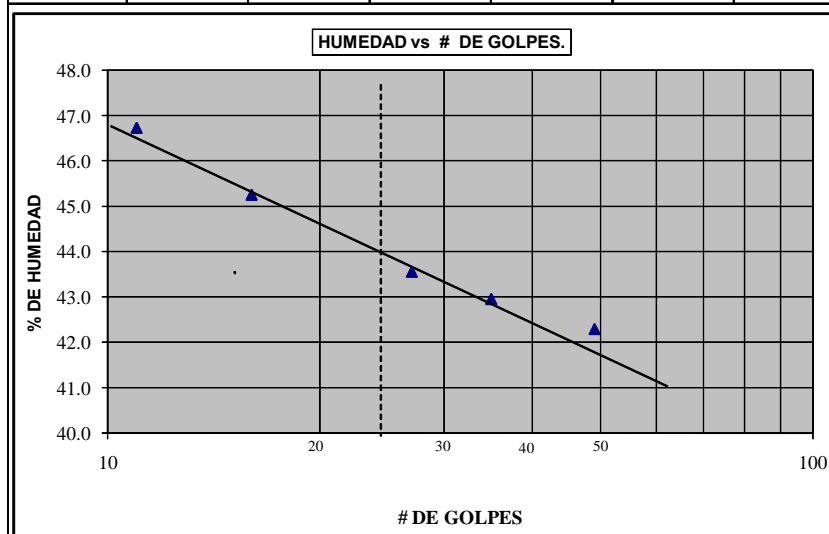
N° de Tarro	N° de golpes	Peso suelo húmedo + tarro	Peso suelo seco + tarro	Peso tarro	% de Humedad	PROMEDIO
3	----	29.41	25.89	5.51	17.27	18.05
19	----	31.22	27.15	5.63	18.91	
7	----	30.81	26.99	5.74	17.98	

#### LIMITE LIQUIDO

15	11	24.31	18.38	5.69	46.73	
12	16	25.06	19.05	5.77	45.26	
23	27	23.85	18.27	5.46	43.56	
17	35	24.10	18.52	5.53	42.96	
20	49	25.28	19.38	5.43	42.29	44.00

#### LIMITE PLASTICO

1	----	6.04	5.94	5.53	24.39	26.42
2	----	6.21	6.09	5.64	26.67	
18	----	6.19	6.08	5.69	28.21	



Límite Líquido a 25 golpes = 44.00%      Índice de plasticidad = 17.58  
Índice de grupo = 0.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



**LABORATORIO DE SUELOS**  
**DETERMINACION DE LA DENSIDAD**

Proyecto: Estudio de Estabilidad de Cerro Shishio  
Procedencia: Sector La Josefina  
Pozo: 12

Calculado: Ing. Cristina Vintimilla  
Fecha: 20/05/2011

Diametro =	0.149 m
Altura =	0.305 m
Volumen =	0.005 m <sup>3</sup>
Peso =	8.13 Kg
Densidad =	1528.72 Kg/m <sup>3</sup>

---

**ING. CRISTINA VINTIMILLA**  
**CONESUP 1007-05-605320**

Ing. Cristina Vintimilla A.



### LABORATORIO DE SUELOS.

#### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE(ASTM D2166)

PROYECTO:	Estudio de Suelos Cerro Shishio	TALUD: No	1
SECTOR:	Josefina	FECHA:	2 de mayo de 2011
PROVINCIA:	Azuay	MUESTRA No :	1
SOLICITADO:		PROFUNDIDAD :	

#### DATOS DE LA MUESTRA:

DIÁMETRO:	9.90	cm.
ALTURA :	10.00	cm.
ÁREA :	76.98	cm <sup>2</sup> .
VOLUMEN :	769.77	cm <sup>3</sup> .
PESO :	2,048.00	gr.
DENSIDAD:	2.661	gr/cm <sup>3</sup>

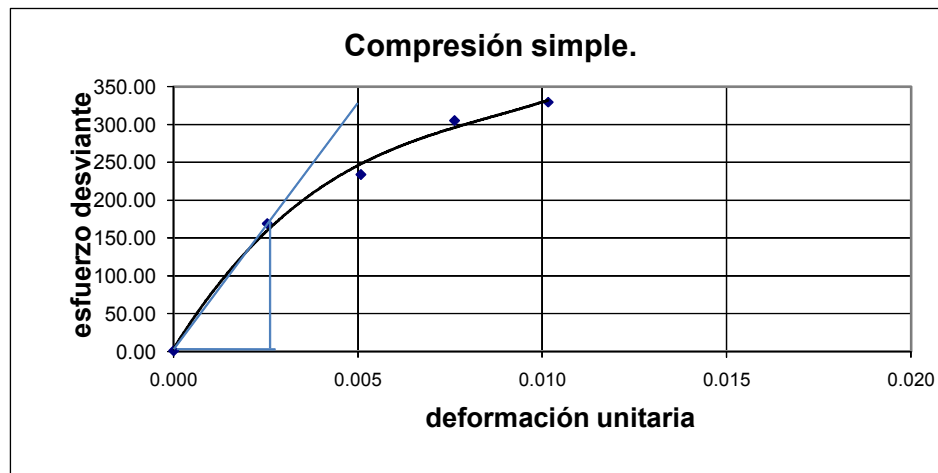
#### CONTENIDO DE HUMEDAD

Peso Hum. :	
Peso Seco :	
Peso Cap. :	
w ( % ):	
constante(k)=	1.0000

#### DATOS DE LA PRUEBA

lectura		Deform. Unit.	Carga (Kg.)	Área corregida (cm <sup>2</sup> )	Tensión Desviante (Kg/cm <sup>2</sup> )
Deform. .001"	Carga .001"				
0	71	0.000	71.00	76.98	0.92
10	13,000	0.003	13,000.00	76.98	168.88
20	18,000	0.005	18,000.00	76.98	233.82
30	23,500	0.008	23,500.00	76.98	305.26
40	25,384	0.010	25,384.00	76.98	329.73
50					
60					
70					

COMPRESIÓN SIMPLE: ( Kg/cm<sup>2</sup> ) = 329.728kgf/cm<sup>2</sup>



MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm<sup>2</sup>) = 59,615.38

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320

Ing. Cristina Vintimilla A.



## LABORATORIO DE SUELOS.

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE (ASTM D2166)

PROYECTO:	Estudio de Suelos Cerro Shishio	TALUD: No	2.00
SECTOR:	Josefina	FECHA:	2 de mayo de 2011
PROVINCIA:	Azuay	MUESTRA No :	1
SOLICITADO:		PROFUNDIDAD :	

#### DATOS DE LA MUESTRA:

DIÁMETRO:	9.90	cm.
ALTURA :	16.10	cm.
ÁREA :	76.98	cm <sup>2</sup> .
VOLUMEN :	1,239.33	cm <sup>3</sup> .
PESO :	3,281.00	gr.
DENSIDAD:	2.647	gr/cm <sup>3</sup>

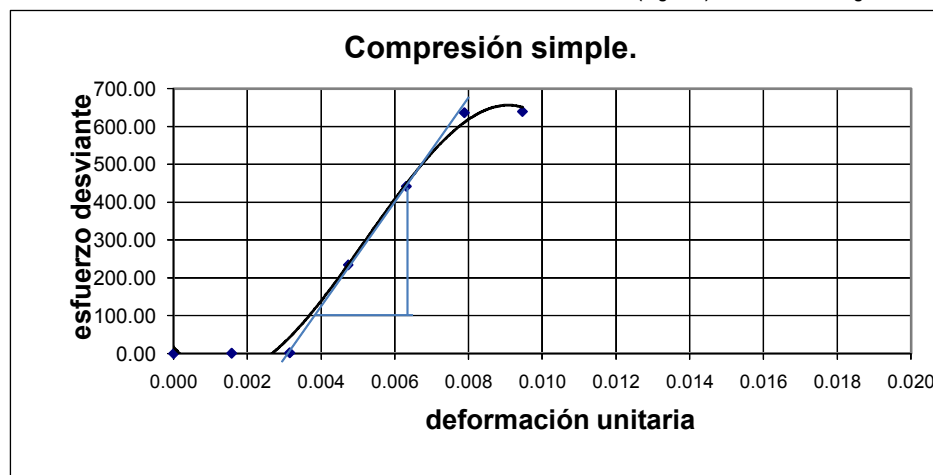
#### CONTENIDO DE HUMEDAD

Peso Hum. :	
Peso Seco :	
Peso Cap. :	
w ( % ) :	
constante(k)=	1.0000

#### DATOS DE LA PRUEBA

lectura		Deform. Unit.	Carga (Kg.)	Área corregida (cm <sup>2</sup> )	Tensión Desviante (Kg/cm <sup>2</sup> )
Deform. .001"	Carga .001"				
0	0	0.000	0.00	76.98	0.00
10	37	0.002	37.00	76.98	0.48
20	160	0.003	160.00	76.98	2.08
30	18,000	0.005	18,000.00	76.98	233.83
40	34,000	0.006	34,000.00	76.98	441.66
50	49,000	0.008	49,000.00	76.98	636.50
60	49,225	0.009	49,225.00	76.98	639.42
70					

COMPRESIÓN SIMPLE: ( Kg/cm<sup>2</sup> ) = 639.417kgf/cm<sup>2</sup>



MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm<sup>2</sup>) = 110,000.00

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320



## LABORATORIO DE SUELOS.

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE(ASTM D2166)

PROYECTO:	Estudio de Suelos Cerro Shishio	TALUD: No	1
SECTOR:	Josefina	FECHA:	2 de mayo de 2011
PROVINCIA:	Azuay	MUESTRA No :	2
SOLICITADO:		PROFUNDIDAD :	

#### DATOS DE LA MUESTRA:

DIÁMETRO:	9.90	cm.
ALTURA :	19.10	cm.
ÁREA :	76.98	cm <sup>2</sup> .
VOLUMEN :	1,470.26	cm <sup>3</sup> .
PESO :	3,891.82	gr.
DENSIDAD:	2.647	gr/cm <sup>3</sup>

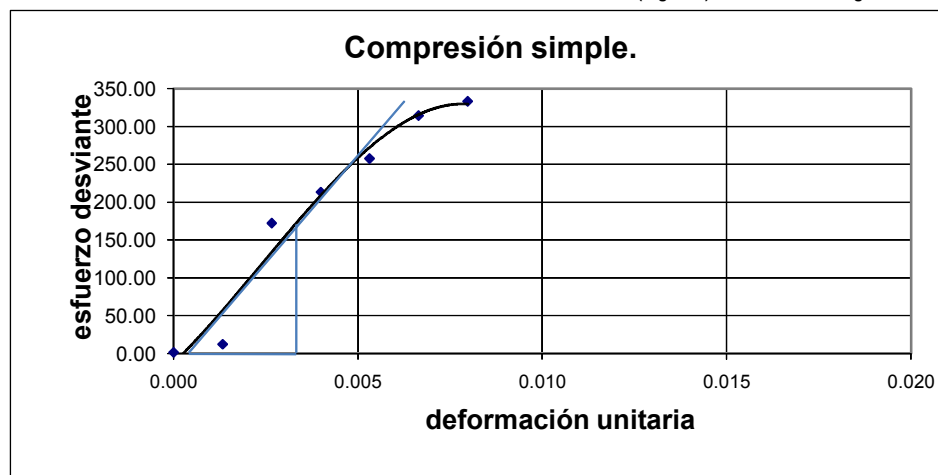
#### CONTENIDO DE HUMEDAD

Peso Hum. :	
Peso Seco :	
Peso Cap. :	
w ( % ) :	
constante(k)=	1.0000

#### DATOS DE LA PRUEBA

lectura		Deform. Unit.	Carga (Kg.)	Área corregida (cm <sup>2</sup> )	Tensión Desviante (Kg/cm <sup>2</sup> )
Deform. .001"	Carga				
0	109	0.000	109.00	76.98	1.42
10	964	0.001	964.00	76.98	12.52
20	13,250	0.003	13,250.00	76.98	172.13
30	16,440	0.004	16,440.00	76.98	213.56
40	19,830	0.005	19,830.00	76.98	257.60
50	24,200	0.007	24,200.00	76.98	314.36
60	25,660	0.008	25,660.00	76.98	333.32
70					

COMPRESIÓN SIMPLE: ( Kg/cm<sup>2</sup> ) = 333.320kgf/cm<sup>2</sup>



MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm<sup>2</sup>) = 62,962.96

ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320

Ing. Cristina Vintimilla A.



## LABORATORIO DE SUELOS.

### ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE(ASTM D2166)

PROYECTO:	Estudio de Suelos Cerro Shishio	TALUD: No	2
SECTOR:	Josefina	FECHA:	2 de mayo de 2011
PROVINCIA:	Azuay	MUESTRA No :	2
SOLICITADO:		PROFUNDIDAD :	

#### DATOS DE LA MUESTRA:

DIÁMETRO:	9.90	cm.
ALTURA :	11.00	cm.
ÁREA :	76.98	cm <sup>2</sup> .
VOLUMEN :	846.75	cm <sup>3</sup> .
PESO :	2,334.00	gr.
DENSIDAD:	2.756	gr/cm <sup>3</sup>

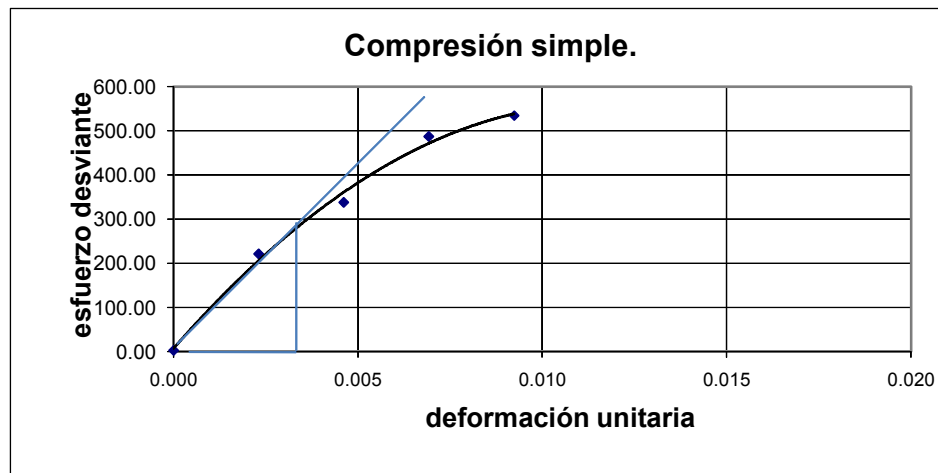
#### CONTENIDO DE HUMEDAD

Peso Hum. :	
Peso Seco :	
Peso Cap. :	
w ( % ):	
constante(k)=	1.0000

#### DATOS DE LA PRUEBA

lectura		Deform. Unit.	Carga (Kg.)	Área corregida (cm <sup>2</sup> )	Tensión Desviante (Kg/cm <sup>2</sup> )
Deform. .001"	Carga				
0	205	0.000	205.00	76.98	2.66
10	17,000	0.002	17,000.00	76.98	220.84
20	26,000	0.005	26,000.00	76.98	337.75
30	37,500	0.007	37,500.00	76.98	487.13
40	41,171	0.009	41,171.00	76.98	534.80
50					
60					
70					

COMPRESIÓN SIMPLE: ( Kg/cm<sup>2</sup> ) = 534.80kgf/cm<sup>2</sup>



MODULO DE ELASTICIDAD (Kg/cm<sup>2</sup>) = 90,322.58

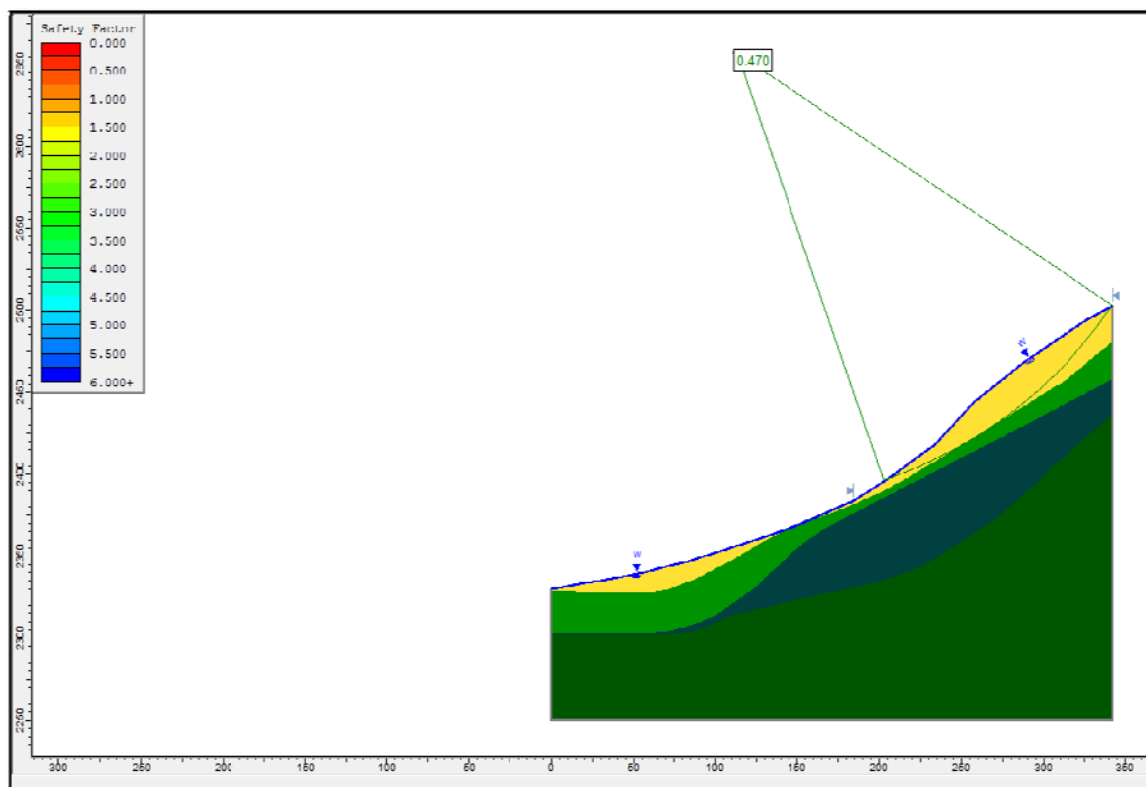
ING. CRISTINA VINTIMILLA  
CONESUP 1007-05-605320

Ing. Cristina Vintimilla A.



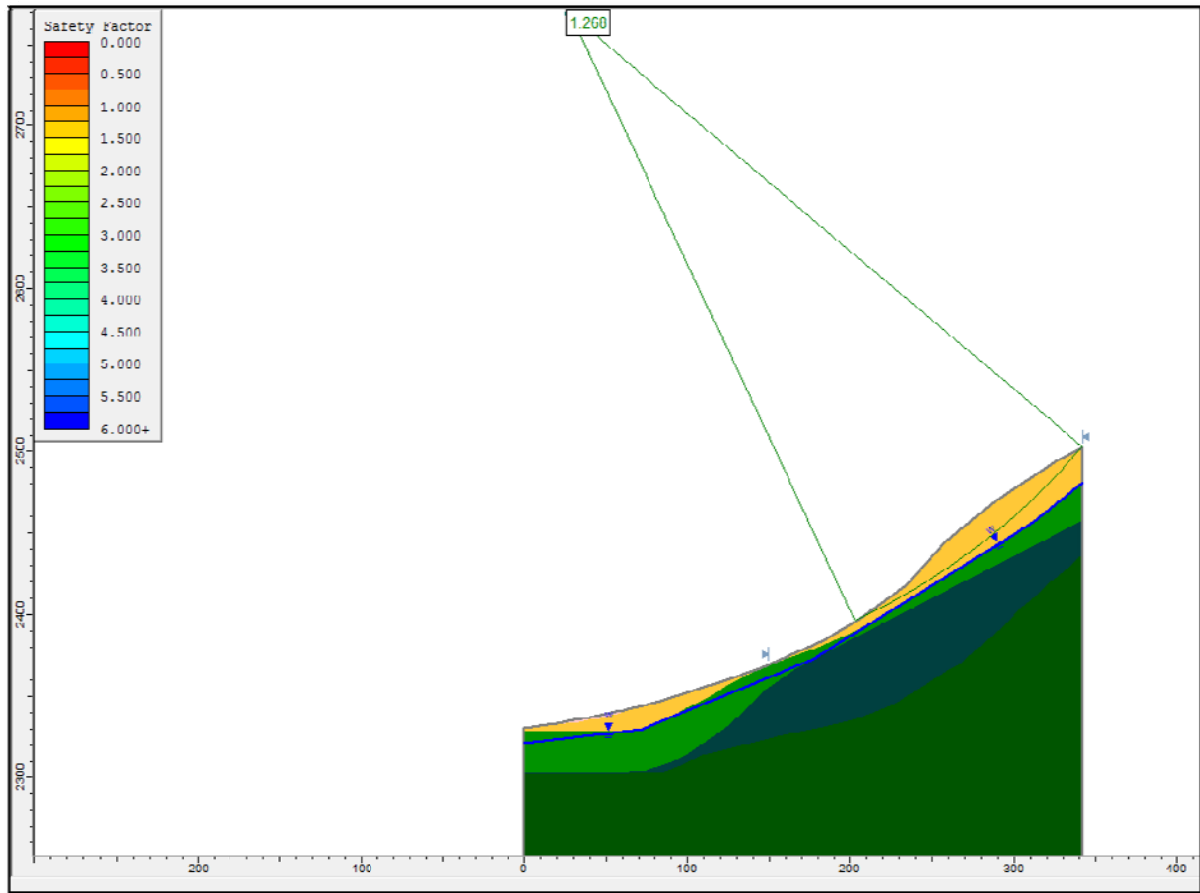
## ANEXO F

### ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES INICIALES MEDIANTE EL METODO DEL EQUILIBRIO LÍMITE

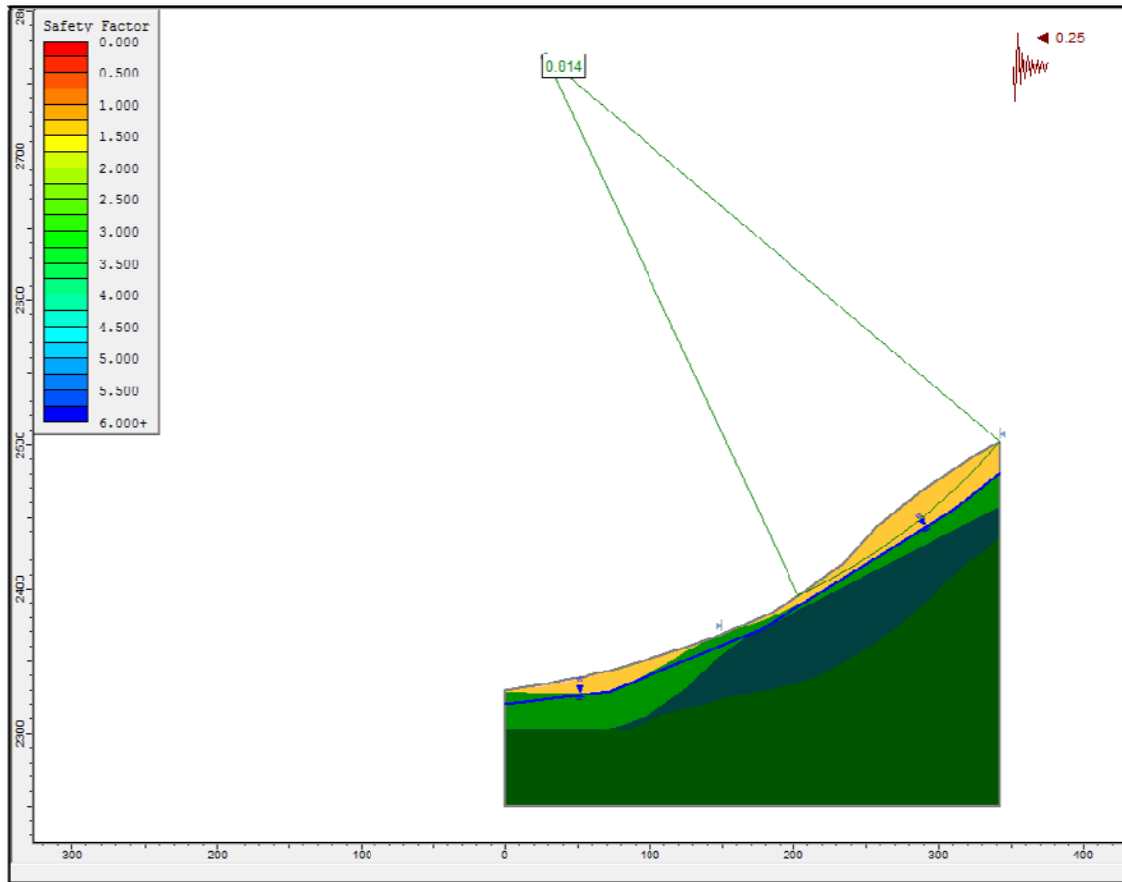


**Modelo en condiciones iniciales y con el nivel freático en la superficie**

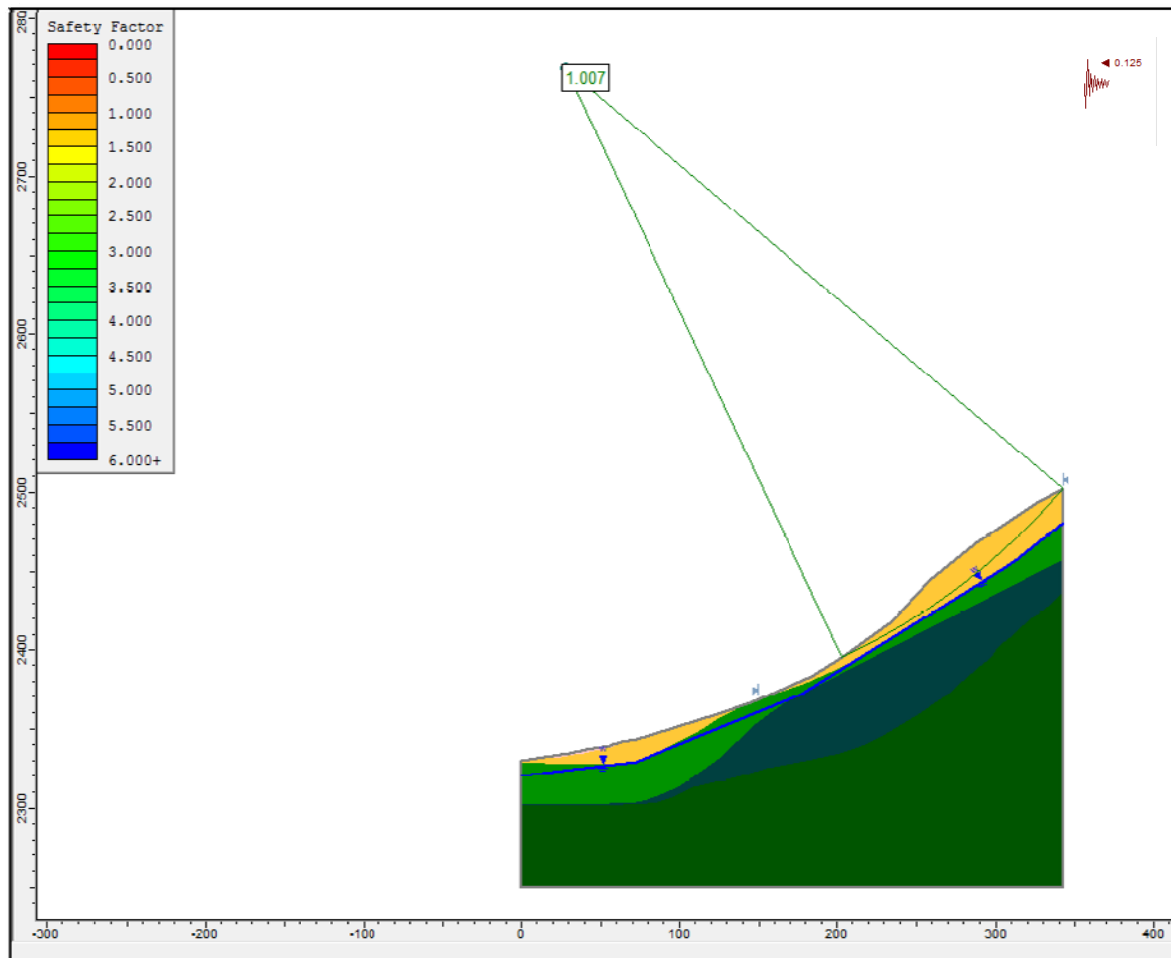




**Modelo en condiciones iniciales y con el nivel freático a profundidad**



**Modelo en condiciones iniciales, con el nivel freático a profundidad y factor sísmico  $kh=0.25$**



**Modelo en condiciones iniciales, con el nivel freático a profundidad y factor sísmico  $kh=0.125$**

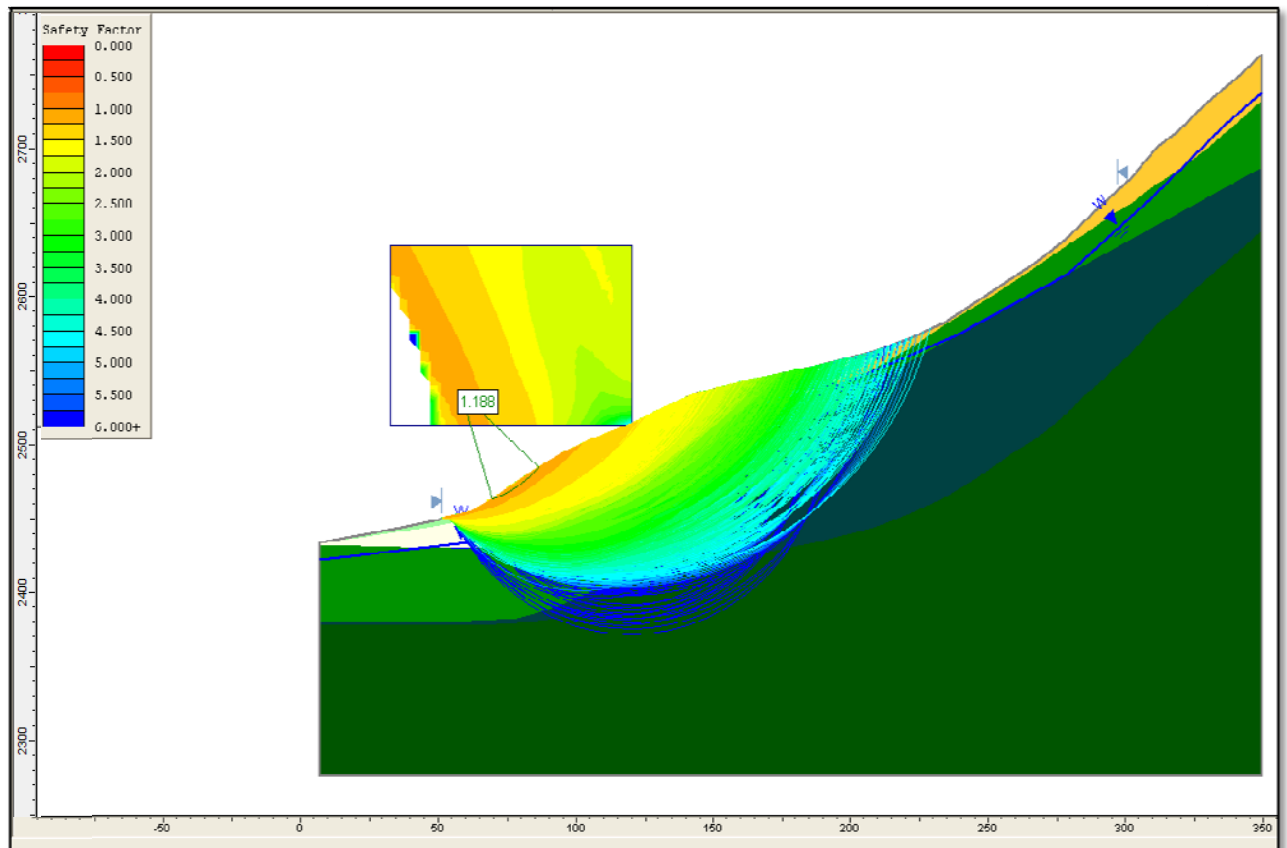


UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

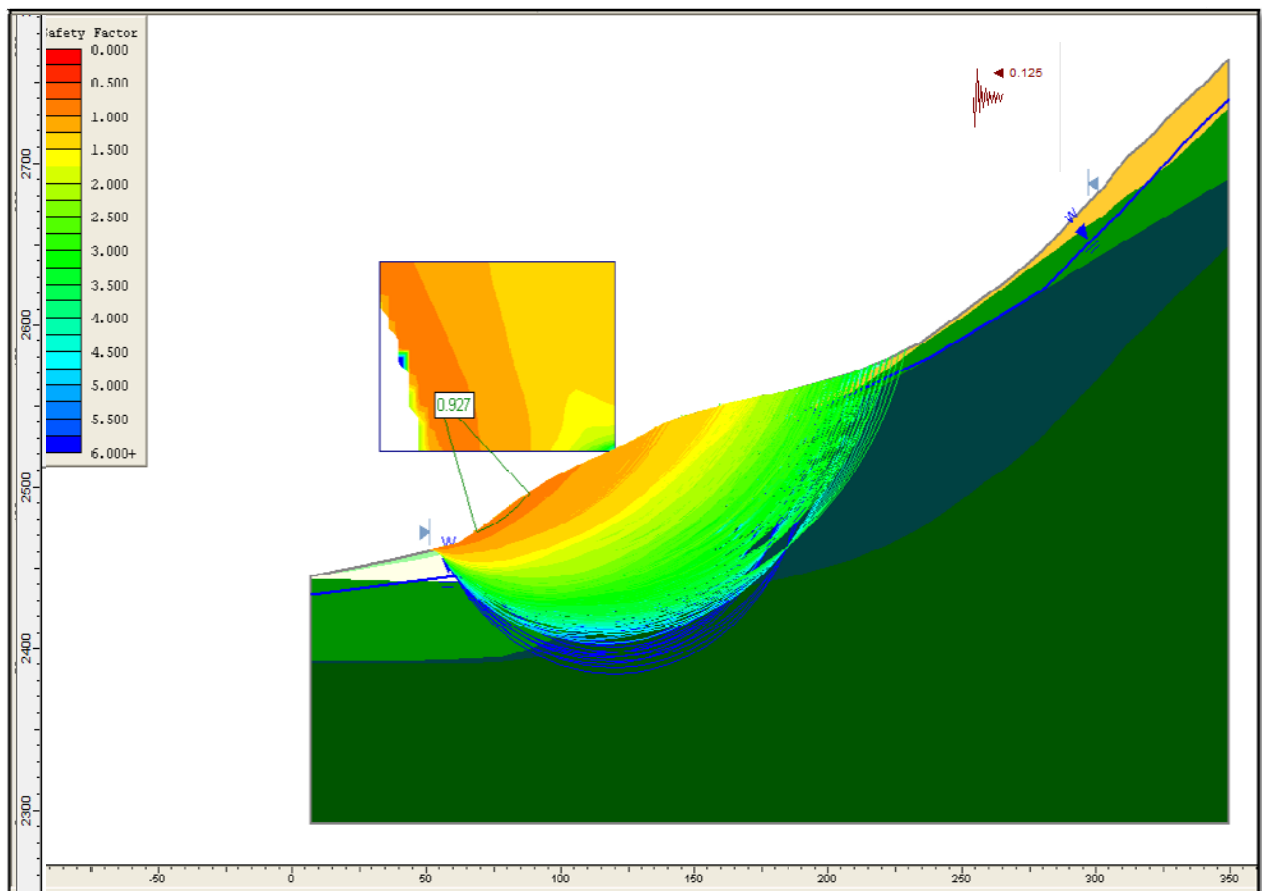
## **ANEXO G**

### **ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE EL METODO DEL EQUILIBRIO LÍMITE**

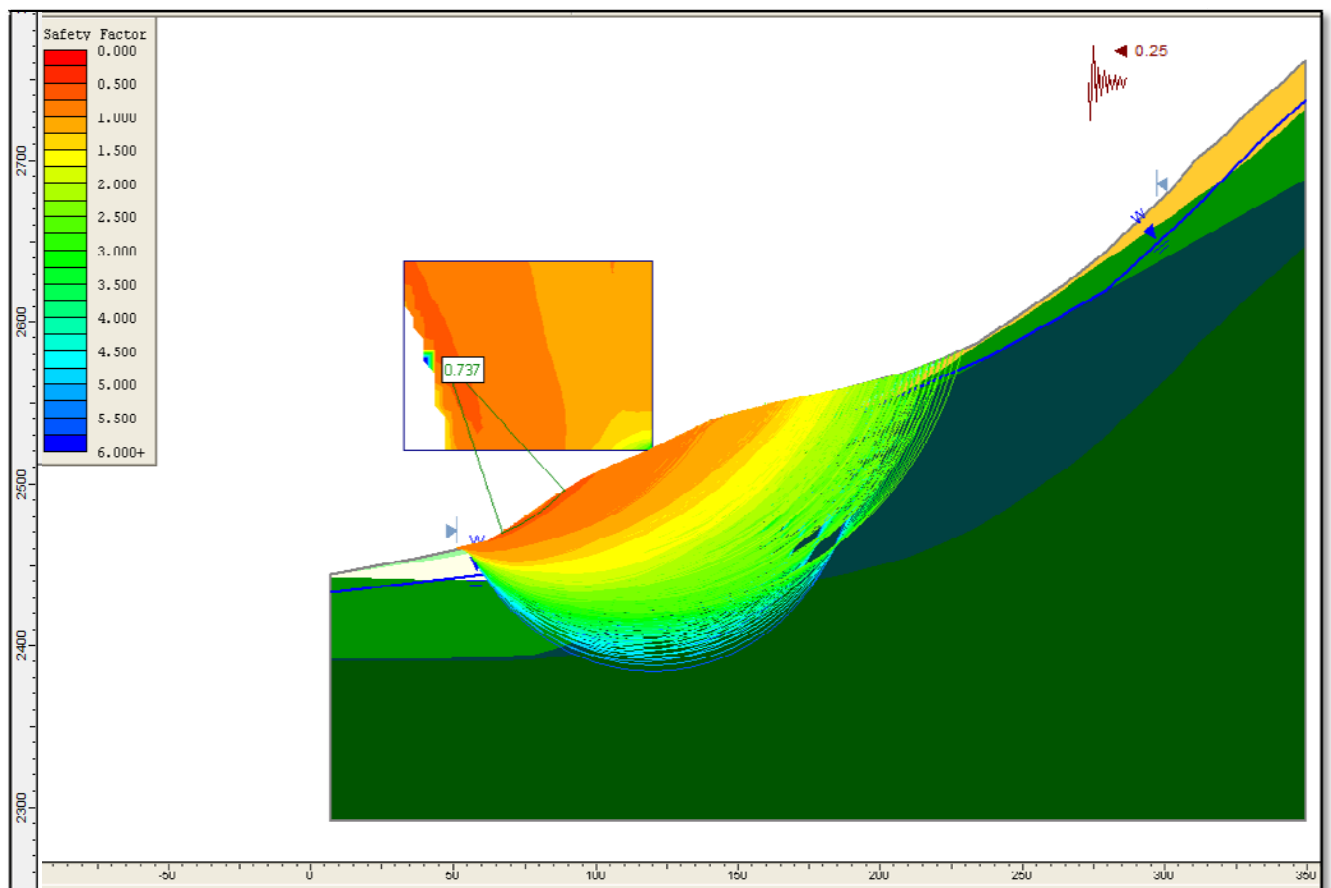
Ing. Cristina Vintimilla A.



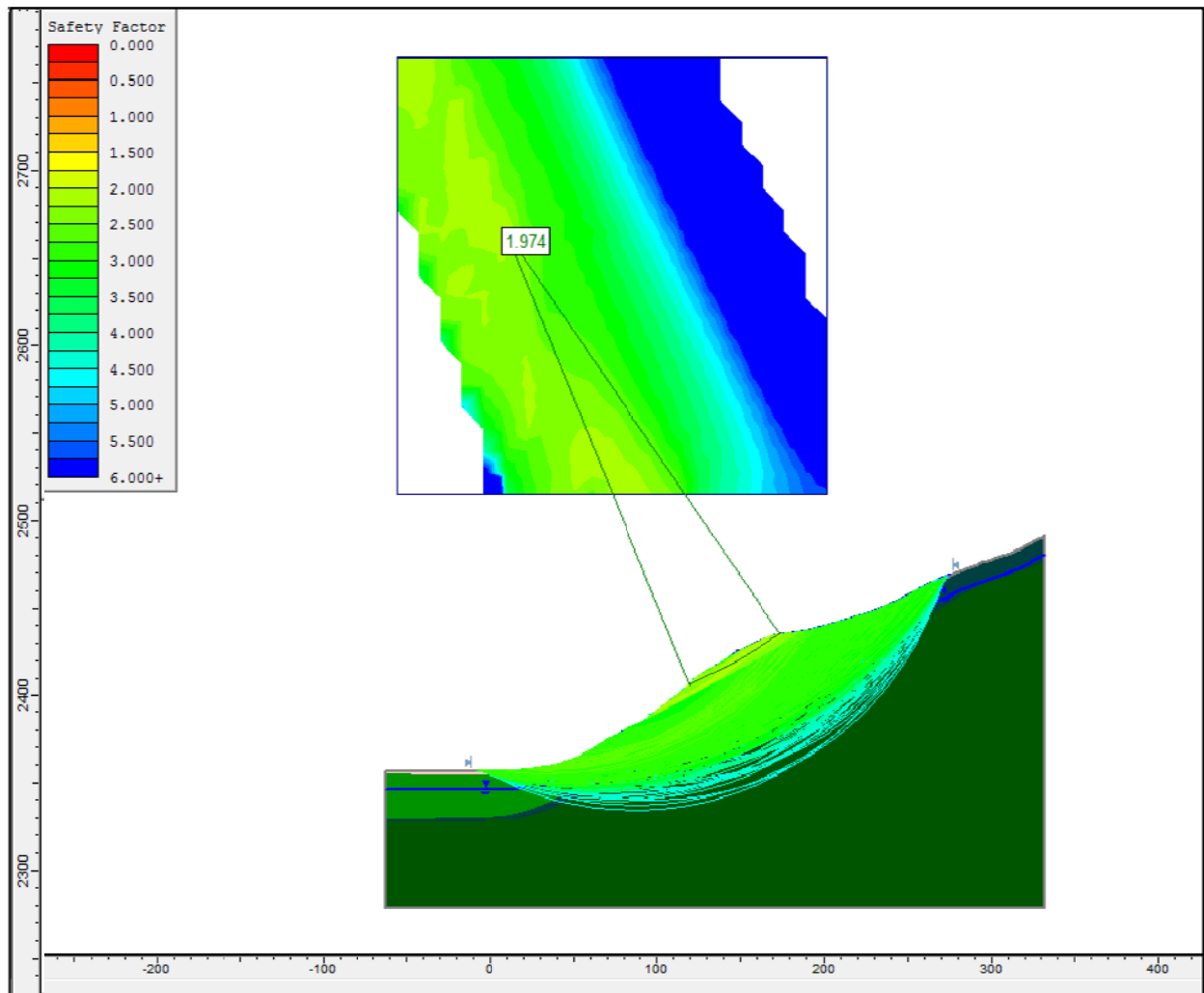
**Perfil A: Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso**



**Perfil A: Modelo en condiciones actuales, mapa de seguridad, análisis pseudo-estático  $\alpha_h=0.125$**

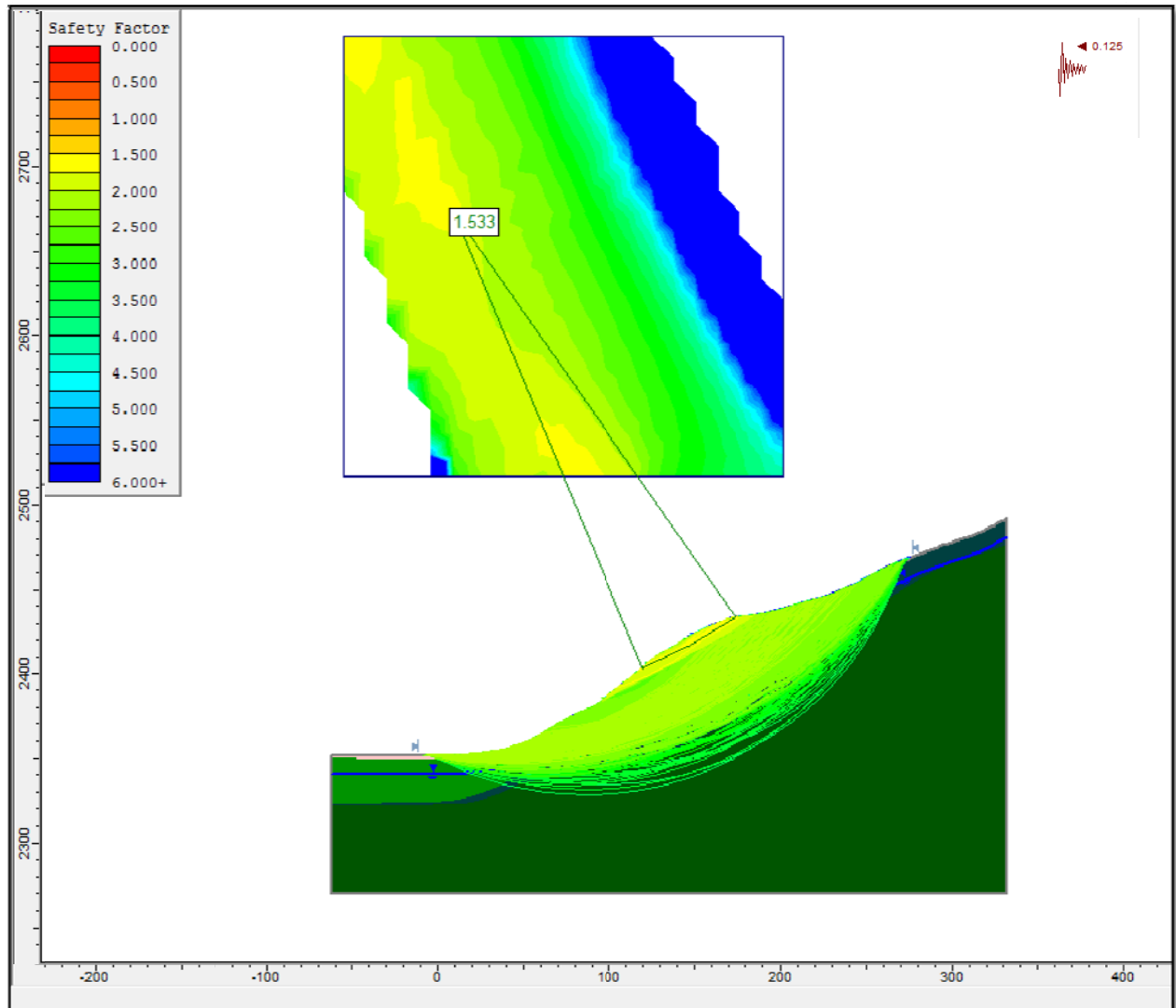


**Perfil A: Modelo en condiciones actuales, mapa de seguridad, análisis pseudo-estaticokh=0.25**

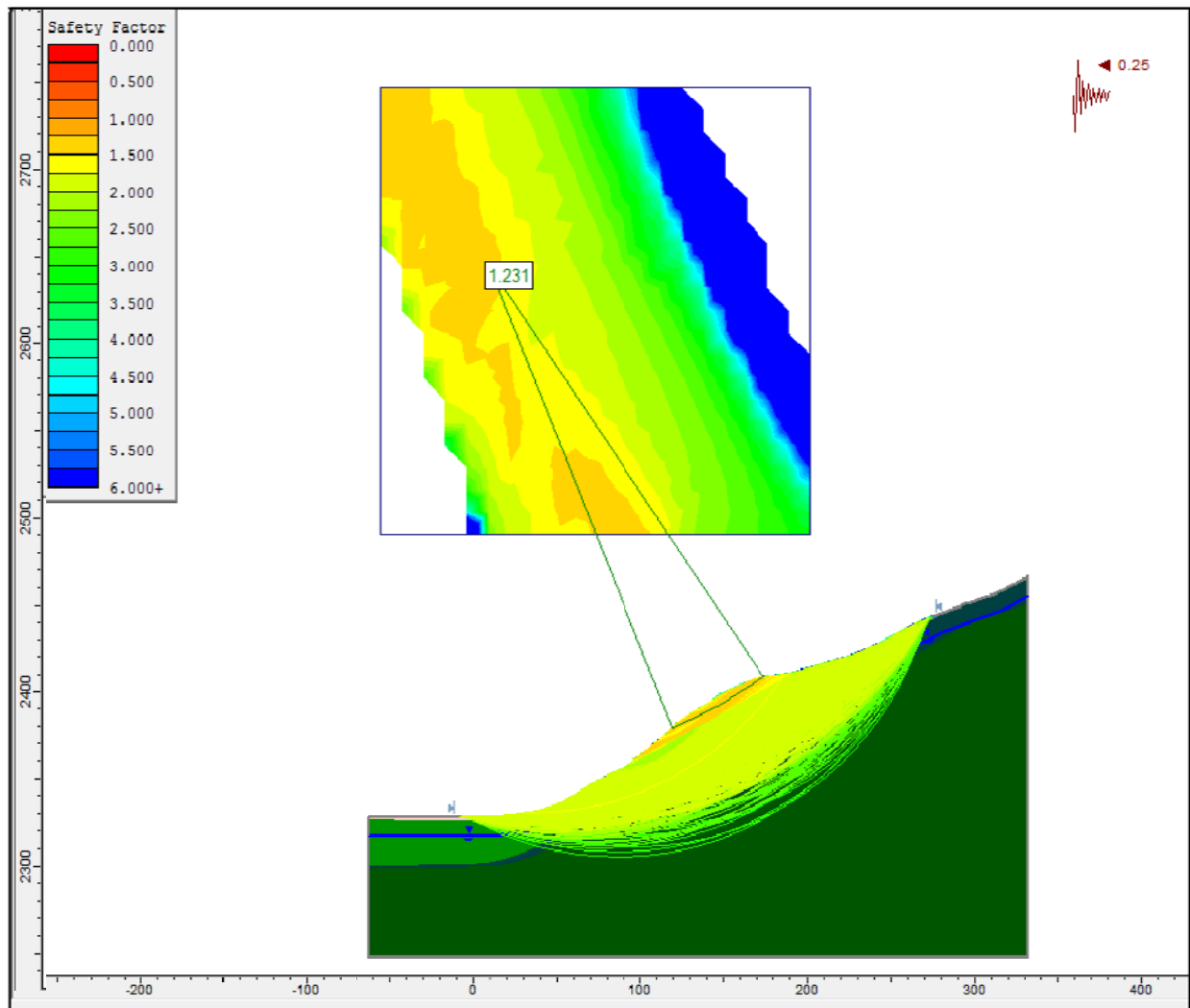


**Perfil B: Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso**

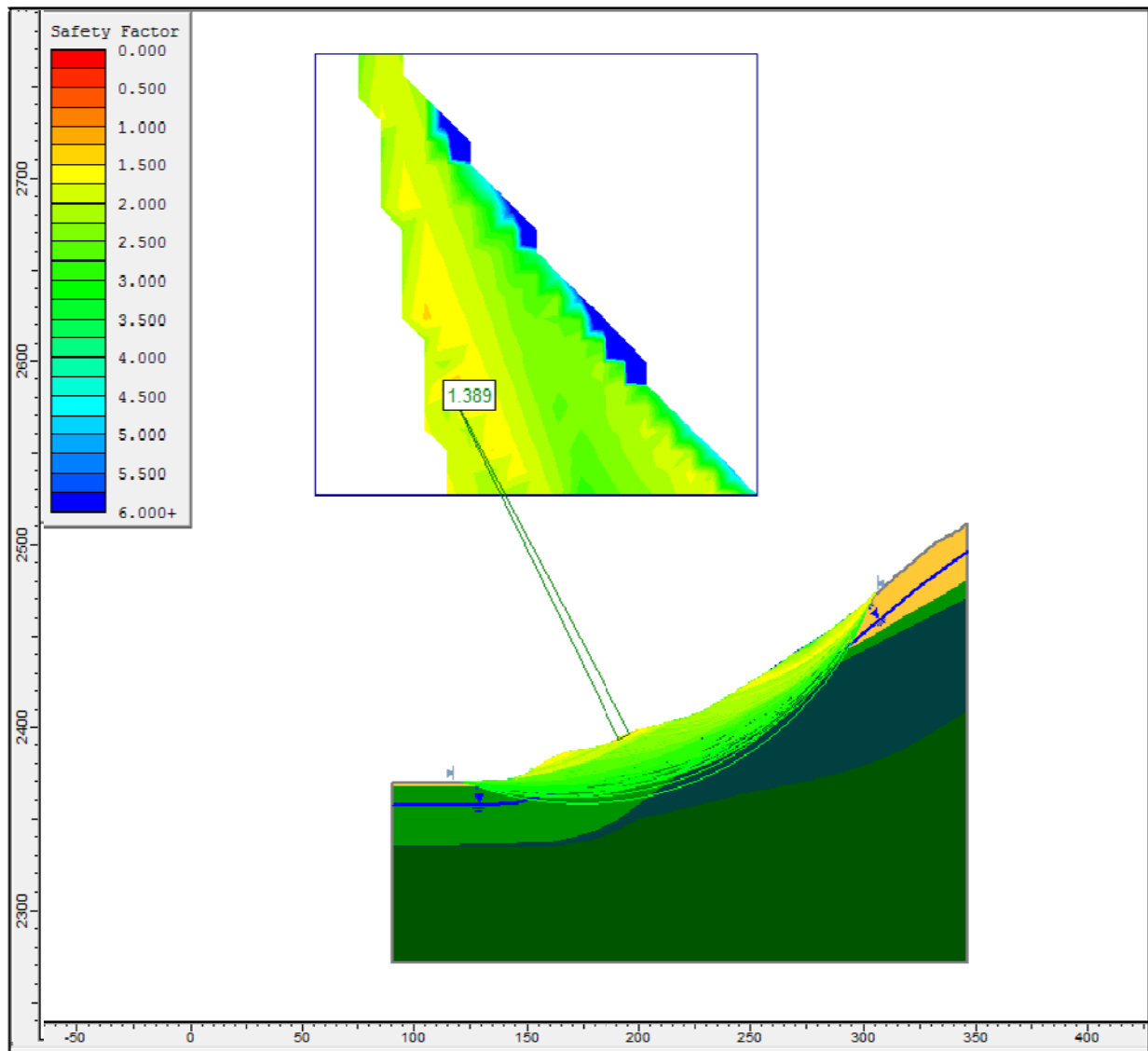




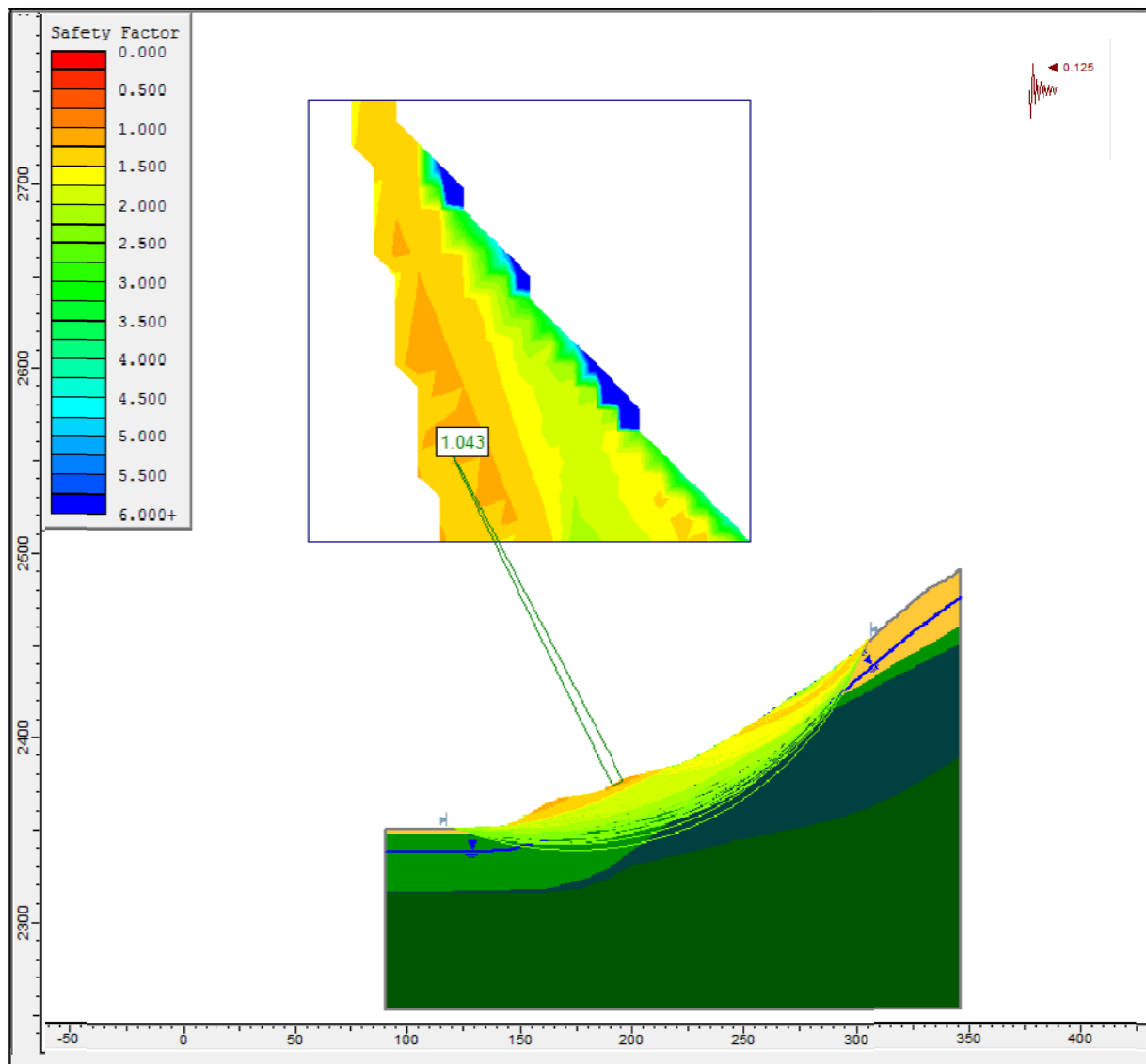
**Perfil B: Modelo en condiciones actuales, mapa de seguridad, análisis pseudo-estático  $\alpha_k=0.125$**



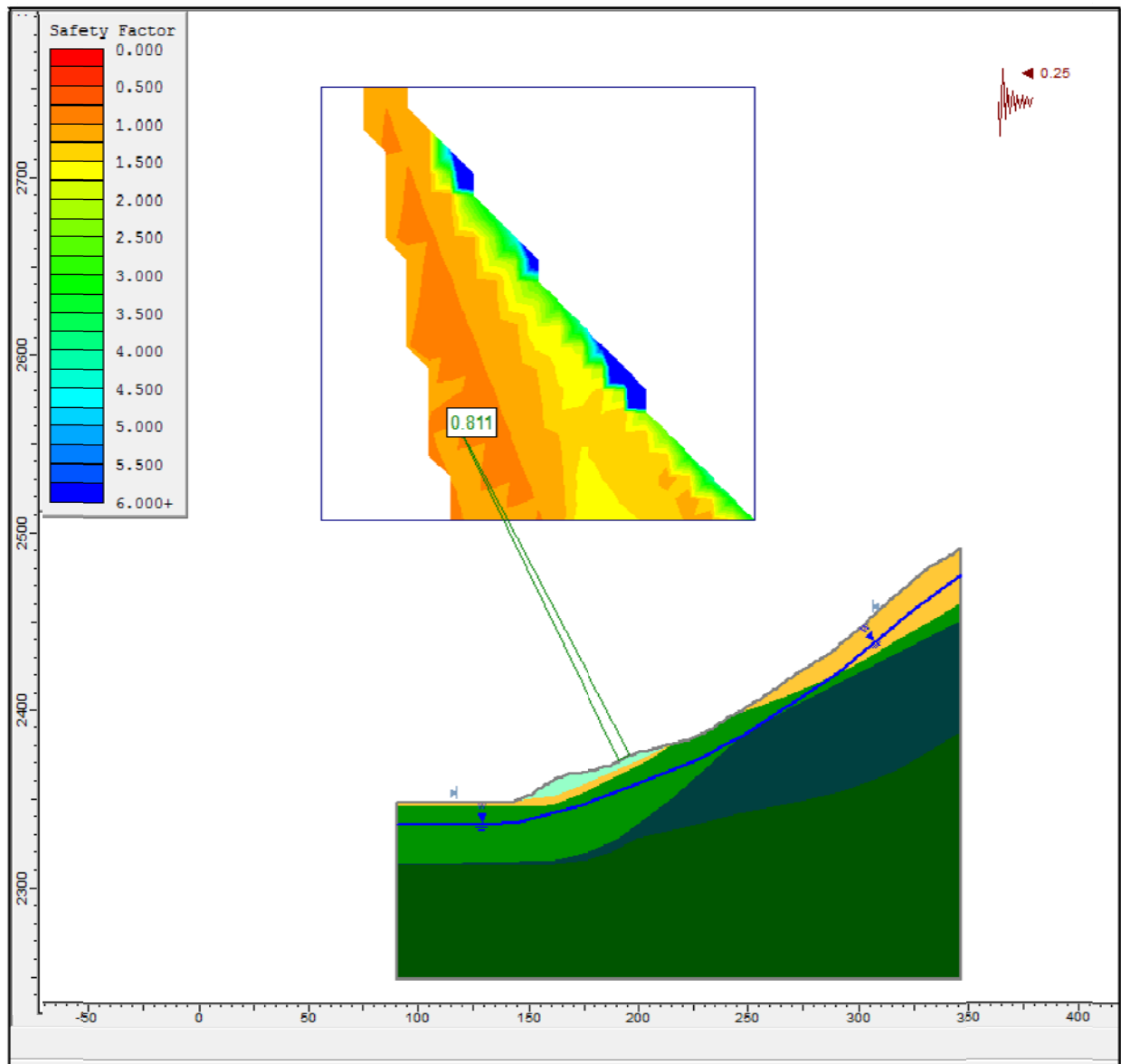
**Perfil B: Modelo en condiciones actuales, mapa de seguridad, análisis pseudo-estaticokh=0.25**



**Perfil C: Modelo en condiciones actuales, parámetros determinados en el análisis inverso**



**Perfil C: Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático  $k_h=0.125$**



**Perfil C: Modelo en condiciones actuales, análisis pseudo-estático  $k_h=0.25$**

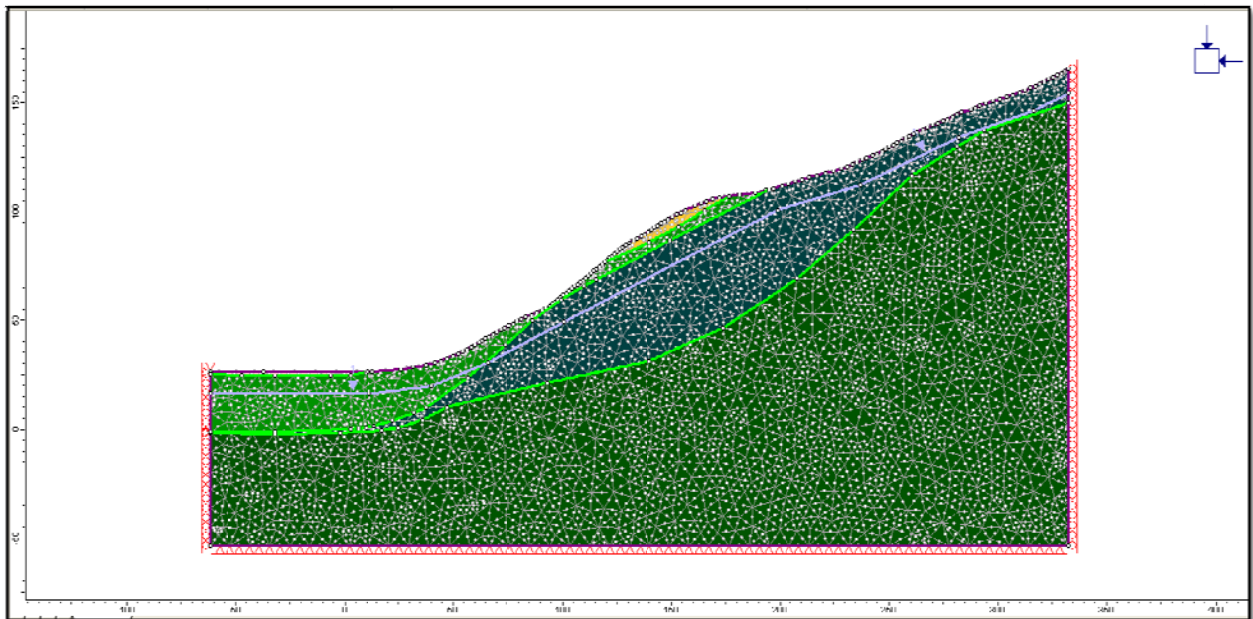


UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
MAESTRIA EN GEOLOGÍA APLICADA Y GEOTECNICA

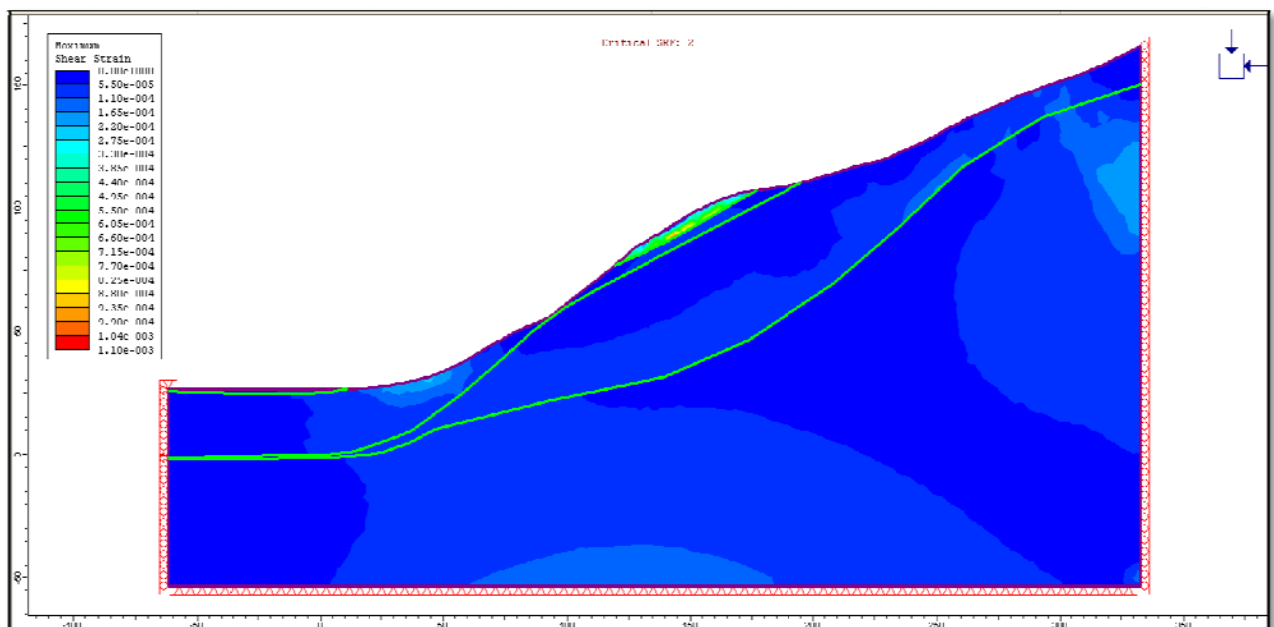
**ANEXO H**

**ANALISIS DE ESTABILIDAD EN CONDICIONES ACTUALES MEDIANTE EL  
METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Ing. Cristina Vintimilla A.



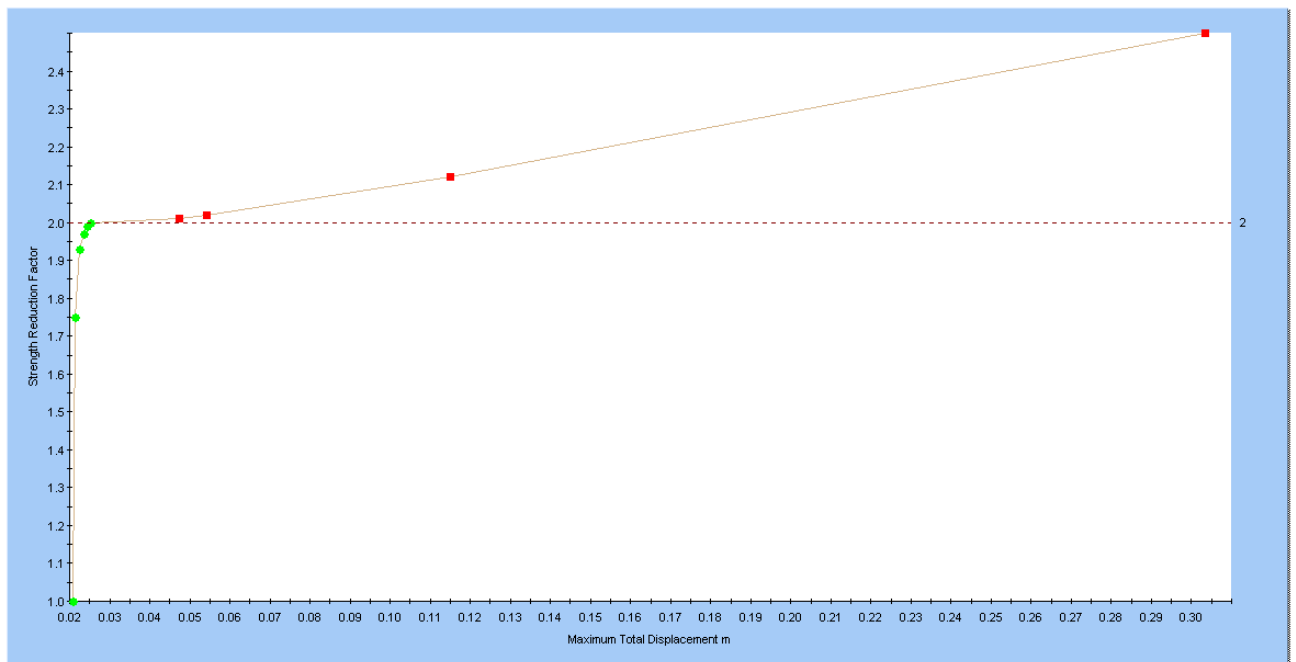
**Perfil B-B: modelización del talud en el MEF, geometría, materiales, mallado y condiciones de contorno**



**Perfil B-B: Máximas deformaciones por corte**



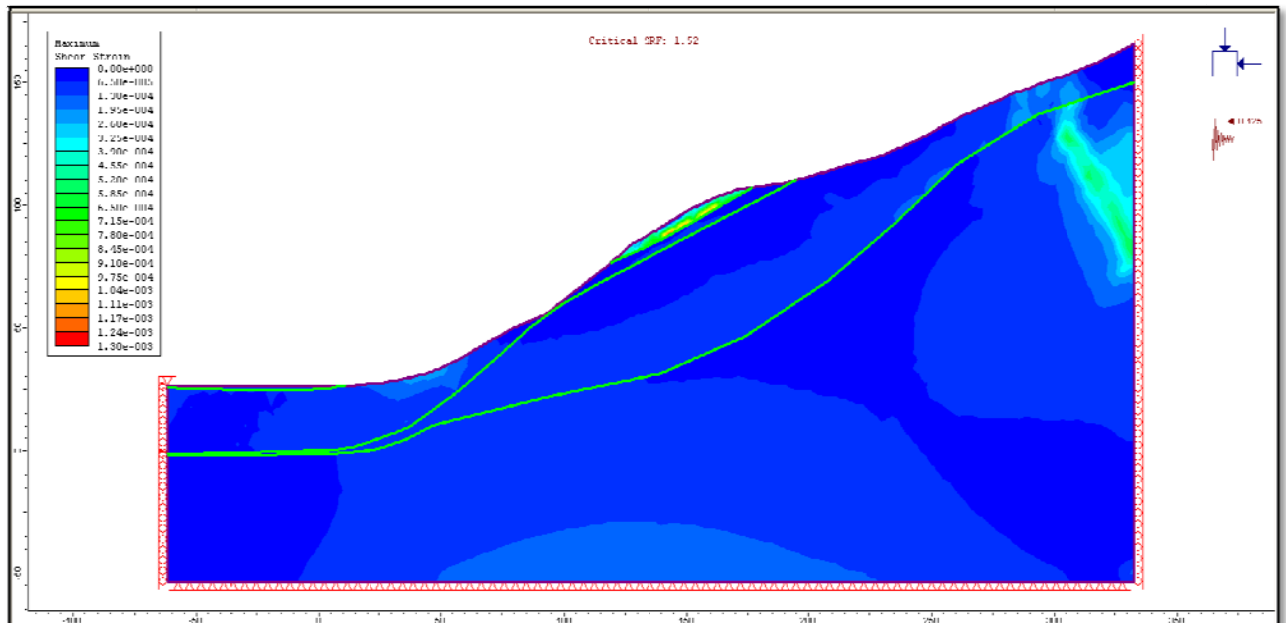
Shear Strength Reduction - Critical SRF: 2 at Displacement: 0.025 m



Failed to Converge  
Converged  
Critical SRF

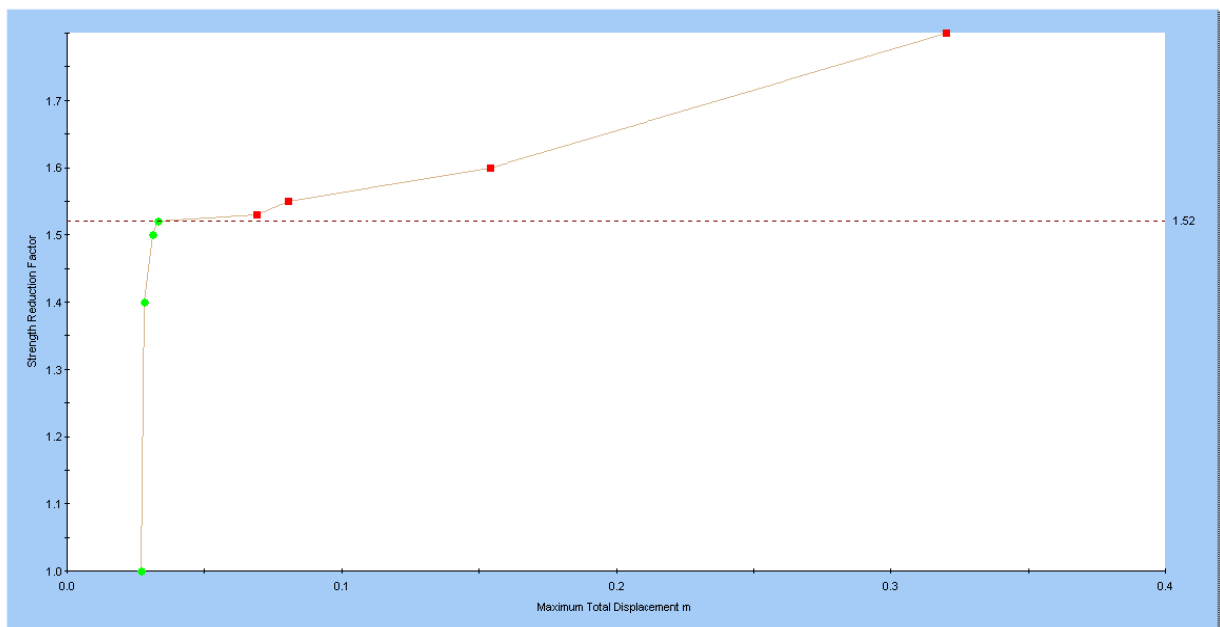
**Perfil B-B: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo**





### Perfil B-B: Análisis pseudo-estático $kh=0.125$

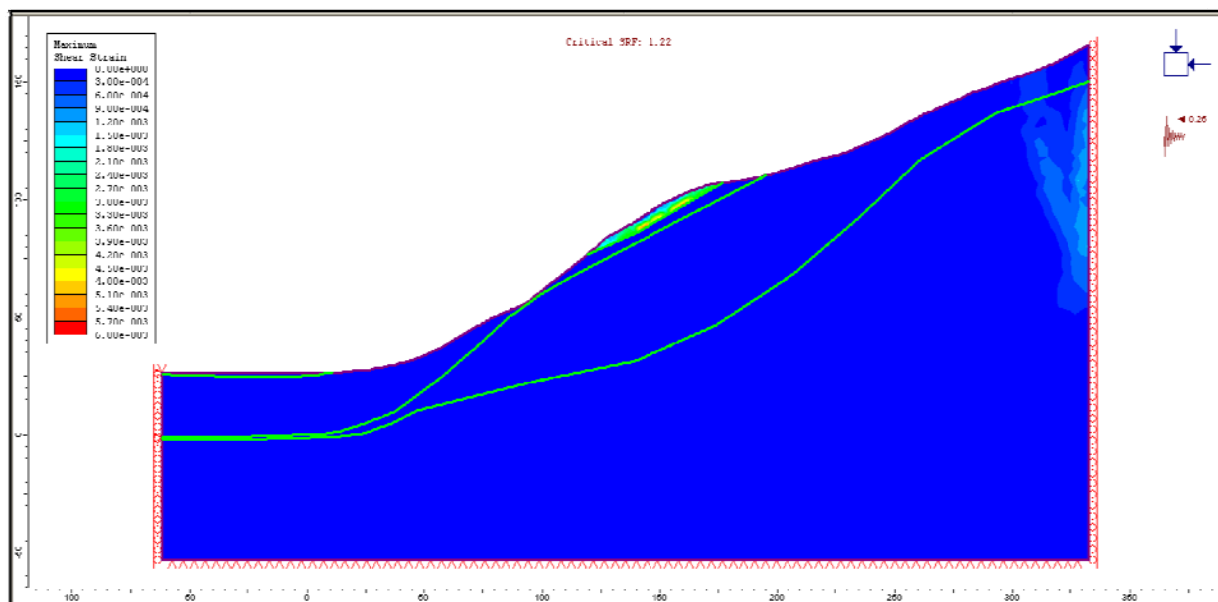
Shear Strength Reduction - Critical SRF: 1.52 at Displacement: 0.03 m



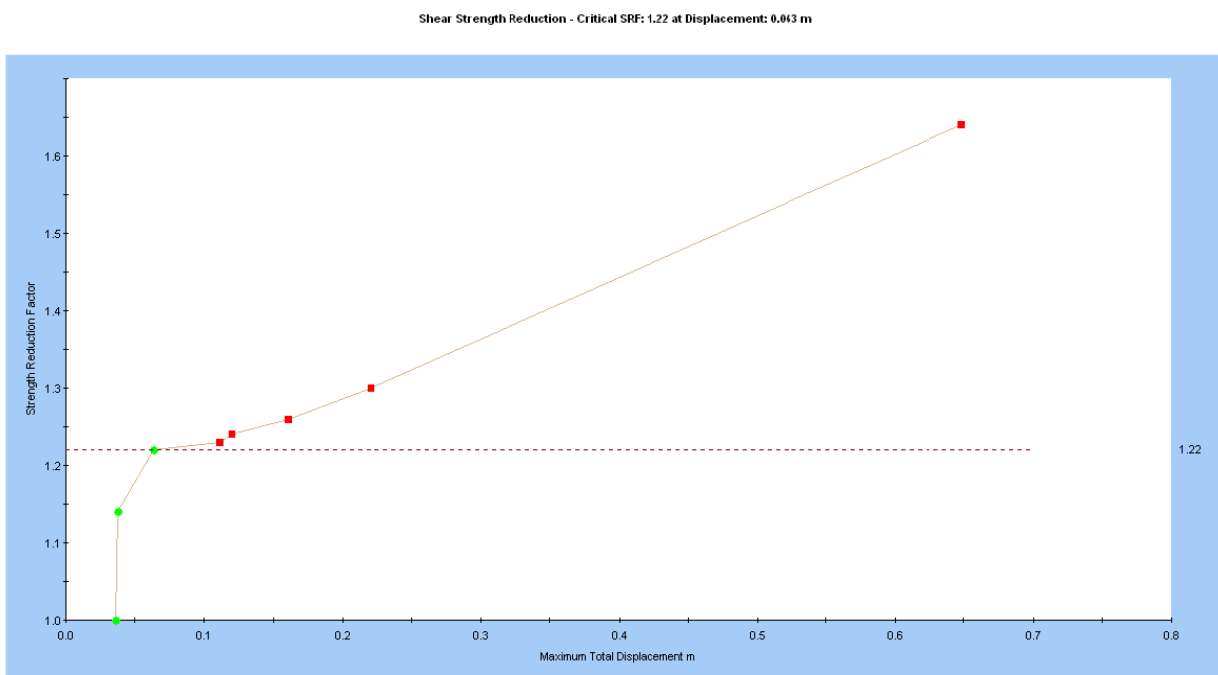
■ Failed to Converge  
● Converged  
--- Critical SRF



**Perfil B-B: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total  
máximo, análisis pseudo-estático  $kh=0.125$**



**Perfil B-B: Análisis pseudo-estático  $kh=0.25$**

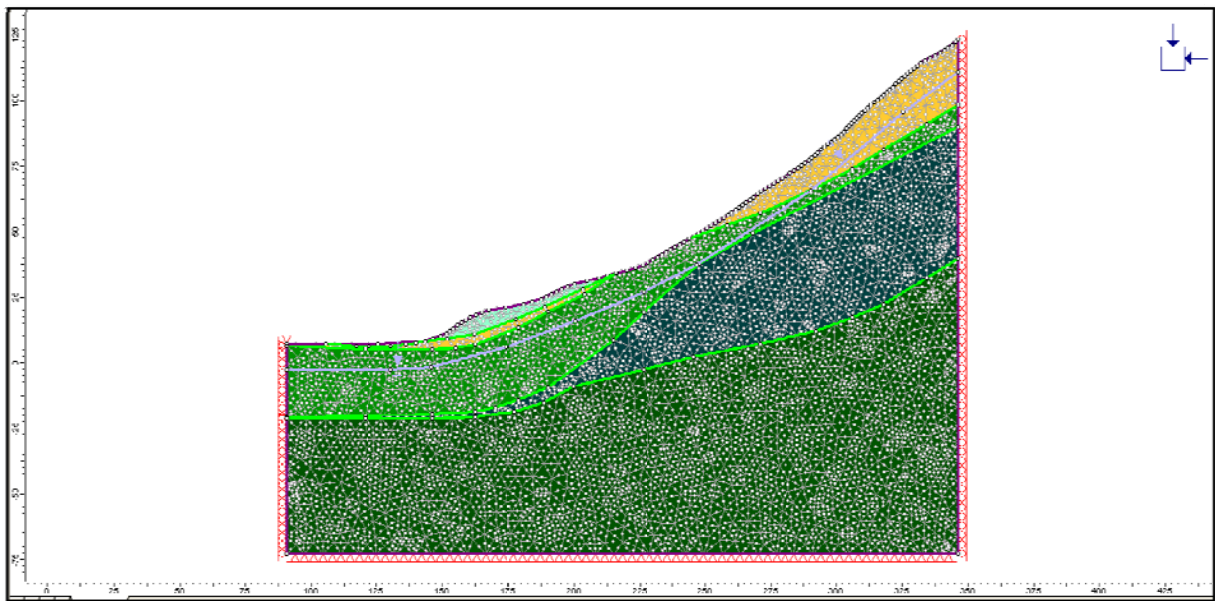


Ing. Cristina Vintimilla A.

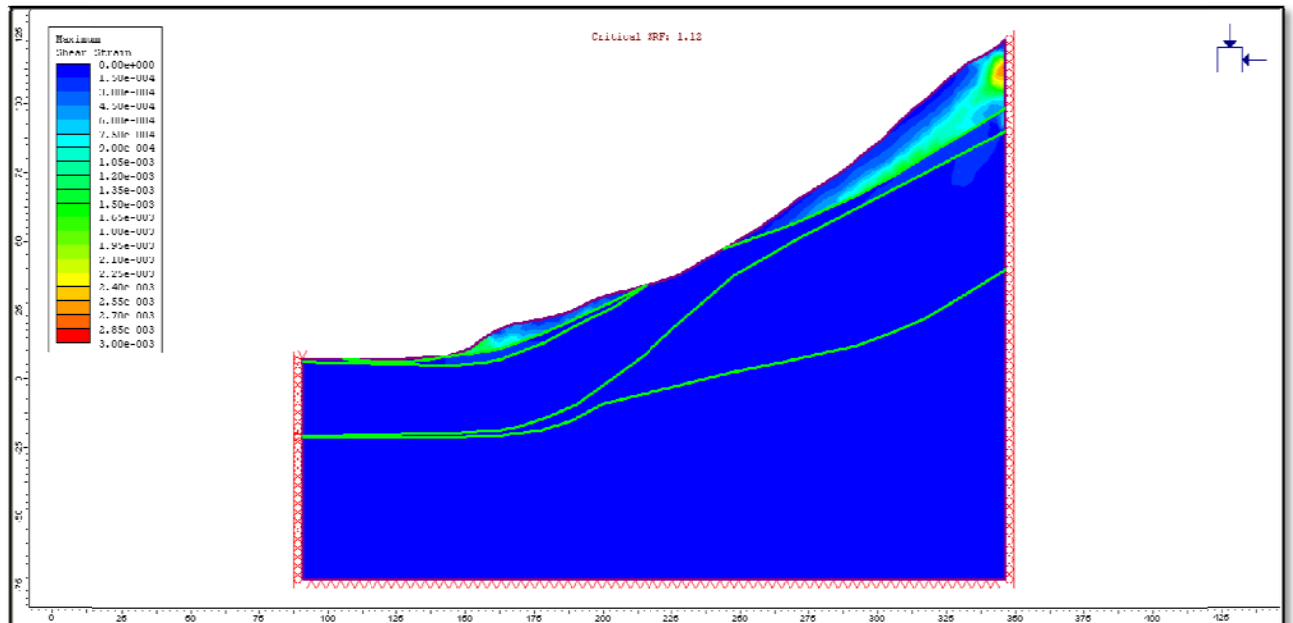


Failed to Converge  
Converged  
Critical SRF

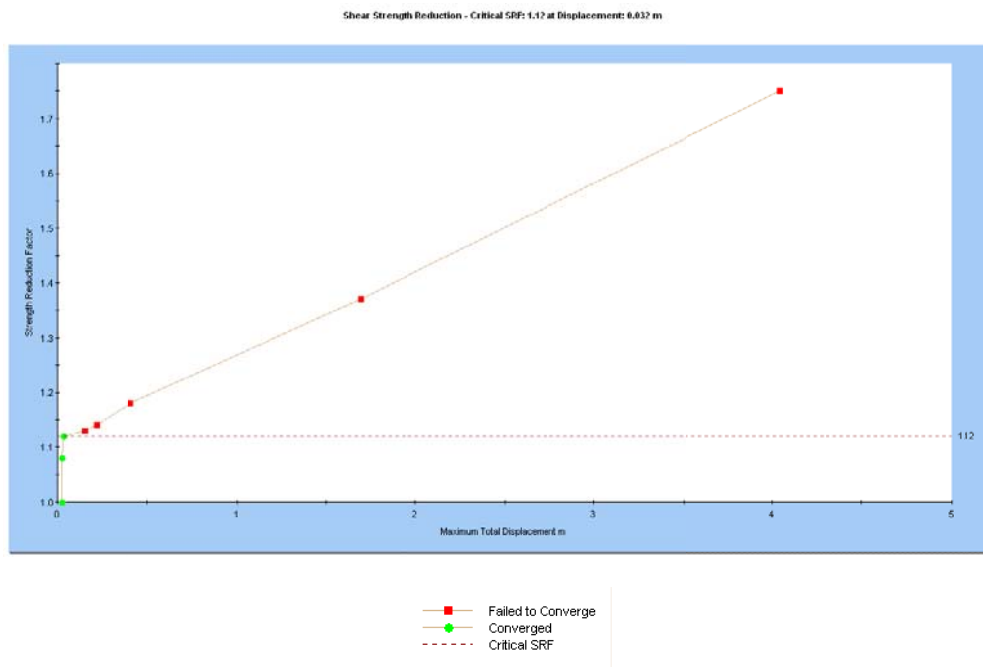
**Perfil B-B: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo, análisis pseudo-estático  $kh=0.25$**



**Perfil C-C: modelización del talud en el MEF, geometría, materiales, mallado y condiciones de contorno**

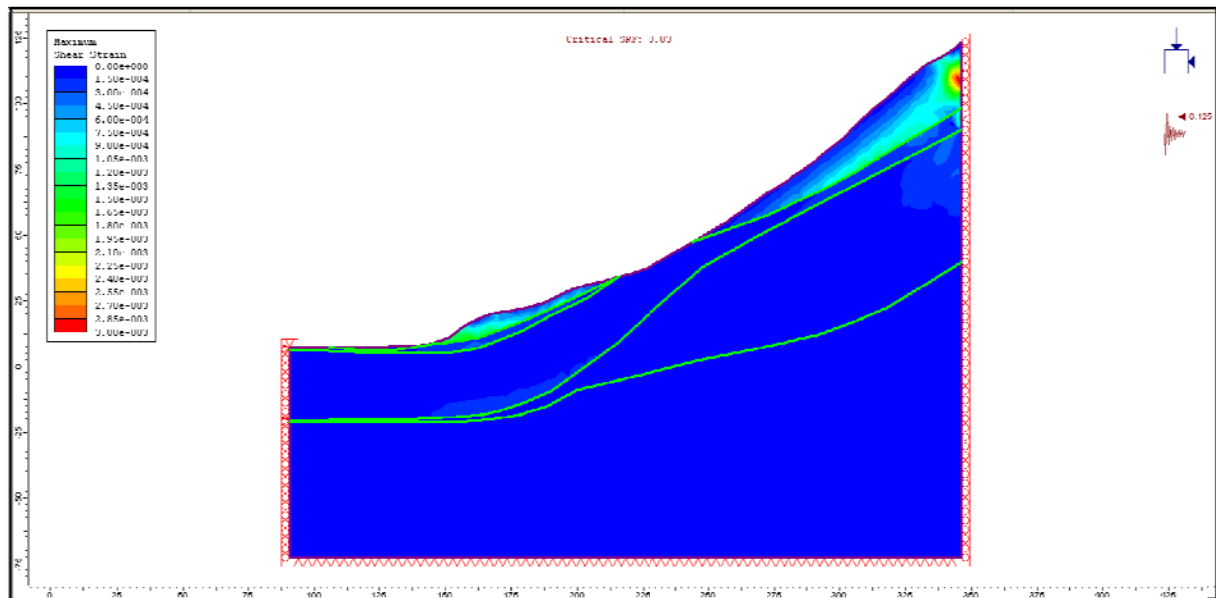


**Perfil C-C: Máximas deformaciones por corte**

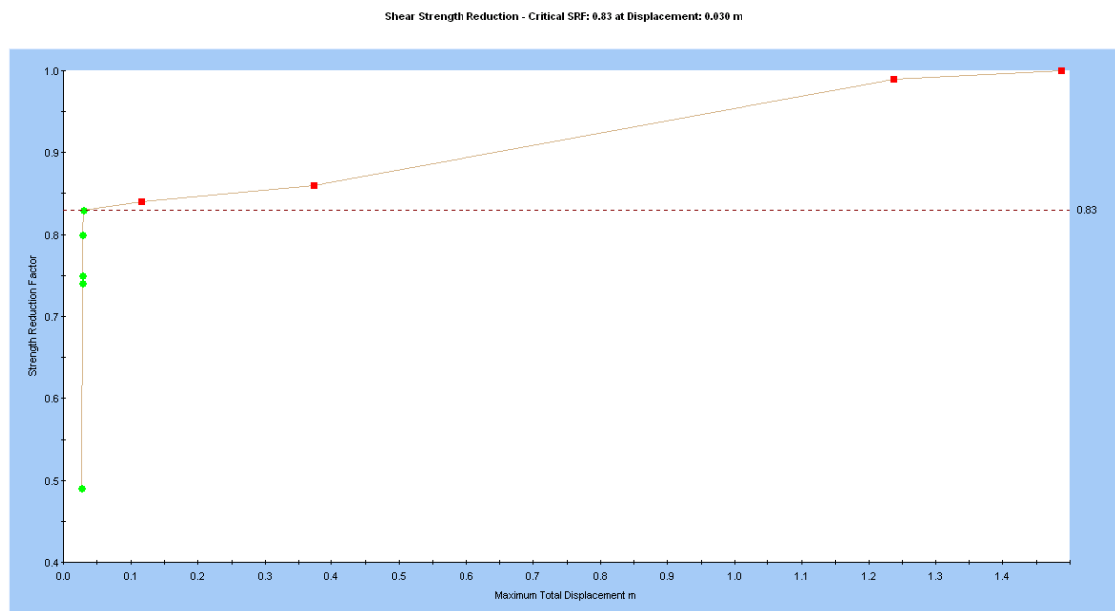


**Perfil C-C: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo**

Ing. Cristina Vintimilla A.

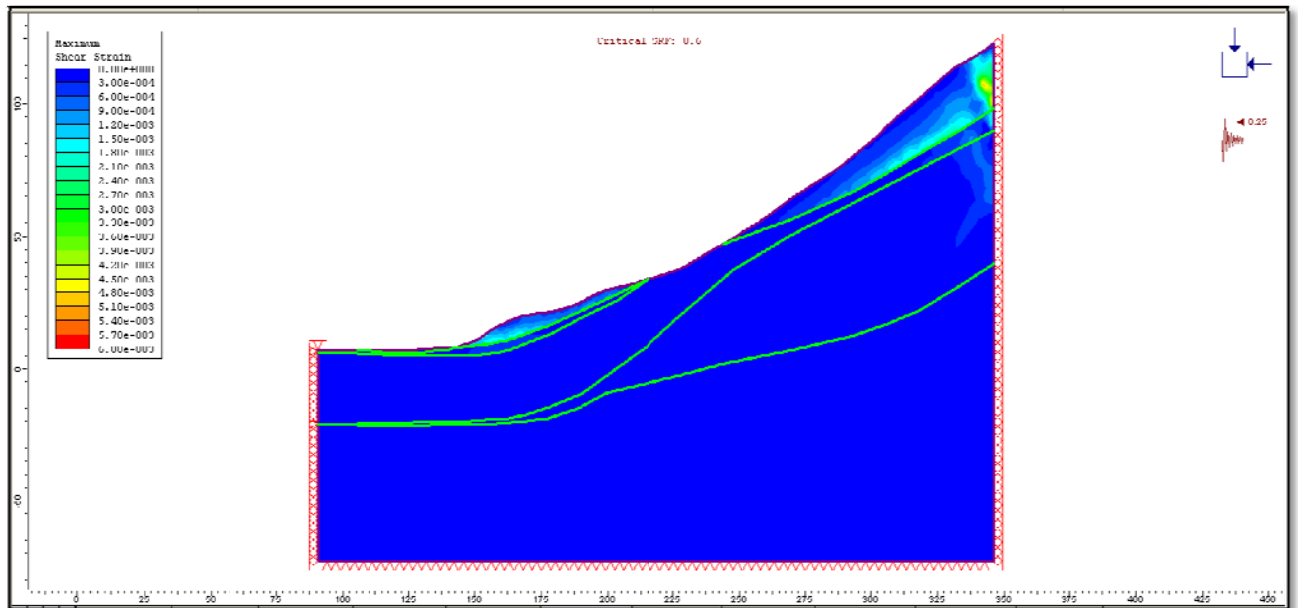


Perfil C-C: Análisis pseudo-estático  $kh=0.125$



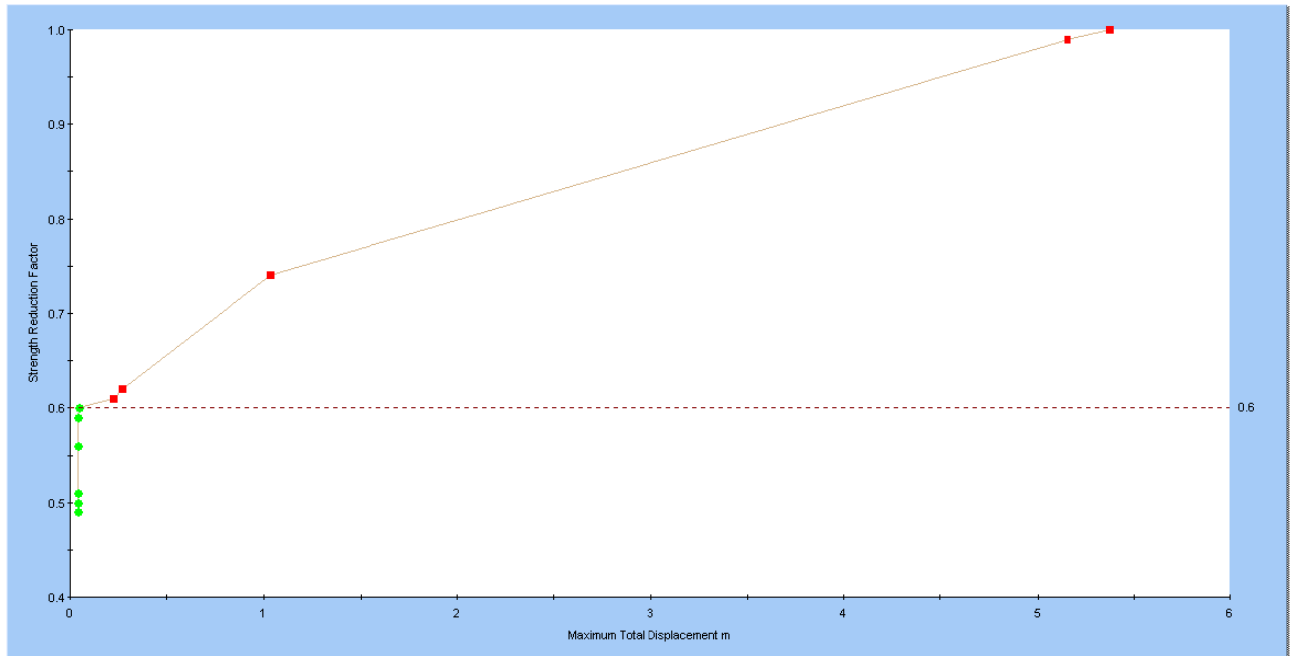
Perfil C-C: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo, análisis pseudo-estático  $kh=0.25$

Ing. Cristina Vintimilla A.



### Perfil C-C: Análisis pseudo-estático $kh=0.25$

Shear Strength Reduction - Critical SRF: 0.6 at Displacement: 0.043 m



### Perfil C-C: Factor de reducción de resistencia a corte vs. Desplazamiento total máximo, análisis pseudo-estático $kh=0.25$

Ing. Cristina Vintimilla A.