

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO BOLÍVAR  
ESCUELA DE CIENCIAS DE LA TIERRA  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA**



**ESTUDIO GEOTÉCNICO DE LA ZONA EN DESLIZAMIENTO  
DE LA CANTERA CANTIL SUR DE LA PLANTA  
PERTIGALETE, KM 6 CARRETERA NACIONAL GUANTA-  
CUMANÁ, ESTADO ANZOÁTEGUI.**

**TRABAJO FINAL DE GRADO  
PRESENTADO POR EL BACHILLER  
MATA A., OSMAR A. PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO**

**CIUDAD BOLÍVAR, JULIO 2.010**

## **DEDICATORIA**

A Dios Todopoderoso, por guiar mi camino hacia el bien, la humildad y la honestidad.

A mis padres Omar y Elida, por haberme enseñado que la mejor herencia que un padre le puede dejar a un hijo es la educación, gracias por haberme educado y enseñado que el triunfo no simplemente es del que llega primero sino del que sabe llegar.

A mis hermanos Eliusmar y Allinson, quienes han sido fuente de estímulo y apoyo para seguir luchando y obtener esta meta.

A toda mi familia Álvarez y familia Mata, que confiaron en mi y dieron su apoyo para lograr el objetivo de ser Ingeniero, a todos ustedes millones de gracias no sabría como agradecerles.

**Osmar Mata**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios Todopoderoso por haberme dado la inteligencia y sabiduría para poder culminar satisfactoriamente mi carrera. A mis padres y mis hermanos, por ser el motivo de mi inspiración, son la mejor familia que dios me pudo dar. A mi tía Solangel, Fidel, y mis primas Fiorelis y Dana, por darme su valioso apoyo durante el desarrollo de este trabajo. A Emilimar Pantoja y la señora Sobella Villazana, mi niña sin sus consejos, amor y apoyo, el éxito no lo conseguiría de esta manera. A mis amigos, Mariana, Daniuska, Pedro, Miguelangel, Ramses, Luis, Valentina, Alicia, Mayerline, ustedes son parte de mi vida y siempre les agradeceré su apoyo y amistad incondicional. A la Universidad de Oriente, profesores y estudiantes por haberme permitido formar parte de su gran familia; en especial a los profesores Galo Yáñez, Dafnis Echeverría, Jockling Lima, Alexis Miro, Javier Ramos, gracias por brindarme sus conocimientos y apoyo. A la empresa Cemex de Venezuela planta Pertigalete, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi trabajo de grado en sus instalaciones, en especial a los ingenieros Adriana Rodríguez y José Gregorio Díaz, por haberme prestado su apoyo, conocimiento y amistad, y de esa forma contribuir a mi éxito. A mis amigos durante el desarrollo de este trabajo de investigación, Lilibeth, Kenny, Víctor, Edgar, Mariangela, Lisbeth, Francisco y Douglas, gracias por haber aportado un granito de arena a mí triunfo. A todos muchísimas gracias y que Dios los bendiga.

**Osmar Mata**

## RESUMEN

El siguiente estudio se desarrolló debido a la necesidad de la Coordinación de Canteras de la Planta Pertigalete, ubicada en el kilómetro 6 de la carretera nacional Guanta – Cumaná, de estudiar geotécnicamente el deslizamiento presente en una de sus canteras, específicamente la Cantera Cantil Sur. El estudio geotécnico del área afectada consta de un reconocimiento geológico que permite verificar la litología y estructuras presentes en los taludes desplazados, un levantamiento topográfico para conocer la morfología y dimensiones del deslizamiento, la toma de muestras para identificar las características químicas del material perturbado, una clasificación geomecánica para determinar la calidad de la matriz rocosa presente, la elaboración de secciones geológicas, la estimación de la cantidad de material desplazado, para posteriormente llevar a cabo el análisis de estabilidad retrospectivo y determinar los métodos aplicables para la recuperación del material y estabilidad de la zona afectada hasta los límites de explotación permitidos. Para los análisis de estabilidad fueron usados tres métodos de equilibrio límite, el de Bishop simplificado, Janbu y Fellenius, usando como medio de verificación el programa de análisis de estabilidad de taludes denominado Slide 5.0. Llegando a la conclusión de que en el área afectada se presenta el posible contacto transicional entre las Formaciones Cantil y Barranquin, evidenciado por el cambio litológico entre calizas macizas e intercalaciones de areniscas y lutitas negras, con un total de 171888,5 m<sup>3</sup> de material desplazado, de calidad de roca mala, resultando inestable para una superficie de rotura compuesta de factor de seguridad menor a los 1.3, de acuerdo a los rangos denominados estables para canteras a cielo abierto de matriz rocosa. Proponiendo la corrección del deslizamiento mediante el uso de métodos técnicos y rentables como la extracción y relocalización de material, abatimiento de taludes, diseño de sistemas de drenajes superficiales, uso de explosivos, y generación de nuevos bancos.

## CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN.....	iv
CONTENIDO .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABLAS .....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
SITUACIÓN A INVESTIGAR .....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos de la investigación .....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Justificación de la investigación .....	4
1.4 Limitaciones de la investigación.....	5
CAPÍTULO II .....	6
GENERALIDADES .....	6
2.1 Ubicación geográfica .....	6
2.2 Acceso al área .....	6
2.3 Características físicas y naturales .....	8
2.3.1 Clima.....	8
2.3.2 Precipitación.....	8
2.3.3 Evaporación .....	9
2.3.4 Temperatura .....	10
2.3.5 Velocidad y dirección del viento .....	11
2.3.6 Suelos y Topografía.....	12
2.3.7 Tectónica.....	13
2.3.8 Geomorfología .....	15
2.3.9 Geología Regional.....	16
2.3.10 Geología local .....	16
CAPÍTULO III.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
3.1 Antecedentes del estudio.....	23

3.2 Movimientos de masa .....	24
3.2.1 Clasificación de los movimientos de masa .....	24
3.2.2 Causas de los movimientos de masa .....	34
3.3 Clasificaciones geomecánicas .....	41
3.3.1 Clasificación Rock Mass Rating (RMR) .....	41
3.4 Análisis de estabilidad de taludes .....	42
3.4.1 Método ordinario de Fellenius .....	45
3.4.2 Método simplificado de Bishop .....	46
3.4.3 Método de Janbu .....	48
3.5. Métodos mecánicos para la corrección de fallas en taludes.....	49
3.5.1 Métodos de elusión .....	50
3.5.2 Métodos de excavación.....	51
3.5.3 Abatimiento de taludes.....	52
3.5.4 Empleo de bermas y escalonamiento .....	55
3.5.5 Uso de explosivos .....	56
3.5.6 Empleo de vegetación .....	58
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>60</b>
<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>60</b>
4.1 Nivel de investigación.....	60
4.2 Diseño de la investigación .....	60
4.3 Población de la investigación.....	61
4.4 Desarrollo de la investigación .....	61
4.4.1. Planificación del trabajo de campo .....	63
4.4.2. Ejecución del trabajo de campo .....	63
4.4.3. Interpretación de la información en actividades de oficina .....	79
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>82</b>
<b>ANÁLISIS e interpretación DE RESULTADOS .....</b>	<b>82</b>
5.1 Levantamiento geológico de superficie .....	82
5.1.1 Estación N°1 .....	82
5.1.2 Estación N°2 .....	84
5.1.3 Estación N°3 .....	85
5.1.4 Estación N°4 .....	87
5.1.5 Estación N°5 .....	88
5.1.6 Estación N°6 .....	90
5.2 Levantamiento topográfico .....	90
5.3 Determinación de parámetros morfológicos .....	92
5.4 Determinación de las características químicas del material deslizante.....	93
5.5 Elaboración de perfiles geológicos .....	94
5.5.1 Perfil geológico C-C' .....	95
5.6 Estimación de material desplazado .....	95

5.7 Repercusión del deslizamiento en la evolución y desarrollo de la cantera Cantil Sur .....	97
5.8 Clasificación geomecánica.....	98
5.8.1 Clasificación geomecánica de la roca Caliza.....	98
5.8.2 Clasificación geomecánica de la roca Caliza con presencia de cristales ...	99
5.8.3 Clasificación geomecánica de macizo de Arenisca .....	100
5.9 Análisis de estabilidad retrospectivo (Back-análisis) .....	101
5.9.1 Perfil A-A` .....	102
5.9.2 Perfil B-B´ .....	103
5.9.3 Perfil C-C´ .....	104
5.9.4 Perfil D-D` .....	105
5.10 Procedimientos y métodos aplicables para la recuperación del material afectado por el deslizamiento.....	107
5.10.1 Métodos aplicables a la zona 1 .....	107
5.10.2 Métodos aplicables a la zona 2 .....	110
5.10.3 Métodos aplicables a la zona 3 .....	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
Conclusiones .....	113
Recomendaciones.....	115
REFERENCIAS .....	117
APENDICES.....	121
APÉNDICE A .....	121
Tabla de sondeos en malla 50 x 50 metros de la zona en deslizamiento de la cantera Cantil Sur, con datos básicos como: composición química, profundidad, tipo de contacto y observaciones litoestratigraficas.....	121
APÉNDICE B .....	125
Gráficos de los Análisis de Estabilidad Retrospectivos (Back Análisis), mediante los métodos de Janbu Simplificado y Fellenius.....	125
APÉNDICE C .....	132
Ecuaciones de los Métodos de Fellenius, Bishop y Janbu, utilizados para los análisis retrospectivos .....	132
ANEXOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación relativa regional de la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).....	7
Figura 2.2 Ubicación relativa nacional de la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).....	7
Figura 2.3 Precipitación promedio mensual (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete). ....	9
Figura 2.4 Temperatura promedio mensual. Estación Barcelona (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete). ....	11
Figura 2.5 Velocidad media promedio mensual. Estación Barcelona (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).....	12
Figura 2.6 Principales estructuras geológicas presentes al Norte de Venezuela (Felder, B. <i>et, al.</i> 1980).....	15
Figura 2.7 Formaciones Geológicas que afloran en la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete). ....	17
Figura 2.8 Extensión geográfica de la Formación Barranquin (www.pdv.com/lexico).....	18
Figura 2.9 Extensión geográfica de la Formación Cantil (www.pdv.com/lexico).....	20
Figura 2.10 Extensión geográfica de la Formación Chimana (www.pdv.com/lexico).	21
Figura 2.11 Extensión geográfica de la Formación Querecual (www.pdv.com/lexico).	22
Figura 3.1 Deslizamientos rotacionales en suelo y roca (Modificado de González de Vallejo, 2002).....	26
Figura 3.2 Deslizamientos traslacionales en suelo y roca (Modificado de González de Vallejo, 2002).....	27
Figura 3.3 Flujos en suelos, derrubios y bloques rocosos (Modificado de González de Vallejo, 2002).....	28

Figura 3.4 Desprendimientos en suelo y rocas (Modificado de González de Vallejo, 2002).	30
Figura 3.5 Vuelcos o desplomes en rocas y suelos (Modificado de González de Vallejo, 2002).	31
Figura 3.6 Separaciones laterales en suelos y bloques rocosos (Modificado de González de Vallejo, 2002).	33
Figura 3.7 Fuerzas actuantes en las dovelas por el método ordinario de Fellenius (Modificado de González de Vallejo, 2002).	46
Figura 3.8 Fuerzas actuantes en las dovelas por el método de Bishop Simplificado (Modificado de González de Vallejo, 2002).	47
Figura 3.9 Tanteo con diversos círculos y obtención del $F_s$ mínimo correspondiente a un talud (Modificado de González de Vallejo, 2002).	48
Figura 3.10 Estabilización de una falla por remoción de material en su cabeza.(Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2005).	52
Figura 3.11 Mecanismo de abatimiento para el beneficiode la estabilidad (Modificado de Rico A. yDel Castillo H., 2009).	54
Figura 4.1 Flujograma de las actividades desarrolladas.	62
Figura 4.2 Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a la IAEG (Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2009).	65
Figura 4.3 Trituración y homogenización de las muestras.	66
Figura 4.4 Secado al horno de la muestra.	67
Figura 4.5 Molienda de la muestra.	68
Figura 4.6 Preparación de la muestra para la pastilla.	68
Figura 4.7 Creación de la pastilla usada para el análisis de Rx.	69
Figura 4.8 Análisis de rayos x.	70
Figura 4.9 Perfiles estandar de rugosidad (Modificado de González de Vallejo, 2002).	75
Figura 5.1 Flanco izquierdo del deslizamiento.	83
Figura 5.2 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°1.	83

Figura 5.3 Capa lutítica identificada como plano de falla. ....	84
Figura 5.4 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°2. ....	85
Figura 5.5 Frente de escarpe aflorante en la estación N°3. ....	86
Figura 5.6 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°3. ....	86
Figura 5.7 Escarpe derecho generado por el deslizamiento. ....	87
Figura 5.8 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°4. ....	88
Figura 5.9 Litología presente en la estación N° 5. ....	89
Figura 5.10 Desplazamiento de bloques de caliza en la estación N° 5. ....	89
Figura 5.11 Corona del deslizamiento y grietas secundarias de la corona. ....	90
Figura 5.12 Levantamiento topográfico de la zona en deslizamiento. ....	92
Figura 5.13 Dimensiones de los movimientos en masa según la IAEG (Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2005). ....	93
Figura 5.14 Perfil geológico C-C´ de la cantera Cantil Sur. ....	95
Figura 5.15 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil A-A´ mediante el método de Bishop simplificado. ....	103
Figura 5.16 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil B-B` mediante el método de Bishop simplificado. ....	104
Figura 5.17 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil C-C´ mediante el método de Bishop simplificado. ....	105
Figura 5.18 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil D-D´ mediante el método de Bishop simplificado. ....	106

## LISTA DE TABLAS

- Tabla 3.1 Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas (Modificado de González de Vallejo, 2002). 36
- Tabla 3.2 Factores influyentes en el comportamiento geomecánico de los materiales (Modificado de González de Vallejo, 2002). 40
- Tabla 4.1 Rangos de valores de resistencia a la compresión simple (Modificado de González de Vallejo, 2002). 71
- Tabla 4.2 Descripción del espaciado (Modificado de González de Vallejo, 2002). 72
- Tabla 4.3 Descripción de la longitud de una discontinuidad (Modificado de González de Vallejo, 2002) 73
- Tabla 4.4 Descripción de las aberturas (Modificado de González de Vallejo, 2002). 74
- Tabla 4.5 Descripción del grado de alteración (Modificado de González de Vallejo, 2002) 76
- Tabla 4.6 Clasificación general de los macizos (Modificado de González de Vallejo, 2002). 77
- Tabla 4.7 Corrección por la orientación de las discontinuidades (Modificado de González de Vallejo, 2002). 77
- Tabla 4.8 Clasificación geomecánica (RMR) de Bieniawsky (1989) (Modificado de González de Vallejo, 2002). 78
- Tabla 5.1 Levantamiento topográfico del deslizamiento de la Cantera Cantil Sur. Planta Pertigalete. 91
- Tabla 5.2 Características químicas de la roca Caliza presente en el deslizamiento. 94
- Tabla 5.3 Volumen estimado de roca caliza deslizada. 96
- Tabla 5.4 Volumen estimado de material estéril deslizado. 96
- Tabla 5.5 Clasificación geomecánica de la roca Caliza. 99
- Tabla 5.6 Clasificación geomecánica de la roca Caliza con presencia de cristales. 100

Tabla 5.7 Clasificación geomecánica de la Arenisca. 101

Tabla 5.8 Parámetros geotécnicos asumidos para los análisis retrospectivos 102

## **INTRODUCCIÓN**

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos del terreno de diversas características, magnitudes y velocidades, siendo los más frecuentes y extendidos los deslizamientos, llegando a constituir riesgos geológicos potenciales que causan daños económicos y sociales que afectan las actividades y obras humanas.

Un estudio geotécnico de estos procesos es el resultado de los trabajos de inspección y caracterización del suelo afectado, logrando conocer el comportamiento del terreno ante la influencia del mismo.

El modo de entender estos fenómenos naturales es mediante el estudio de los movimientos de masas, sus características, tipos, mecanismos de inestabilidad, de los factores que los controlan y de sus causas; lo cual incide en el análisis del deslizamiento presente en la cantera Cantil Sur de la planta Pertigalete, estimando las reservas de materia prima afectadas, generando métodos y procedimientos aplicables para su recuperación y corrección; logrando el objetivo de la Coordinación de Cantera de cumplir con el plan de explotación y producción ya establecido.

La investigación realizada se estructuró en cinco capítulos. El primero plantea en profundidad el problema representándolo como una necesidad de estudio. El segundo Capítulo que contempla términos generales relacionados a este estudio. El tercer Capítulo hace referencia al marco teórico que sustenta la investigación. El cuarto Capítulo describe el marco metodológico, el cual contiene el tipo y esquema de investigación, al igual que la metodología y población objeto de estudio; el quinto Capítulo esboza los análisis e interpretación de los resultados, seguido de las conclusiones y recomendaciones generadas.

# **CAPÍTULO I**

## **SITUACIÓN A INVESTIGAR**

### 1.1 Planteamiento del problema

Los movimientos de masa son procesos gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original. La clasificación de estos procesos se basa en el mecanismo del movimiento, por lo que se dividen en desprendimientos, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos.

En el caso de los deslizamientos, estos consisten en un descenso masivo y relativamente rápido de materiales a lo largo de una pendiente. Efectuándose a lo largo de una superficie de deslizamiento, o plano de cizalla, que facilita la acción de la gravedad, afectando a tierras poco compactas como a rocas. El movimiento ocurre debido a dos causas fundamentales, de tipo externo y de tipo interno, las causas externas son aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales; en tanto que las causas internas son las que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o esfuerzos.

En la Planta Pertigalete, la presencia de desastres naturales asociados a deslizamientos han demostrado la necesidad de identificar estos procesos, reconociendo los riesgos y situaciones ligados a ellos.

Por lo cual, la Gerencia de Producción en conjunto con la Coordinación de Canteras, propuso la realización del estudio geotécnico del área en deslizamiento de la cantera Cantil Sur, interpretando los factores que inciden a este fenómeno, analizando la repercusión de este en el desarrollo de la cantera, y así generar los procedimientos aplicables para la recuperación y estabilidad de la zona afectada. Todo esto implementando metodologías, técnicas y herramientas para la caracterización de los movimientos de masas, cumpliendo de esta manera con la planificación y explotación de la cantera.

## 1.2 Objetivos de la investigación

### 1.2.1 Objetivo general

Estudiar geotécnicamente el área en deslizamiento presente en la cantera Cantil Sur de la planta Pertigalete ubicada en el km 6 carretera nacional Guanta-Cumaná estado Anzoátegui.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Realizar el levantamiento geológico y topográfico de la zona en deslizamiento.
2. Determinar los parámetros morfológicos del deslizamiento.
3. Determinar las características químicas del material deslizante apto para la producción de cemento y agregados.
4. Elaborar perfiles geológicos de la zona en deslizamiento.

5. Estimar la cantidad de material de Caliza y Estéril aprovechable para la producción de cemento y agregados.

6. Analizar la repercusión del deslizamiento en la evolución y desarrollo de la cantera Cantil Sur.

7. Realizar un análisis de estabilidad retrospectivo, para así determinar el tipo y causas del deslizamiento presente.

8. Generar métodos y procedimientos aplicables para la recuperación del material y estabilidad de los bancos afectados por el deslizamiento hasta los límites permitidos en la explotación.

### 1.3 Justificación de la investigación

Los trabajos de explotación dentro de la Planta Pertigalete se llevan a cabo cumpliendo objetivos de calidad establecidos, suministrando las materias primas requeridas a las plantas de cemento para la producción de Clinker y agregados. La explotación de la materia prima en las canteras se realiza sobre la base de una planificación cuya directriz principal es el uso racional y selectivo de las reservas minerales, con la mínima generación posible de pérdidas en tiempo, operaciones e impactos ambientales. En la cantera Cantil Sur de la Planta Pertigalete esta planificación se ha visto afectada por la presencia de riesgos geológicos como deslizamientos en sus niveles superiores.

La necesidad de un estudio geotécnico del área en deslizamiento (cantera Cantil Sur), incidirá en las soluciones para este fenómeno, ya que mediante su análisis e interpretación se podrán establecer los procedimientos a seguir para la recuperación

de las reservas de materia prima ubicadas tanto en su interior como en sus adyacencias, logrando los objetivos y el beneficio de la Coordinación de Canteras.

#### 1.4 Limitaciones de la investigación

La inexistencia de antecedentes de este tipo de investigación enfocados a los movimientos de masa con proyección geotécnica en la zona, factores ambientales y climáticos que dificultaron el progreso de las actividades en campo, el difícil acceso a ciertas áreas de interés en la zona de estudio y en mayor relevancia la falta de sondeos exploratorios con extracción de núcleos necesarios para análisis geotécnicos mas confiables, fueron factores limitantes para este trabajo de investigación.

## **CAPÍTULO II**

### **GENERALIDADES**

#### 2.1 Ubicación geográfica

La Planta Pertigalete, se encuentra ubicada en el valle del sector Pertigalete, en el Km. 6 de la carretera de la costa, tramo Guanta - Cumaná, formando parte del municipio Guanta, parroquia Guanta del estado Anzoátegui. Ubicada entre las siguientes coordenadas geográficas: Latitud Norte  $10^{\circ}13'00''$ -  $10^{\circ}15'00''$  y Longitud  $64^{\circ}32'00''$ -  $64^{\circ}34'00''$  Oeste. Limitada al Norte por el Mar Caribe, al Sur por la carretera nacional Guanta-Cumaná, al Este por Conomita y la Bahía de Conoma, y al Oeste por el sector Patamacualito (Figura 2.1).

#### 2.2 Acceso al área

Para el acceso a las instalaciones de la empresa, se usa como vía principal la carretera Guanta-Cumaná, específicamente la Troncal 009 de la Carretera de la Costa, hasta llegar al cruce con la vía de acceso privado de la planta Pertigalete (Figura 2.2).

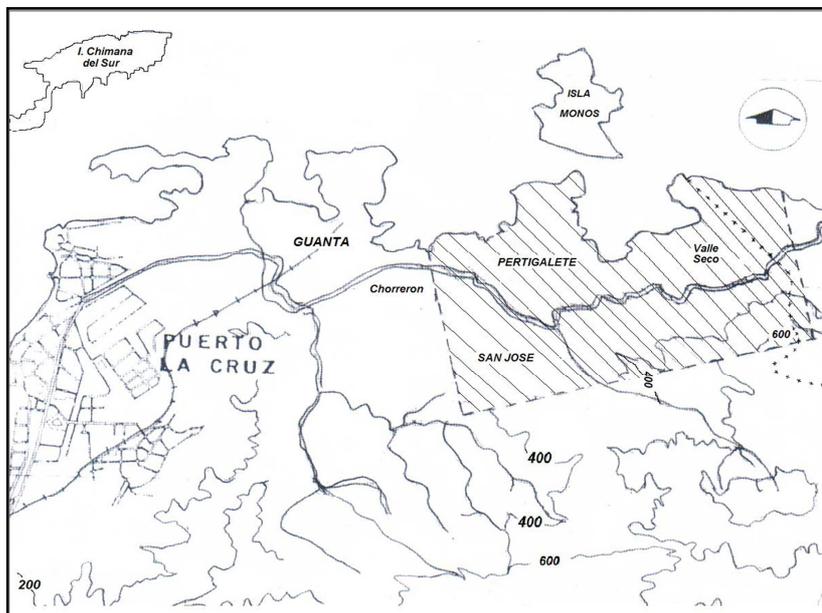


Figura 2.1 Ubicación relativa regional de la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

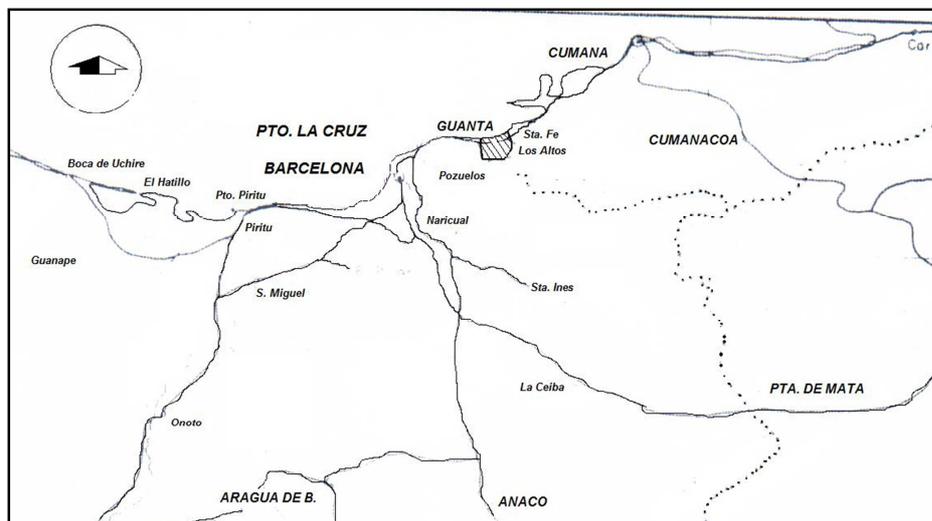


Figura 2.2 Ubicación relativa nacional de la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

## 2.3 Características físicas y naturales

### 2.3.1 Clima

Según la clasificación de L. Holdridge, el área perteneciente a las canteras de la planta Pertigalete corresponde con las categorías de zona de vida denominadas Bosque muy seco Tropical (BsmT) y Bosque seco Tropical (BsT), caracterizadas por las escasas precipitaciones, altas temperaturas y elevada evapotranspiración potencial.

Los parámetros que apoyan esta clasificación corresponden a la información de las estaciones climatológicas cercanas al área del complejo industrial y minero Pertigalete. Las series fueron tomadas de las estaciones: Barcelona, Puerto La Cruz y El Chaparro de la División de Hidrología del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MINAMB) en un período de registro promedio de 27 años (1968-1995).

### 2.3.2 Precipitación

En Venezuela, las precipitaciones son de origen convectivo y orográficos, y de acuerdo a su ocurrencia a través del año o su distribución estacional se puede distinguir una estación seca y otra de lluvia. En la zona de estudio, considerando la proximidad de la costa y la dirección prevaleciente de los vientos en sentido Noreste, los valores de precipitación más significativos a considerar, son los obtenidos con las estaciones de Puerto La Cruz y El Chaparro, con un periodo de registro de 27 años (1968-1995) (Figura 2.3).

La precipitación media anual en la estación Puerto La Cruz, ubicada a 15 m de altitud es de 526,9 mm. Los valores aumentan hacia el Este-Sureste, hasta alcanzar 1.051,48 mm en la estación El Chaparro a 320 m de altitud con respecto al mar.

En el área se presentan siete a ocho meses secos durante el año, los meses secos corresponden a: Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Junio y Diciembre; y los meses más lluviosos son Julio, Agosto y Septiembre. La distribución de la precipitación en el área constituye un elemento determinante para la planificación de los programas de reforestación, recuperación, conservación de suelos y actividades de campo.

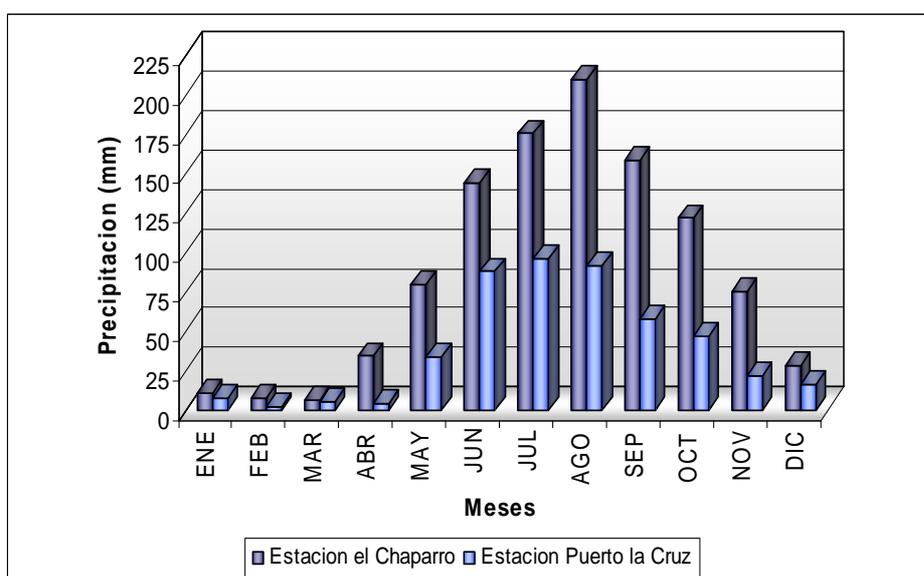


Figura 2.3 Precipitación promedio mensual (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

### 2.3.3 Evaporación

La evaporación guarda una íntima relación con la temperatura y la presión atmosférica. Cuando la temperatura se incrementa en la superficie terrestre la evaporación es mayor. Cuando la presión atmosférica disminuye, las partículas de humedad encuentran menor resistencia para su evaporación, razón por la cual en las montañas el agua se evapora con mayor rapidez que en los valles.

La evaporación en el área de estudio, según la estación Barcelona, presenta promedio de 1513 mm anuales, ocurriendo los máximos en el periodo seco que abarca entre los meses Enero a Mayo y según la información del Estudio Preliminar de Suelos de la Franja Costera Boca de Uchire - Puerto La Cruz, realizado por el MINAMB (1984), se reporta para el área valores de 1612,5 mm., cifra ligeramente superior, lo cual puede estar influenciado por la localización del área de Pertigalete (altura y proximidad a la costa), en general se concluye que la evaporación presenta valores promedios anuales entre 1513 y 1612,5 mm.

#### 2.3.4 Temperatura

La temperatura junto con la precipitación constituyen los elementos más importantes del clima desde el punto de vista humano. En Venezuela, las temperaturas se mantienen más o menos constantes durante todo el año, las cuales son algo elevadas, considerándolas por lo tanto isotérmicas, y de acuerdo al nivel térmico se le considera tropical o caliente.

La temperatura media anual promedio para la zona de estudio se ubica en los 26,7 °C y la máxima en 32,30 °C mientras que la temperatura mínima anual promedio se ubica en los 22,50 °C según registro de temperatura de la estación Barcelona - Aeropuerto, en registro de 22 años (periodo 1968-1990) (Figura 2.4).

En general la temperatura máxima promedio se ubica entre 31,4 y 33,3 °C, alcanzando los máximos entre los meses de Febrero a Mayo, donde inicia descenso para nuevamente incrementar su valor en el mes de Septiembre y de allí nuevamente descender. Las variaciones en este parámetro son muy escasas en torno al promedio, lo cual indica un clima muy homogéneo e isotermo. Los meses del período de lluvias son relativamente más calurosos que los del período seco.

### 2.3.5 Velocidad y dirección del viento

El viento es un elemento del clima que reviste particular interés en actividades que incluyan emisiones a la atmósfera, en tal sentido para conocer las características de este elemento se utilizan los datos del registro de la estación Barcelona - Aeropuerto, como la más próxima al área de estudio y con registro de 20 años (Figura 2.5).

Según los datos de registro, las mayores velocidades del viento ocurren entre los meses de Enero y Mayo, con valores de 10,46 a 11,16 Km/hr y con dirección prevaleciente N-NE alcanzando el máximo de 12,20 Km/hr en los meses de Marzo y Abril.

A partir del mes de Julio, iniciado ya el período lluvioso, la dirección prevaleciente cambia a E-SE y baja su velocidad a magnitudes de 8,31 (mes de Julio) hasta finales de año, donde se inicia el aumento con valor de 9,08.

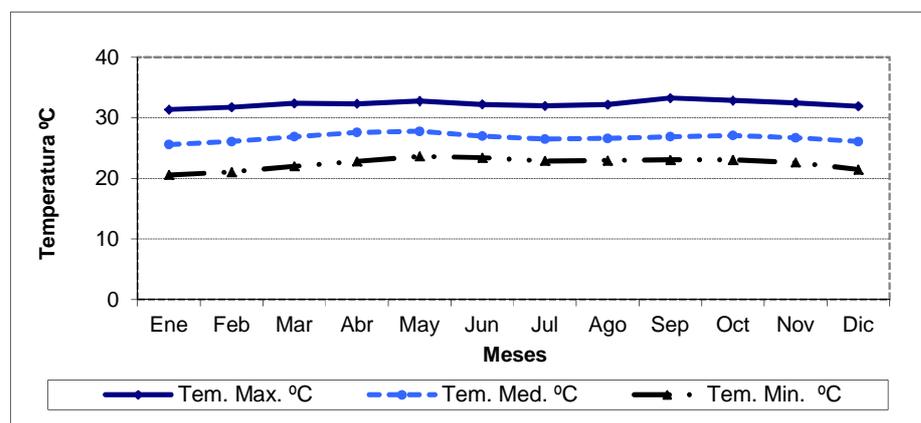


Figura 2.4 Temperatura promedio mensual. Estación Barcelona (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

La intensidad del viento es mayor durante el día, lo cual facilita la dispersión de partículas suspendidas en la atmósfera, producidas por las actividades asociadas a la fabricación del cemento. En la noche, al bajar la temperatura, la base de las nubes desciende y produce, conjuntamente con las brisas locales tierra-mar, un proceso de menor dispersión y decantación de polvo sobre las áreas cercanas, particularmente en las ubicadas hacia el Oeste de Pertigalete (Los Sectores Pamatacualito, Chorrerón y Guanta).

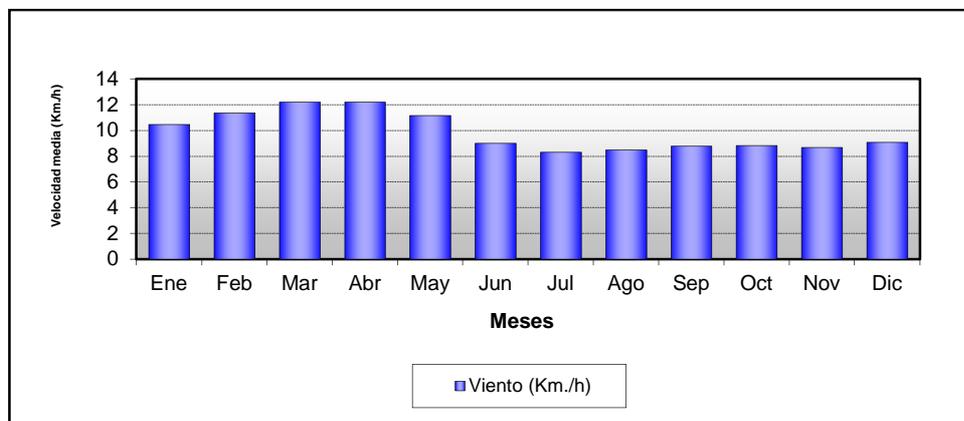


Figura 2.5 Velocidad media promedio mensual. Estación Barcelona (Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

### 2.3.6 Suelos y Topografía

En el área se pueden identificar dos tipos de espacios, uno donde el suelo está ausente y corresponde a los afloramientos rocosos sin ningún tipo de uso agrícola, la presencia de suelos es muy localizada y restringida a las grietas y pequeñas zonas de relleno existentes en el afloramiento, y el otro espacio que corresponde a suelos superficiales poco profundos localizados en el fondo del valle de la quebrada Pertigalete y que constituye parte del espacio donde se asienta el parque industrial

(Plantas de fabricación de cemento), áreas de servicios industriales y la zona de equipamiento de planta Pertigalete (Plan de explotación canteras Cantil, Vivero, Querecual y San José. Enero-Diciembre, 2009).

En las zonas bajas del valle de la quebrada Pertigalete, si bien los suelos son superficiales, presentan un mayor continuo del horizonte superficial y en ciertos espacios son más profundos, permitiendo el sostenimiento de ciertos cultivos, estos espacios son muy reducidos y no constituyen un recurso potencial de relevancia.

El uso actual del suelo es predominantemente minero para toda la unidad que constituye el complejo industrial y minero Pertigalete, seguido de tierras sin uso. La vocación natural es minera por presencia de grandes afloramientos de roca caliza de óptima calidad para la fabricación de cemento. De acuerdo a estudios preliminares realizados por el MINAMB, las características de los suelos en los alrededores de Pertigalete reportan asociaciones clasificadas como Usthorthens (50%), con afloramientos rocosos (20%), tierras de ripio (20%) donde el 90% de la superficie esta cubierta por fragmentos rocosos.

La topografía general es accidentada, con pendientes de rango dominante entre 30% y 60%, y presencia de escarpes rocosos, los suelos son poco profundos de texturas gruesas a medias, Franco Arenosas–Franco Arcillosas (Fa-Fa), con un horizonte superficial delgado de color claro y pobre en carbono orgánico.

### 2.3.7 Tectónica

El área estudiada se encuentra situada en el extremo Norte de la provincia geosinclinal. Regionalmente los efectos tectónicos de la Orogénesis ocurrida en el Cretácico Superior, incluyen expresiones tectónicas tales como plegamientos, fallas, bloques tectónicos caídos, y en ocasiones volcados. Todas estas expresiones son el

resultado de movimientos de compresión y distensión ocurridos durante las diversas fases de la Orogénesis

Analizando la tectónica regional se encuentran series de plegamientos anticlinales y sinclinales originados por fuerzas compresivas provenientes del Norte y causados por empujes de la placa del Caribe lo que ocasionó que los ejes axiales se dispongan en su mayoría con un rumbo aproximado Este-Oeste, posterior a los movimientos de compresión se origino un periodo de reajuste durante el cual aparentemente hubo movimientos de distensión originando fallamientos y desplazamientos verticales normales e inversos con direcciones generalmente Este-Oeste para los planos de falla.

La tectónica regional es bastante compleja, pero mediante las observaciones en campo del área de estudio y la información geológica recopilada se puede determinar que localmente no existen disturbios tectónicos mayores, salvo una serie de fallas con direcciones variables tanto NE-SW como NW-SE, un anticlinal con dirección de eje axial NW-SE, y el cambio de buzamiento de ciertas capas que conforman la zona Norte de la Cantera Cantil, desde unos  $15^\circ$  en la zona Oeste hasta unos  $30^\circ$  en el Este de la cantera Cantil (Figura 2.6).



rocas consolidadas y de mayor resistencia de la Formación El Cantil ubicadas al Norte, son una de las variables más notables del área.

### 2.3.9 Geología Regional

Las unidades litológicas que afloran en Venezuela Oriental y que corresponden al periodo Cretácico son distribuidas desde el Barremiense, Formación Barranquín, Aptiense – Albiense, Formación El Cantil y Formación Chimana, hasta el Cenomaniense a Maestrichense, el Grupo de Guayuta que incluye a la Formación Querecual y la Formación San Antonio. La sedimentación durante el Cretácico corresponde a un período predominante de avance marino sobre la paleoplataforma continental, debido al hundimiento progresivo en el borde, septentrional del Escudo de Guayana. Estudios de correlación muestran que la paleo costa o línea de aguas avanzo casi hasta el curso actual del río Orinoco. El resultado es que a lo largo y ancho de la provincia geosinclinal encontramos litotipos representativos de ambientes neríticos-costeros y litorales, predominando las facies de areniscas con desarrollos locales de caliza.

### 2.3.10 Geología local

En el sector Pertigalete aflora toda la sección geológica del Cretáceo Inferior y parte del Cretáceo Superior desde la Formación Barranquín, hasta la Formación Querecual, cuyos caracteres distintivos son consecuencia de la transgresión marina que se produjo en toda la región de Venezuela Oriental. Las facies resultantes son predominantemente areniscas, tanto en la parte inferior como en la parte superior de la columna sedimentaria, con desarrollos de calizas que constituyen importantes yacimientos (Figura 2.7).

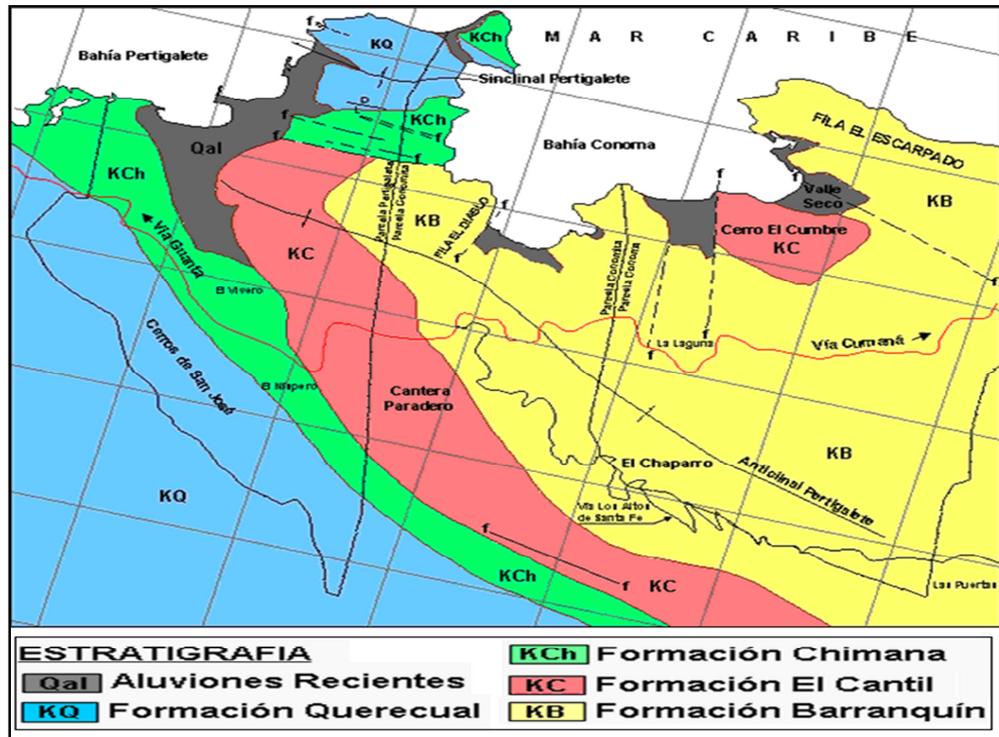


Figura 2.7 Formaciones Geológicas que afloran en la planta Pertigalete (Modificado de Plan de Explotación cantera Cantil de la Planta Pertigalete).

La Formación Barranquín, está constituida básicamente por areniscas cuarcíticas, suprayacente se encuentran las calizas de la Formación El Cantil, de potentes capas calcáreas de alto contenido de  $\text{CaCO}_3$ , luego sigue la Formación Chimana, constituida principalmente por intercalaciones de lutitas y areniscas, y finalmente en la parte superior, está la Formación Querecual constituida por intercalaciones de calizas silíceas con lutitas calcáreas.

2.3.10.1 Formación Barranquín: la formación Barranquín aflora extensamente en toda la Serranía del Interior Oriental, no se conocen su base, ni tampoco la naturaleza del contacto inferior. El contacto superior fue situado por Hedberg y Pyre (1944) en el inicio de la alternancia de calizas, areniscas y lutitas de la Formación El Cantil (Figura 2.8).

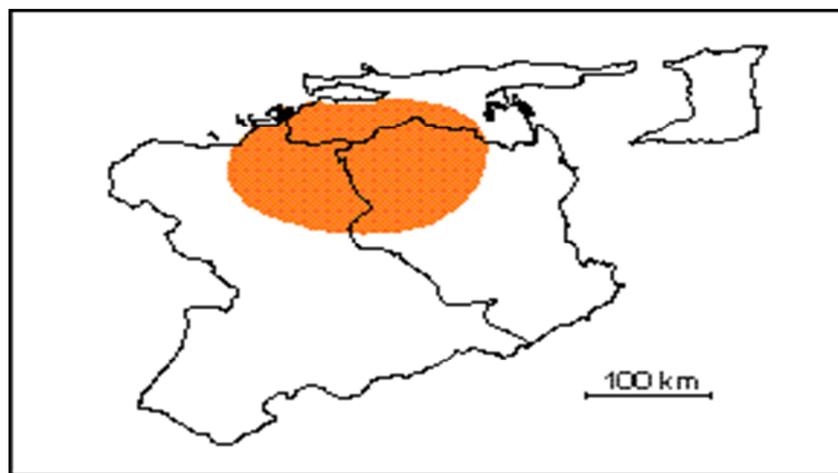


Figura 2.8 Extensión geográfica de la Formación Barranquin  
([www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico)).

Liddle (1928) definió la Formación Barranquín, como "un gran espesor de areniscas cuarcíticas, rojizo-blanquecino, intercaladas con lutitas varicoloreadas de verdosas a negras, más comunes en la parte superior". Hedberg (1950) amplía la descripción, con la observación de los espesores plurimétricos de las capas, y la presencia de estratificación cruzada en gran escala, presente en casi todos los horizontes de areniscas.

Las rocas están dispuestas en potentes estratos o capas, formando en ocasiones pliegues, fallas y diaclasas estratificadas con lutitas de colores oscuros. Las calizas

que afloran en esta formación son gris azuladas, macizas y a veces se pueden interestratificar con areniscas y lutitas.

Sobre esta formación predominan procesos geomorfológicos que permiten la formación de suelos y consecuentemente la masa vegetal que existe sobre éstas áreas, cuando no han sido intervenidas, es más densa debido a la presencia de suelos arcillo-arenosos que mantienen mejores condiciones de humedad edáfica.

2.3.10.2 Formación El Cantil: tiene una extensión geográfica que abarca Serranía del Interior, Venezuela nororiental. Liddle (1928) introdujo el nombre de Formación El Cantil para designar calizas y lutitas suprayacentes a la Formación Barranquín e infrayacentes a la Formación Guayuta (Hoy Grupo Guayuta). Hedberg y Pyre (1944) redescubrieron la unidad a base de secciones más completas en la región de Puerto La Cruz y restringieron el nombre El Cantil a la secuencia en la cual predominan las calizas arrecifales y macizas. La sección suprayacente de lutitas, calizas y areniscas alternantes fue separada con el nombre de Formación Chimana. Hedberg (1950) suministró detalles adicionales e introdujo el nombre de Grupo Sucre, que abarca las formaciones Barranquín, El Cantil y Chimana. El contacto de esta Formación con Chimana está siempre representado por una capa de lutitas negras impermeables. El contacto con la Formación Barranquín es mucho más poroso por la presencia de areniscas (Figura 2.9).

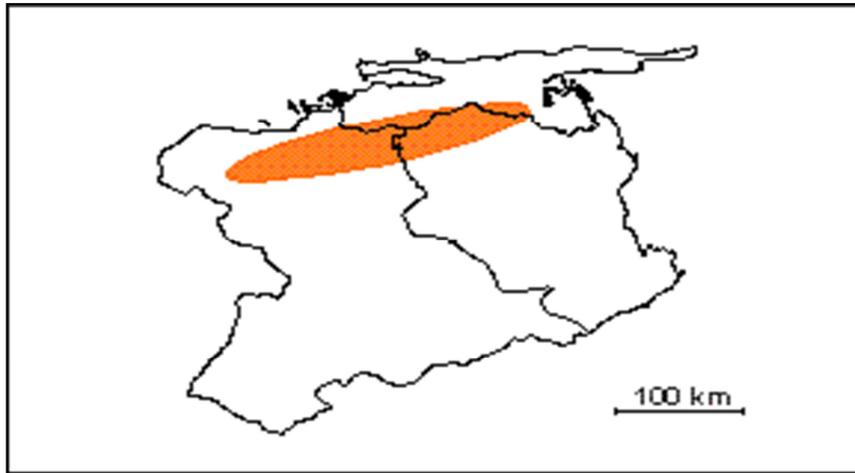


Figura 2.9 Extensión geográfica de la Formación Cantil ([www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico)).

La localidad tipo se ubica en el acantilado conocido con el nombre de El Cantil, en el río Punceres, tres (3) kilómetros al oeste del Municipio Punceres, estado Monagas. Litológicamente, la formación es muy variable lateralmente. Las calizas fosilíferas macizas, frecuentemente con aspecto arrecifal, son típicas y localmente constituyen el mayor volumen de la formación. El resto, están separadas entre sí por cantidades apreciables de arenisca, lutita y caliza finamente estratificadas.

2.3.10.3 Formación Chimana: la Formación Chimana ha sido reconocida en toda la Serranía del Interior y las islas frente a Puerto La Cruz. La referencia original es de Hedberg y Pyre (1944). Posteriormente, Rod y Maync (1954) extendieron su definición al introducir los miembros Corral Viejo, Guácharo y Placeta, los cuales fueron invalidados por autores posteriores (Rosales, 1959; Salvador, 1964), restringiendo su definición a la litología heterogénea entre las formaciones Querecual y El Cantil (Figura 2.10).

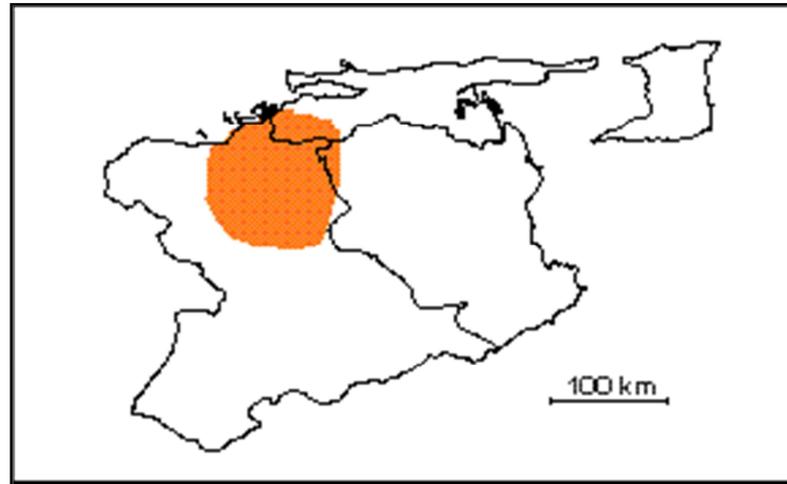


Figura 2.10 Extensión geográfica de la Formación Chimana ([www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico)).

La localidad tipo se encuentra en la Isla Chimana Grande donde predominan las lutitas, pero a medida que se avanza hacia el Sur las areniscas se van incrementando paulatinamente, la formación está compuesta por lutitas, arcillas y areniscas. Esta formación geológica está en el contacto superior de la formación El Cantil y por debajo de la Formación Querecual.

2.3.10.4 Formación Querecual: sus afloramientos abarcan toda la Serranía del Interior en Venezuela nororiental, así como hasta el Archipiélago Guaiquerí, frente a Puerto La Cruz. El primero en dar nombre a la secuencia fue Liddle (1928), quien la incluyó dentro de su Formación Guayuta. Posteriormente, Hedberg (1937) al elevar el término Guayuta, a rango de grupo, empleó el término de Formación Querecual, para designar la mitad inferior del mismo intervalo o criterio éste seguido por autores posteriores. La Formación Querecual fue aceptada formalmente desde la edición del primer Léxico Estratigráfico, y su definición litológica, se ha mantenido casi invariable desde entonces (Figura 2.11).

La localidad tipo se ubica en el río Querecual, en el estado Anzoátegui, entre los puntos a 250 m de distancia aguas arriba, y 600 m aguas abajo, desde Paso Hediondo.

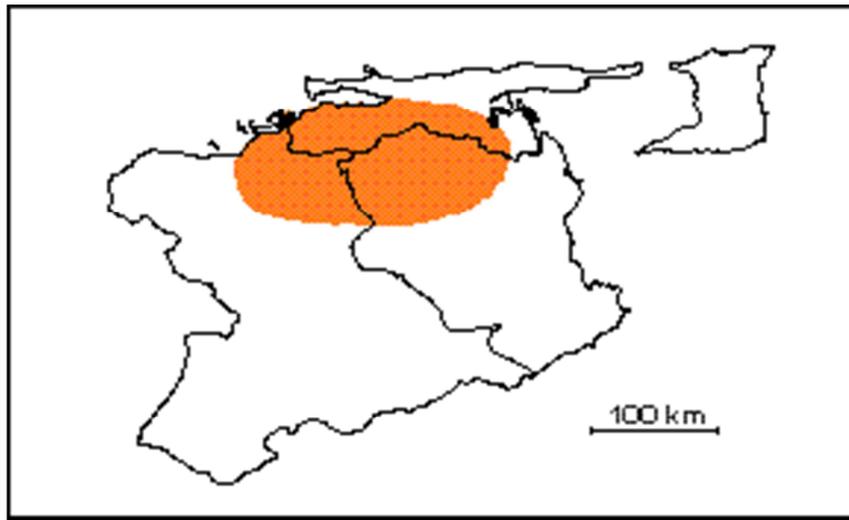


Figura 2.11 Extensión geográfica de la Formación Querecual ([www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico)).

La litología de la formación consiste en calizas arcillosas con estratificación delgada, laminadas, carbonáceo-bituminosas y lutitas calcáreas. El color de las calizas y lutitas es típicamente negro, aunque también han sido reportados colores claros para la unidad, en el subsuelo de la cuenca oriental, la laminación alcanza valores entre 10 y 20 láminas por pulgada, (Hedberg, 1950), la atribuye a la alternancia de foraminíferos planctónicos con material carbonoso. Las calizas son silíceas y de colores oscuros, de aspecto masivo, con frecuentes nódulos de pirita e intercalaciones de yeso y calcita. Tradicionalmente las calizas de la Formación Querecual son denominadas en lenguaje coloquial “esquistos”, haciendo referencia a la textura algo similar al de las rocas metamórficas de este nombre.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO TEÓRICO**

#### 3.1 Antecedentes del estudio

Los primeros pasos en el cálculo analítico en la estabilidad de taludes los dió Coulomb, en el siglo XVIII, al desarrollar un método de cuñas enfocado al estudio de estabilidad de muros, pero también utilizables en taludes desnudos.

Ya en el siglo XIX, la construcción de líneas férreas, obligó a realizar grandes movimientos de tierras, lo que trajo como consecuencia la aparición de importantes deslizamientos y, por tanto, la necesidad de un método de cálculo para prevenirlos. Sin embargo, no es hasta la primera mitad del siglo XX cuando puede hablarse de métodos analíticos que sirvieron de base a los actuales.

En 1910, Fellenius desarrolla un método de cuñas, y en 1916 se utiliza por primera vez el de rebanadas, pero solo para suelos no cohesivos, y no es hasta las dos décadas siguientes que se consigue unificar la metodología para suelos con cohesión y con rozamiento interno, a la vez que se introduce en el cálculo el principio de las presiones efectivas, definidos por Terzaghi en 1926. Los métodos que pueden considerarse modernos se inician en 1954 con el de Bishop, para roturas circulares, y en 1956 el método de Janbu, para superficies no circulares. La complejidad del cálculo ya era inquietante, y las sofisticaciones posteriores llegaron hacer casis utópicas a la aplicación práctica, hasta que la aparición del ordenador convirtió en rutina las metodologías consideradas casi imposibles, como la basada en elementos finitos.

Hoy existen en el mercado numerosos programas informáticos que cubren suficientemente las necesidades de un profesional, siendo necesario indicar que los buenos suelen ser caros, y los baratos, obligan a una tediosa introducción de datos, con el riesgo de cometer un error inadvertido.

Para el desarrollo de esta investigación no se encontraron estudios relacionados a la estabilidad de los taludes presentes en la cantera Cantil Sur. Para ello se revisaron algunos análisis de factores de seguridad realizados durante la construcción de la Troncal 009 (carretera nacional Guanta-Cumaná), sin embargo, dado su antigüedad y a la poca consistencia de información para este trabajo de grado no se tomaron estos datos como referencia.

### 3.2 Movimientos de masa

Los movimientos de masa son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a una cota inferior de la original sin que medie ostensiblemente medio de transporte alguno, siendo tan solo necesario que las fuerzas estabilizadoras sean superadas por las desestabilizadoras. Este tipo de procesos gravitatorios se interrelacionan mutuamente con las precipitaciones altas, de tal forma que frecuentemente las lluvias torrenciales son causantes y/o precursoras de los movimientos en masa, ya que aumentan las fuerzas desestabilizadoras y reducen la resistencia del suelo al deslizamiento (TRAGSA Y TRAGSATEC, 1994).

#### 3.2.1 Clasificación de los movimientos de masa

La clasificación de los movimientos de masa o laderas suelen referirse a los tipos de materiales involucrados, distinguiendo generalmente entre materiales rocosos, derrubios y suelos, y al mecanismo y tipo de la rotura, considerando también otros aspectos, como el contenido en agua del terreno y la velocidad y magnitud del

movimiento. Algunas de las clasificaciones más extendidas (Varnes, 1988), con diversos criterios y fines son de gran utilidad para abordar el estudio de los movimientos de laderas y el conocimiento del comportamiento de los materiales que sufren estos procesos. También han sido establecidas clasificaciones específicas para algunos materiales, como las arcillas, o para algunos tipos de movimientos, como los flujos.

3.2.1.1 Deslizamientos: son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes (hasta varios millones de metros cúbicos). En ocasiones, cuando el material deslizado no alcanza el equilibrio al pie de ladera (por su pérdida de resistencia, contenido de agua o por la pendiente existente), la masa puede seguir en movimiento a lo largo de cientos de metros y alcanzar velocidades muy elevadas, dando lugar a un flujo; los deslizamientos también pueden ocasionar avalanchas rocosas.

Pueden producirse deslizamientos en derrubios (por ejemplo en los colusiones de las laderas, a favor del contacto del sustrato, o en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas, a favor del contacto con la roca sana), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material. El termino derrubio se refiere a un material suelto, sin consolidar, con una proporción significativa de material grueso (Varnes, 1988).

Los deslizamientos rotacionales son mas frecuentes en suelos cohesivos homogéneos. La rotura, superficial o profunda, tiene lugar a favor de superficies curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada las inestabilidad, la masa empieza a

rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre si y dan lugar a escalones con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas. Sus dimensiones mas frecuentes varían entre varias decenas y centenares de metros, tanto en longitud como en anchura, y pueden ser superficiales o profundos (el límite puede establecerse en torno a los 10 m). La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito tipo lóbulo con grietas de tracción transversales. Dependiendo del tipo de suelos y del contenido de agua, se pueden generar flujos (Figura 3.1).

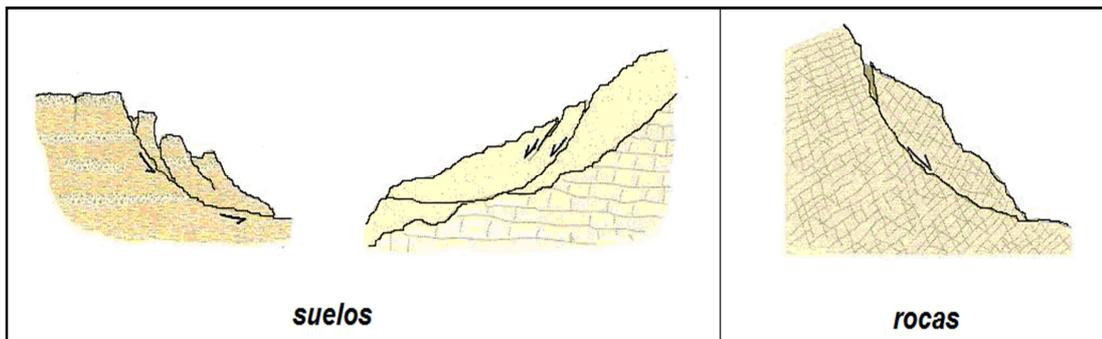


Figura 3.1 Deslizamientos rotacionales en suelo y roca (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Se presenta diferentes modelos de deslizamientos curvos o rotacionales; los de tipo sucesivo se dan en arcillas duras fisuradas con pendientes cercanas a su ángulo de equilibrio y en arcillas blandas muy sensitivas, donde el primer deslizamiento da lugar a una acumulación de arcilla remoldeada que fluye y deja sin sustento al material superior de la ladera, provocándose sucesivas roturas. Son roturas poco profundas pero de gran continuidad lateral. Los macizos rocosos blandos o con alto grado de fracturación o alteración, donde las discontinuidades no constituyen superficies de debilidad preferentes, pueden también sufrir este tipo de rotura.

En los deslizamientos traslacionales la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes (superficies de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural, entre otros); en ocasiones, el plano de rotura es una fina capa de material arcilloso entre estratos de mayor competencia. No suelen ser muy profundos, aunque si muy extensos y alcanzar grandes distancias. Pueden darse en suelos y rocas, y las masas que deslizan en ocasiones son bloques rectangulares previamente independizados por discontinuidades, o por grietas de tracción (deslizamientos de bloques). Son frecuentes en este tipo de inestabilidades los movimientos a impulsos o en fases diferentes en el tiempo según las condiciones de resistencia de los planos de deslizamientos, que no tienen por que presentar una pendiente elevada. Generalmente, los deslizamientos trasnacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas del mecanismo de rotura (Figura 3.2).

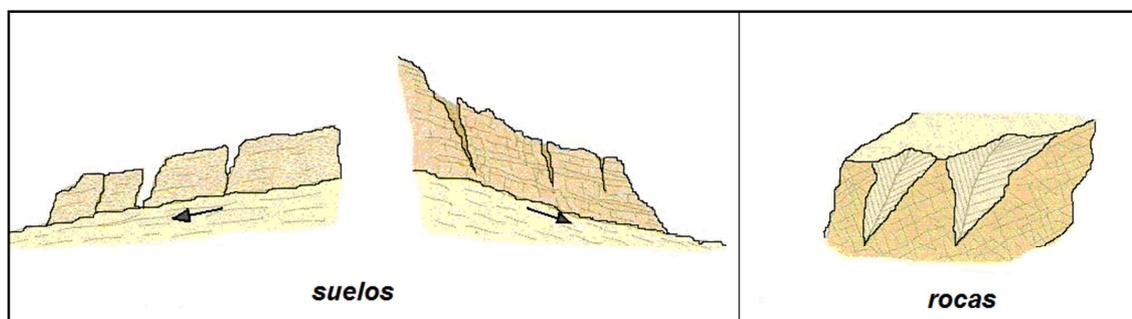


Figura 3.2 Deslizamientos traslacionales en suelo y roca (Modificado de González de Vallejo, 2002).

3.2.1.2 Flujos: los flujos son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o debris flow) o bloques rocosos (coladas de fragmentos rocosos) con abundante presencia de agua, donde el material esta disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua, sin presentar superficies de rotura definidas. El agua es el principal agente desencadenante, por la pérdida de resistencia a que da lugar en materiales poco cohesivos. Principalmente, afectan a suelos arcillosos susceptibles que sufren una considerable pérdida de resistencia al ser movilizados; estos movimientos, poco profundos en relación a su extensión, presentan una morfología tipo glaciar, y pueden tener lugar en laderas de bajas pendientes (incluso menores de  $10^\circ$ ) (Figura 3.3).

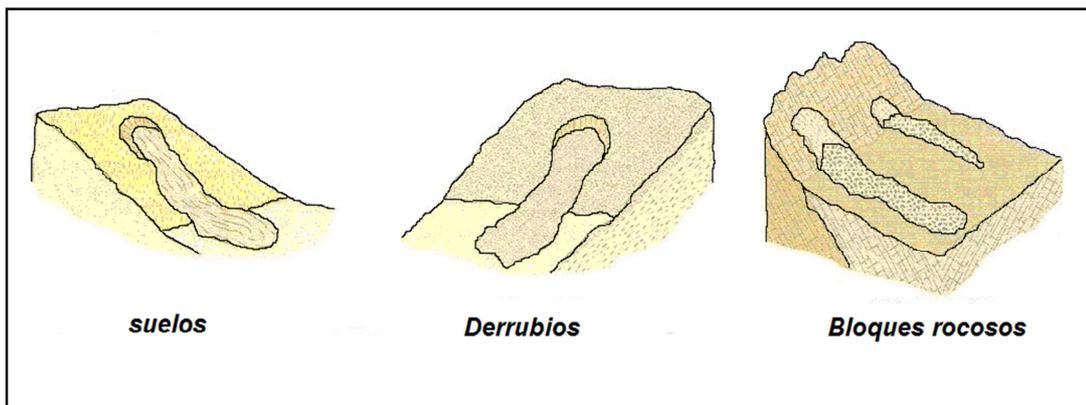


Figura 3.3 Flujos en suelos, derrubios y bloques rocosos (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Los flujos de barro o tierra (mudflow o earthflow) se dan en materiales predominantemente finos y homogéneos, y su velocidad puede alcanzar varios metros por segundo; la pérdida de resistencia suele estar motivada por la saturación en agua. Se clasifican según el tipo de material, características resistentes y contenido de agua. Los flujos de barro presentan generalmente pequeñas magnitudes, pero en ocasiones, sobre todo en condiciones de saturación, pueden ser muy extensos y rápidos, teniendo

consecuencias catastróficas en caso de alcanzar zonas pobladas. Los depósitos de materiales finos volcánicos, por sus propiedades físicas y geomecánicas, son especialmente susceptibles a este tipo de procesos.

Los flujos de derrubios son movimientos complejos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arenas, limos y arcilla. Tienen lugar en laderas cubiertas por material suelto o no consolidado, como es el caso de los depósitos de morrenas glaciares, y especialmente en aquellas donde no existe cobertura vegetal. Según datos recopilados por Corominas y otros (1996), las pendientes del área fuente de los flujos de derrubios varían entre los 20° y los 45°, y en la zona de acumulación entre 5° y 15°, alcanzando los procesos velocidades desde menos de 1m/s hasta 12 – 15 m/s.

En algunas clasificaciones, dentro de los flujos se incluyen varios tipos de procesos con características propias, como la reptación, movimiento superficial (unos decímetros) muy lento, prácticamente imperceptible, que afecta a suelos y materiales alterados provocando deformaciones continuas que se manifiestan al cabo del tiempo en la inclinación o falta de alineación de árboles, vallas, muros, postes, entre otros, en las laderas. En ocasiones este movimiento se clasifica como proceso de tipo creep, termino que hace diferencia a una deformación tiempodependiente y que, en todo caso, definiría el comportamiento deformacional de material. La soliflución afecta igualmente a la zona mas superficial de las laderas, y es un movimiento producido por los procesos hielo- deshielo que, por los cambios de temperatura diarios o estacionales, afecta al agua contenida en los suelos finos en regiones frías.

3.2.1.3 Desprendimientos: los desprendimientos son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos (Figura 3.4). Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente, el material considerado no incluye las pequeñas partículas, resultado del intemperismo.

Estos movimientos son definidos con base en el material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas (rock falls), caídas o desprendimiento de detritos (debris falls) y caídas o desprendimientos de suelos (soil falls). La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión, y el desprendimiento o caída es precedido por deslizamientos o vuelcos que separan el material desplazado de la masa intacta (Cruden y Varnes. 1996). Estos movimientos ocurren en laderas fuertemente inclinadas, tanto de tipo natural como artificial.

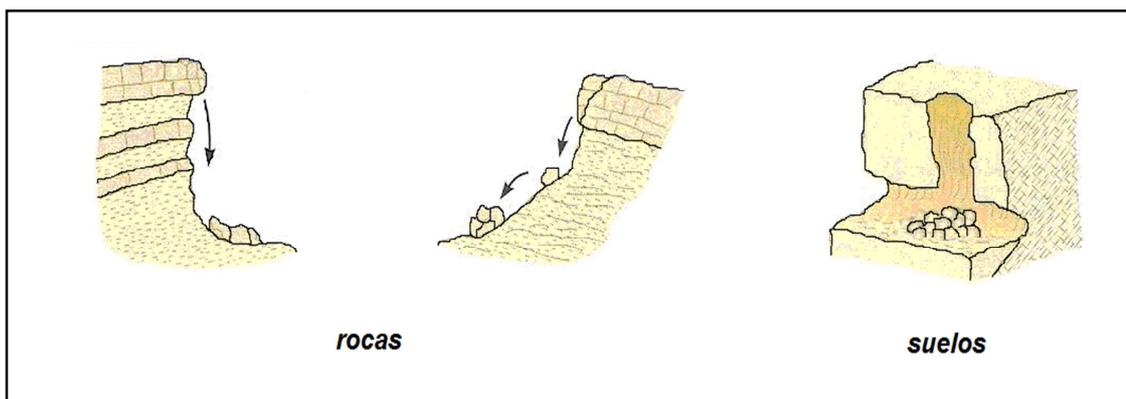


Figura 3.4 Desprendimientos en suelo y rocas (Modificado de González de Vallejo, 2002).

3.2.1.4 Vuelcos o desplomes: un basculamiento es la rotación hacia adelante (afuera) de una masa de suelo o roca, alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada (Cruden y Varnes, 1996) (Figura 3.5).

El basculamiento o volcamiento algunas veces es causado por el empuje del material localizado ladera arriba y otras veces por el agua presente en las grietas del macizo. Los basculamientos producen caídas o desplazamientos del material en movimiento, la geometría del material en movimiento, la geometría de la superficie de separación y la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas. Los basculamientos varían de extremadamente lentos a extremadamente rápidos, algunas veces acelerado con el avance del movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

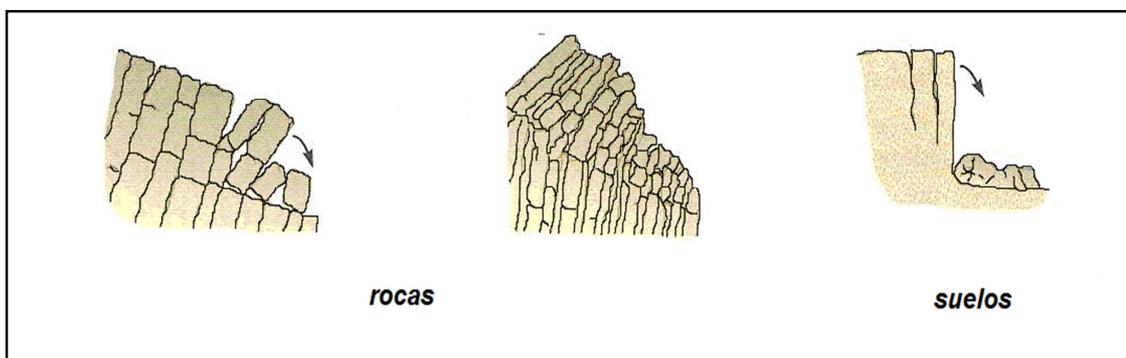


Figura 3.5 Vuelcos o desplomes en rocas y suelos (Modificado de González de Vallejo, 2002)

Se reconocen cuatro tipos de basculamiento o volcamiento:

- Volcamiento flexural: precedido de agrietamientos de tracción en la parte superior, que va separando el material del talud. En este caso los bloques se vuelcan y caen.
- Volcamiento en Chevron: en el cual el buzamiento de las capas que se voltean es constante, y éstas se aíslan del frente rocoso a lo largo de una superficie de debilidad.
- Volcamiento flexural en bloque: se presenta una flexión seudo-continua de largas columnas por movimiento acumulado y diferencial a lo largo de diaclasas transversales.
- Volcamiento de detritos: proceso en el cual se desprenden de algún sitio, en un mecanismo retrogresivo, masas tabulares de suelo, por ejemplo, desde la corona de una deslizamiento, o el barranco de orilla de un cauce.

3.2.1.5 Separaciones laterales: este tipo de movimiento (denominado en algunas clasificaciones como extensión lateral o lateral spreading) hace referencia al movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente y cementado sobre un material blando y deformable. Los bloques se desplazan muy lentamente a favor de pendientes muy bajas. Los movimientos son debidos a la perdida de resistencia del material subyacente, que fluye o se deforma bajo el peso de los bloques rígidos. Los desplazamientos laterales también pueden ser provocados por licuefacción del material infrayacente, o por procesos de extrusión lateral de arcillas blandas y húmedas, bajo el peso de las masas superiores. Se dan en laderas suaves, y pueden ser muy extensos. Las capas superiores se fragmentan generándose grietas, desplazamientos diferenciales, vuelcos, entre otros., presentando las zonas afectadas un aspecto caótico (Figura 3.6).

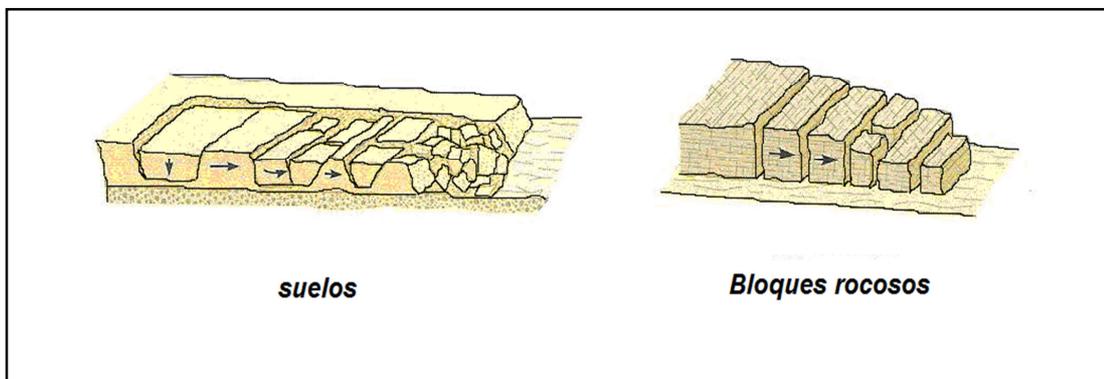


Figura 3.6 Separaciones laterales en suelos y bloques rocosos (Modificado de González de Vallejo, 2002).

3.2.1.6 Movimientos complejos: los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son resultados del colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador.

El material involucrado es metaestable, con una estructura suelta y alta porosidad. Durante el colapsamiento, la carga del terreno es transferida a los fluidos de los poros (generalmente agua), lo que ocasiona un incremento en la presión de estos últimos y, por ende, la pérdida de resistencia, ocasionando el flujo deslizante. Por lo general, la morfología resultante es alargada y estrecha, y el área de depósito tiene un espesor relativamente bajo.

### 3.2.2 Causas de los movimientos de masa

Los procesos de movimientos de masa ocurren debido a dos causas fundamentales, las cuales son de tipo externo y de tipo interno. Las causas externas son todas aquellas que producen un incremento en la tensión o esfuerzos, pero no en la resistencia de los materiales, en tanto que las causas internas son las que disminuyen la resistencia de los materiales sin cambiar la tensión o esfuerzos.

De esta manera, se puede decir que los procesos de movimientos de masa son aquellos movimientos del suelo, detritos y rocas que ocurren en una ladera como resultado de la influencia directa de la gravedad, y que pueden ser desencadenados por factores internos o externos, o bien, en términos más sencillos, que estos procesos

ocurren cuando una porción de la ladera se vuelve muy débil para soportar su propio peso (Tabla 3.1).

Dentro de los factores condicionantes, las propiedades físicas resistentes de los materiales (directamente relacionados con la litología) y las características morfológicas y geométricas de la ladera son fundamentales para la predisposición a la inestabilidad; otros factores importantes son la estructura geológica y discontinuidades, las condiciones hidrogeológicas y los estados tenso-deformacionales.

El relieve juega un papel definitivo, ya que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos gravitacionales. Las regiones montañosas son las zonas más propensas a los movimientos de ladera. No obstante, en ocasiones, y dependiendo de otros factores, es suficiente una pendiente muy baja, de algunos grados, para que tenga lugar determinados tipos de inestabilidades, como los flujos de barro o tierra.

Tabla 3.1 Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas (Modificado de González de Vallejo, 2002).

	Factores	Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia. Comportamiento hidrogeológico
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad. Comportamiento discontinuo y anisotrópico. Zonas de debilidad
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico. Generación de presiones intersticiales
	Deforestación	Modificación en el balance hídrico. Erosión
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación de suelos. Erosión
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes.

La estructura geológica, estratigráfica y litológica determina la potencialidad de los movimientos en los diferentes tipos de materiales rocosos y suelos, y la existencia de planos de discontinuidad que pueden actuar como superficies de rotura. Aspectos como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración y fracturación, porosidad y permeabilidad determinan la posibilidad del terreno de sufrir roturas y desplazamientos bajo la actuación de determinados factores desencadenantes. En los macizos rocosos fracturados, con zonas de alteración, entre otros, estas condiciones son predominantes sobre la litología.

El comportamiento hidrogeológico de los materiales esta asociado a sus características litológicas y estructurales y al grado de alteración y meteorización, aspectos en íntima relación con las condiciones climáticas de una zona determinada. En regiones lluviosas es frecuente la presencia de importantes espesores de materiales alterados y meteorizados sobre los sustratos rocosos, y de niveles freáticos elevados que influyen decisivamente en las condiciones de estabilidad. El agua juega un doble papel negativo en la resistencia de los materiales:

- Reduce la resistencia al corte por la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros resistentes en determinados tipos de suelo.
- Aumenta los esfuerzos de corte por el incremento de peso del terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades.

Las propiedades resistentes ó geomecánicas controlan la resistencia al corte de los materiales y su rotura. Los suelos, por su carácter homogéneo e isótropo, presentan menor complejidad en su caracterización, mientras que en los macizos rocosos, que pueden tener muy diferente grado de fracturación, serán las propiedades

de la matriz, de las discontinuidades o del macizo rocoso en su conjunto, las que determinen la resistencia y el comportamiento.

Con respecto a los factores desencadenantes, los más importantes son las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrogeológicas de las laderas, la modificación de la geometría, la erosión y los terremotos; algunos de ellos, como los cambios de las condiciones de agua y de geometría, frecuentemente son consecuencia de acciones antrópicas.

El desencadenamiento de los movimientos de ladera por causas meteorológicas y climáticas esta relacionado fundamentalmente con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones y con el régimen climático. Las precipitaciones intensas durante horas o días pueden desencadenar movimientos superficiales como deslizamientos y flujos de barro o derrubios, que afectan a materiales de alteración y a suelos, y desprendimiento de bloques rocosos previamente independizados del macizo, siendo frecuentes también las reactivaciones de antiguos deslizamientos.

La erosión o socavación del pie de las laderas, escarpes y acantilados, por erosión fluvial, litoral u otra causa, da lugar a la pérdida de resistencia en esta zona y a la modificación del estado tensional, lo que unido a la falla de apoyo del material suprayacente puede provocar la inestabilidad y la generación de deslizamientos o desprendimientos. La erosión puede ser también interna, debida a diferentes factores, con los mismos efectos sobre la estabilidad de la ladera. En regiones kársticas los procesos de formación y hundimiento de cavidades asociadas a la presencia de carbonatos y yeso pueden desencadenar inestabilidades, sobre todo en este último caso, en que los materiales son más blandos y alterables.

Las actuaciones humanas ocupan un lugar importante dentro de los factores que modifican las condiciones y fuerzas que actúan sobre las laderas. Las excavaciones,

la construcción de presas y embalses, las sobrecargas de edificios, estructuras, terraplenes, rellenos o escombreras sobre laderas y las voladuras en zonas cercanas, entre otros, modifican los estados tensodeformacionales del terreno y sus propiedades geotécnicas, generando inestabilidades. Las principales causas de desestabilización son los cambios de geometría y pendiente, los cambios en las condiciones hidrogeológicas y las fuerzas estáticas externas. En menor medida están las cargas dinámicas y las excavaciones subterráneas bajo las laderas.

A efectos de su incidencia en el comportamiento geomecánico de los suelos y rocas, los factores o agentes que controlan los movimientos de las laderas pueden agruparse en aquellos que contribuyen a reducir la resistencia al corte y aquellos que incrementan los esfuerzos al corte (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Factores influyentes en el comportamiento geomecánico de los materiales (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Reducción de la Resistencia al corte	Aumento de los esfuerzos de corte
<p>Condiciones iniciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Composición, textura y estructura</li> <li>- Fracturas y fallas.</li> <li>- Planos de estratificación y de filiación</li> <li>- Zonas de brechas.</li> <li>- Rocas masivas sobre materiales plásticos.</li> <li>- Alternancia de materiales con diferente permeabilidad.</li> </ul> <p>Cambios en los materiales por meteorización y reacciones físico-químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desintegración física de rocas.</li> <li>- Hidratación de minerales arcillosos.</li> <li>- Desecación de arcillas y de rocas arcillosas.</li> <li>- Disolución y lavado de materiales.</li> </ul> <p>Cambios en las fuerzas intergranulares debidas al agua y presiones de agua en poros y fracturas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitaciones.</li> <li>- Deshielos.</li> <li>- Lagos y embalses.</li> <li>- Riego.</li> <li>- Deforestación.</li> </ul> <p>Cambios en la estructura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Por relajación de tensiones en laderas rocosas en valles o excavaciones.</li> <li>- Por remodelado de suelos finos (arenas, loess) y arcillas sensitivas.</li> </ul> <p>Acción de las raíces de los árboles y arbustos.</p>	<p>Actuación de esfuerzos transitorios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Movimientos sísmicos.</li> <li>- Vibraciones por voladuras. Maquinarias y tráfico.</li> <li>- Deslizamientos cercanos.</li> </ul> <p>Pérdida de confinamiento lateral y en la base de las laderas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erosión del pie de las laderas por ríos, arroyos, olas, mareas, entre otros.</li> <li>- Lluvias.</li> <li>- Erosión interna o subterránea.</li> <li>- Disolución y lavado del material.</li> <li>- Labores mineras.</li> </ul> <p>Cambios en la morfología:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deslizamientos.</li> <li>- Grandes fallas.</li> </ul> <p>Sobrecargas naturales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Peso de la lluvia, nieve y agua de acuíferos.</li> <li>- Acumulación de derrubios, colusiones o masas deslizadas.</li> <li>- Vegetación.</li> </ul> <p>Sobrecargas antrópicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rellenos, escombreras y acopio de materiales.</li> <li>- Edificios y otras estructuras.</li> <li>- Excavaciones.</li> <li>- Retirada de elementos de contención.</li> <li>- Construcción de embalses y lagos.</li> </ul> <p>Presión lateral:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua en grietas y cavidades.</li> <li>- Presencia de materiales expansivos.</li> <li>- Movilización de esfuerzos residuales.</li> </ul>

### 3.3 Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones más útiles en la mecánica de rocas son las denominadas clasificaciones geomecánicas, de las cuales la RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski y la Q de Barton son las más utilizadas. Estas establecen diferentes grados de calidad del macizo en función de las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, y proporciona valores estimativos de sus propiedades resistentes globales.

Existen otras clasificaciones basadas en diferentes parámetros más o menos representativos de las propiedades del conjunto del macizo rocoso, entre estas la que considera el grado de fracturación, medido mediante el índice RQD (Rock Quality Designation), y clasifica al macizo en diferentes grados de calidad.

#### 3.3.1 Clasificación Rock Mass Rating (RMR)

Desarrollada por Bieniawski en 1973, con actualizaciones en 1979 y 1989, constituye un sistema de clasificaciones de macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo. La clasificación cuenta con los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa.
- Grado de facturación en términos de RQD.
- Espaciado de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.

- Condiciones hidrogeológicas.
- Orientación de las discontinuidades con respecto al talud.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, que varía de 0 a 100.

Para aplicar la clasificación RMR se divide el macizo rocoso en zonas o tramos que presenten características geológicas más o menos uniformes de acuerdo con las observaciones hechas en campo, en las que se lleva a cabo la toma de datos y medidas referentes a las propiedades y características de la matriz rocosa y de las discontinuidades.

Una vez obtenidas las puntuaciones que resultan de aplicar los cinco parámetros de clasificación, se efectúa la corrección por orientación de discontinuidades y se obtiene un valor numérico con el que se clasifica finalmente el macizo rocoso. Así, un macizo rocoso podría ser clasificado de clase I, duro, poco fracturado, sin filtraciones importantes y poco meteorizado; lo cual presentaría muy pocos problemas frente a su estabilidad y resistencia.

#### 3.4 Análisis de estabilidad de taludes

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, entre otros. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1.5, e

incluso 2.0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1.3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores.

Estos permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

Los análisis a posteriori de taludes (Back-analysis) se realizan una vez que la rotura se ha producido, y, por tanto, se conoce el mecanismo, modelo y geometría de la inestabilidad. Es un análisis muy útil para la caracterización geomecánica de los materiales involucrados, para el estudio de los factores influyentes en la rotura y para conocer el comportamiento mecánico de los materiales del talud; los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otros taludes de similares características. Estos análisis consisten en determinar, a partir de los datos de campo necesarios (geometría, tipos de materiales, modelos de rotura, presiones hidrostáticas, entre otros), los parámetros resistentes del terreno, generalmente pares de valores de cohesión ( $C'$ ) y ángulo de fricción ( $\phi'$ ), que cumplen la condición de equilibrio estricto del talud (es decir,  $F= 1,0$ ) a lo largo de la superficie de rotura, para las condiciones reales en que esta tuvo lugar.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en:

Métodos determinísticos; conocidas o supuestas las condiciones en que se encuentra un talud, estos métodos indican si el talud es o no estable. Consisten en seleccionar los valores adecuados de los parámetros físicos y resistentes que controlan el comportamiento del material para, a partir de ellos y de las leyes de comportamiento adecuadas, definir el estado de estabilidad o el factor de seguridad del talud. Existen dos grupos: métodos de equilibrio límite y métodos tenso-deformacionales.

Métodos probabilísticos; consideran la probabilidad de rotura de un talud bajo unas condiciones determinadas. Es necesario conocer las funciones de distribución de los diferentes valores considerados como variables aleatorias en los análisis (lo que supone su mayor dificultad por la gran cantidad de datos necesarios, dadas las incertidumbres sobre las propiedades de los materiales), realizándose a partir de ellas los cálculos del factor de seguridad mediante procesos iterativos. Se obtienen las funciones de densidad de probabilidad y distribución de probabilidad del factor de seguridad, y curvas de estabilidad del talud, con el factor de seguridad asociado a una determinada probabilidad de ocurrencia.

La elección del método de análisis mas adecuado en cada caso dependerá de las características geológicas y geomecánicas de los materiales (suelos o macizos rocosos); de los datos disponibles del talud y su entorno (geométricos, geológicos, geomecánicos, hidrogeológicos, entre otros); y del alcance y objetivos del estudio, grado de detalle y resultados que se espera obtener.

Estos factores son, a su vez, interdependientes entre sí; no se podrá efectuar un análisis detallado si no se dispone de los datos necesarios y suficientes, al igual que un caso de estabilidad complejo no podrá ser abordado con un método simple por el hecho de disponer de pocos datos de campo o laboratorio. Asimismo, hay que tener en cuenta que, tanto los datos de campo como los de laboratorio, deberían ser

obtenidos en función del método de análisis de estabilidad que se vaya a emplear y del tratamiento que se les vaya a dar.

#### 3.4.1 Método ordinario de Fellenius

Este método de cálculo se basa en la aplicación directa de los fundamentos de la mecánica racional básica, siendo el primer método de análisis aceptado. El método de Fellenius divide la supuesta zona de deslizamiento en rebanas para una superficie de falla circular, estudiando el estado de fuerzas en cada una de ellas. La condición de equilibrio de cada rebanada viene dada por la superioridad de las fuerzas estabilizadoras sobre las desestabilizadoras en la superficie de deslizamiento. Siendo las estabilizadoras las compuestas por las fuerzas de cohesión y rozamiento interno del terreno; y las desestabilizadoras que estarían identificadas con la componente tangencial de las cargas sobre la superficie de rotura (Figura 3.7).

El método supone que las fuerzas de interacción entre rebanadas (ó dovelas) no influyen de manera significativa en la sección de cálculo, ya que o bien son de pequeña magnitud o bien se anulan casi totalmente entre ellas, por lo cual no satisface el equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para las dovelas individuales.

El análisis consiste también en un procedimiento de tanteo, en el cual se debe fijar distintos círculos de falla, calculando un  $F_s$  ligado a cada uno, es preciso que el  $F_s$  mínimo no sea menor a 1.5, en general, para garantizar en la práctica la estabilidad de un talud. El criterio del analista juega un papel importante en el número de círculos ensayados, hasta alcanzar una seguridad razonable respecto a una  $F_s$  mínimo.

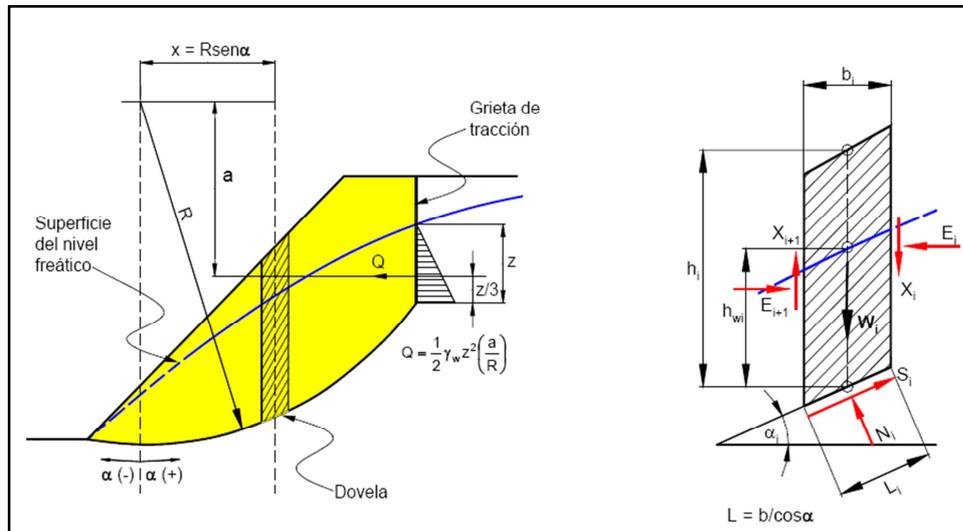


Figura 3.7 Fuerzas actuantes en las dovelas por el método ordinario de Fellenius  
(Modificado de González de Vallejo, 2002).

### 3.4.2 Método simplificado de Bishop

Para evitar los inconvenientes de la hipótesis de Taylor, Bishop desarrollo en 1955 un método de rebanadas, el cual suponía una superficie de rotura circular en la cual la masa deslizante se divide en  $n$  rebanadas o fajas verticales, estableciendo el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada con respecto al centro de un círculo. De la condición de equilibrio de fuerzas verticales de cada rebanada se obtienen las fuerzas  $N$  (normales a la superficie de rotura) y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos. El método de Bishop simplificado (el más conocido y utilizado) supone, además, que las fuerzas de contacto entre cada dos rebanadas no influyen, por estar equilibradas, obteniendo así, la expresión del coeficiente de seguridad  $F$  de una superficie considerada (Figura 3.8).

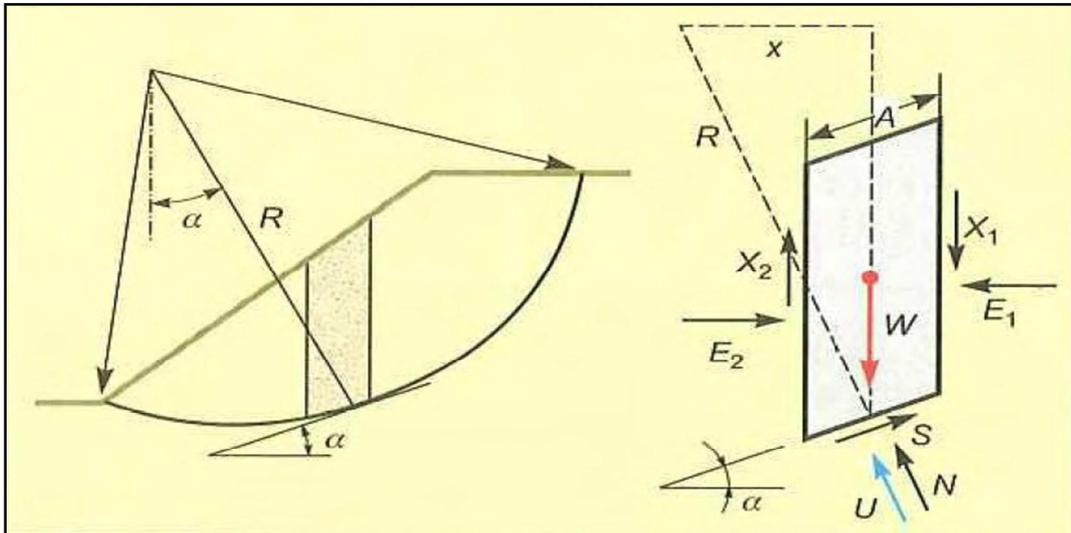


Figura 3.8 Fuerzas actuantes en las dovelas por el método de Bishop Simplificado (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Dado que  $F$  no aparece en la expresión de forma explícita es necesario realizar varias iteraciones para obtener su valor, aunque la convergencia suele ser muy rápida. Una vez obtenido el coeficiente de seguridad  $F$  de la superficie considerada, se supone otra superficie circular y se determina el nuevo valor de  $F$ , y así sucesivamente hasta obtener el mínimo. Normalmente estas expresiones se programan y se analizan círculos con diferentes centros y radios, hasta encontrar el que proporcione el valor de  $F$  mínimo (Figura 3.9).

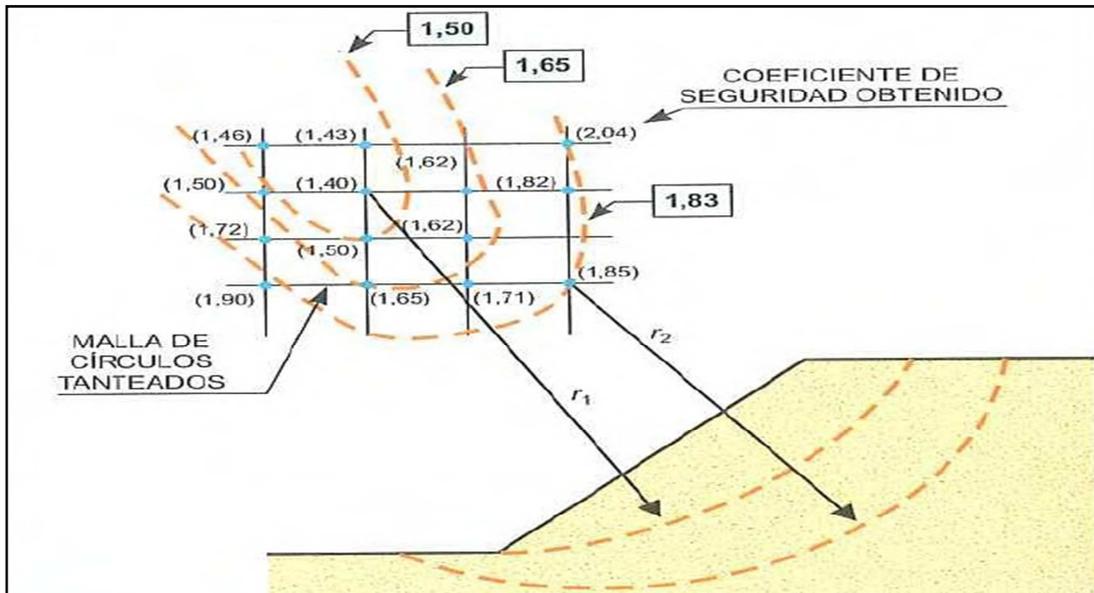


Figura 3.9 Tanteo con diversos círculos y obtención del  $F_s$  mínimo correspondiente a un talud (Modificado de González de Vallejo, 2002).

### 3.4.3 Método de Janbu

El método de Janbu simplificado es muy similar al método de Bishop, pero en el caso que solo se cumple el equilibrio total de fuerzas horizontales, pero no el de momentos. El diagrama de fuerzas actuantes en una dovela es el mismo que el diagrama para el caso de Bishop. El método es una de las primeras rutinas para el análisis de cualquier superficie de rotura, suponiendo que las fuerzas entre elementos son nulas; por lo tanto la expresión obtenida por la fuerza normal a las dovelas es la misma para el método de Bishop. En este caso, el equilibrio de las fuerzas horizontales proporciona un factor de seguridad de equilibrio de fuerzas sin considerar las fuerzas entre elementos ( $F_0$ ). Para incluir el efecto de las fuerzas entre elementos al cálculo se puede aplicar un factor de corrección ( $f_0$ ) de tal manera que el

factor de seguridad del equilibrio de fuerzas horizontales ( $F_f$ ) sea el siguiente (Ecuación 3.1):

$$F_f = f_0 \cdot F_0 \quad (3.1)$$

Donde:

$F_f$  = Factor de seguridad del equilibrio de fuerzas horizontales.

$f_0$  = Factor de corrección.

$F_0$  = Factor de seguridad sin considerar las fuerzas entre los elementos.

Al igual que el método de Bishop una vez obtenido el coeficiente de seguridad  $F$  de la superficie a considerar, se supone otra superficie y se determina el nuevo valor de  $F$ , y así sucesivamente hasta obtener el mínimo. Normalmente estas expresiones se programan y se analizan círculos con diferentes centros y radios, hasta encontrar el que proporcione el valor de  $F$  mínimo.

### 3.5. Métodos mecánicos para la corrección de fallas en taludes

Todos los métodos correctivos siguen una o mas líneas de acción, evitar la zona de falla, reducir las fuerzas motoras, o aumentar las fuerzas resistentes son algunas de ellas. El evitar la zona de falla suele estar ligado a cambios en el alineamiento de la vía, sea el horizontal o el vertical; a la remoción total de los materiales inestables o a la construcción de estructuras que se apoyen en zonas firmes, tales como puentes o viaductos. La reducción de las fuerzas motoras se pueden lograr, en general, por dos métodos: remoción de material en la parte apropiada de la falla y subdrenaje, para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de tierra, que es menor cuando pierden agua.

Por lo común, la línea de acción que ofrece mas variantes es la que persigue aumentar las fuerzas resistentes; algunas de estas son: el subdrenaje que aumenta la resistencia al esfuerzo cortante del suelo; la eliminación de estratos débiles u otras zonas de falla potencial; la construcción de estructuras de retención u otras restricciones y el uso de tratamientos, generalmente químicos, para elevar la resistencia de los suelos al deslizamiento.

### 3.5.1 Métodos de elusión

Indiscutiblemente constituyen los medios mas seguros para eliminar los problemas derivados de deslizamientos y fallas, pero no siempre se pueden utilizar. En otras ocasiones se podrán emplear solo parcialmente, en el sentido de que no se pueda evitar por completo una zona inestable, pero que un ligero cambio de alineamiento haga posible eludir su peor parte o mucha de la longitud de la vía dentro de la zona; en estos casos este tipo de soluciones pueden ser todavía muy valiosos.

Uno de los problemas que mejor responden a la aplicación de estos métodos es el cruzamiento de formaciones inclinadas de suelo o roca, con echado desfavorable a la vía, en estos casos, cambios pequeños del alineamiento horizontal pueden llevar a zonas de mucho menos peligro o inocuas y la elevación de la rasante puede reducir mucho mas los problemas. Si un lado de un valle tiene echado desfavorable, es muy posible que el otro lado lo tenga incluso favorable.

Los métodos de elusión de fallas no contribuyen a estabilizarlas; debido el alto costo que por lo general tienen, lo cual son sus principales limitaciones. La influencia del costo suele ser determinante en fallas pequeñas, pero se disminuye mucho cuando la zona inestable es muy amplia, pues en tal caso, los costos de cualquier método correctivo tienden a crecer.

### 3.5.2 Métodos de excavación

Estos métodos están representados desde excavaciones menores hechas solo en la cabeza de la falla, hasta la remoción total del material inestable. El abatimiento de taludes y el empleo de bermas son métodos que requieren de excavación cuando se construyen cortes, rellenos y terraplenes.

La remoción de material en la cabeza de la falla o en todo el cuerpo de la misma, hasta llegar a la remoción total, es un método que en la práctica solo se puede aplicar en fallas ya manifestadas; rara vez se pueden conocer con tanto detalle las futuras fallas en una zona de inestabilidad potencial como para que resulte prudente proceder a remover materiales en gran escala. Las remociones en la cabeza buscan reducir las fuerzas motoras y balancear la falla; las remociones totales eliminan la causa de raíz, si bien en ella se puede plantear el problema de la inestabilidad de los taludes de la excavación que se produce, los que deben estudiarse siempre cuidadosamente, al igual que las nuevas condiciones de drenaje.

La remoción de materiales suele dar lugar a soluciones bastante permanentes cuando se cuidan en forma conveniente los aspectos de drenaje en la excavación que se efectúe. Son métodos mejores para prevenir que para corregir, pues los costos unitarios de los movimientos de tierra relativamente grandes que implican son menores en construcciones nuevas que en trabajos de reparación.

Cuando una remoción se hace de manera adecuada, debe mejorar las condiciones de drenaje en la zona. El método se puede usar prácticamente en toda clase de deslizamientos, pero es eficiente sobre todo en los de tipo rotacional. Dejando a un lado consideraciones de costo, que pueden ser altos en fallas grandes, su principal desventaja estriba en que el material que se excava se ha de desperdiciar y esto pudiera ser difícil y peligroso en algunos casos, aparte de la repercusión que

tales maniobras tendrán en el costo de la solución. También contribuye a incrementar esto último el hecho frecuente de que la excavación tenga que empezar en la parte más alta y progresar ladera abajo. Conviene mencionar como otro posible inconveniente, el que muchas veces al remover el material y disminuir las fuerzas motoras también se puede causar disminuciones en las fuerzas resistentes; esto puede ser cierto sobre todo cuando se trata con suelos friccionantes en que la resistencia al corte depende de la presión normal (Figura 3.10).

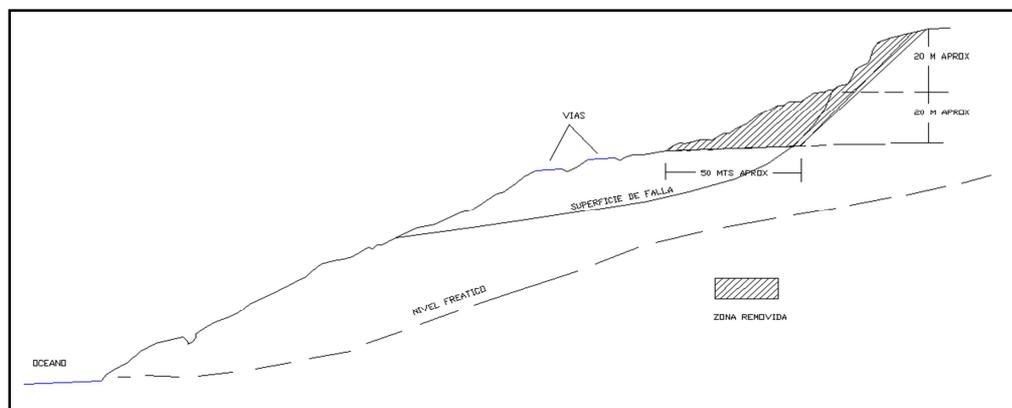


Figura 3.10 Estabilización de una falla por remoción de material en su cabeza.(Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2005).

### 3.5.3 Abatimiento de taludes

Este es uno de los métodos mas socorridos para el mejoramiento de las condiciones de la estabilidad de los taludes. Es un método correctivo ligado a deslizamientos en el cuerpo del talud. De hecho este es el primer punto a tomar en cuenta respecto a esta solución; al igual que todas las demás, no es de alcance universal, y su eficiencia no es siempre la misma, sino que pueden variar extraordinariamente de unos casos a otros.

Un segundo punto que se debe comentar desde un principio es que cuando se considere un abatimiento de talud en un proyecto o en una falla que se presente en el campo, se debe tener muy presente que el talud abatido es diferente del talud original, con todo lo que ello implica. Por ejemplo, si al talud original se le había determinado un círculo crítico por algún procedimiento determinado, el talud abatido tendrá otro círculo crítico diferente y, en consecuencia, el factor seguridad de aquel no tendrá ningún sentido en este, para el cual se deberá realizar un nuevo análisis de estabilidad que permita calcular su factor de seguridad, ligado a su círculo crítico.

Al analizar los métodos de cálculo de estabilidad de taludes se observó que, en el caso de suelos puramente friccionantes, la estabilidad del cuerpo del talud depende solo del ángulo de inclinación, en tanto que, en suelos puramente cohesivos y homogéneos con el terreno de cimentación, la estabilidad depende más bien de la altura del talud (de hecho, para inclinaciones menores de  $53^\circ$  y falla de base, la estabilidad es independiente del ángulo de inclinación del talud, y para inclinaciones de los  $53^\circ$  hasta  $90^\circ$ , las condiciones de estabilidad sí varían con la inclinación del talud, pero relativamente poco). Naturalmente que la gran mayoría de las taludes de las vías terrestres se hacen en suelos a cuya resistencia se considera una componente friccionante y otra de cohesión, pero las tendencias extremas anteriores pueden seguir sirviendo como norma de criterio. En suelos en que la componente friccionante tenga más importancia relativa que la cohesiva, será de esperar que la estabilidad esté más bien ligada a la inclinación del talud, en tanto que en suelos de naturaleza más cohesiva, será la altura del talud, más que su inclinación, la que defina las condiciones del mismo.

El abatimiento de un talud exige procedimientos de construcción cuidadosos, con pena de perder cualquier beneficio mecánico que pudiera obtenerse de la solución. En el caso de terraplenes, el abatimiento debe ser objeto de un proyecto previo, que incluya el correspondiente cálculo y la construcción se ha de hacer de

abajo hacia arriba, compactando lo necesario los rellenos y ligando la nueva parte del talud con la original, de manera que no se tengan soluciones de continuidad en el conjunto. Esto suele requerir el escalonamiento de la sección original, y el trabajo por capas en el relleno que se coloque, trabajando la plataforma con las dimensiones necesarias para el manejo del equipo de compactación. En el caso de cortes, también será preciso proyectar por anticipado el abatimiento, el cual se deberá construir de preferencia de arriba hacia abajo. Ahora, por razón natural, suelen ser menos peligrosos los problemas en lo referente a lograr una sección homogénea. Si en el abatimiento se usaran explosivos, lo que sucederá en cortes de roca, se deberá tener cuidado de evitar el abuso de estos, para lograr frentes enteros y resistentes (Figura 3.11).

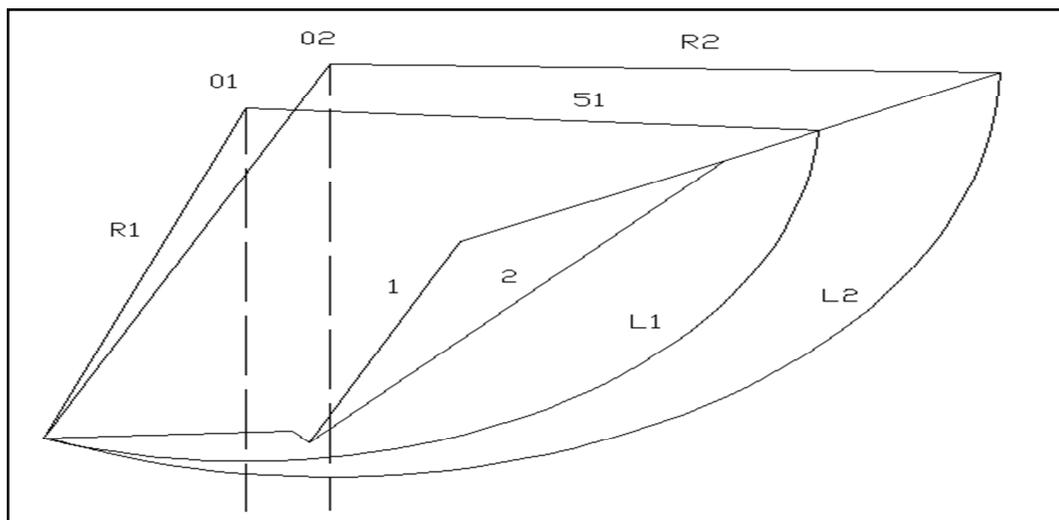


Figura 3.11 Mecanismo de abatimiento para el beneficio de la estabilidad (Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2009).

#### 3.5.4 Empleo de bermas y escalonamiento

Se denominan bermas a masas generalmente del mismo material de propio talud o de uno similar que se adosan al mismo, para darle estabilidad.

El uso de berma tiende a incrementar la estabilidad del talud por razones un tanto similares a las expresadas para el abatimiento de taludes; de hecho, en muchos casos, la construcción de bermas equivale mecánicamente a un abatimiento del talud. Un talud con bermas también es diferente del original y tendrá otro círculo crítico, que se deberá determinar analizando la nueva sección.

La berma tiende a hacer que la superficie de falla se desarrolle en mayor longitud y mas profunda, lo que produce los efectos ya discutidos para el abatimiento. Además, el peso del material que se coloque podrá aumentar la resistencia al esfuerzo cortante del terreno de cimentación en su parte friccionante. En suelos cohesivos seguramente el efecto más interesante de la berma es descomponer el talud en dos, cada uno de menor altura, lo que repercute mucho en la estabilidad general.

No se puede dar una regla que permita fijar a priori las dimensiones más convenientes para una berma en un caso dado. Su sección idónea habrá de calcularse por aproximaciones sucesivas, habiéndose fijado previamente el proyectista un factor de seguridad deseable para el talud en cuestión. Una buena base para el inicio de los tanteos suele ser darle a la berma la mitad de la altura del terraplén que se desea estabilizar y un ancho del orden del de la corona de dicho terraplén.

El escalonamiento queda definido por el ancho de los escalones, la distancia vertical entre ellos y por el ángulo de los taludes intermedios. El que los taludes de los respectivos escalones sean paralelos o se construyan con inclinación variable dependerá mucho de la condición del material constitutivo del corte. Escalones de

inclinación variable son convenientes cuando el material tiene una capa superior alterada, pero su condición mejora claramente con la profundidad.

Es importante la función que pueden cumplir los escalones para proteger el corte contra la erosión del agua superficial, pues reducen la velocidad ladera abajo y el gasto de escurrimiento. Para ello es preciso que los escalones estén adecuadamente conformados; la mayor parte de las veces basta con que el escalón tenga una ligera inclinación hacia el corte, pero en terrenos muy erosionables pudiera llegar a convenir que se invirtiera su inclinación, haciéndola hacia la ladera construyendo una cuneta impermeable en esa parte interna, que garantice la rápida eliminación de las aguas. Si la posible infiltración del agua de lluvia fuera muy de temer, se podría llegar a la precaución extrema de impermeabilizar toda la huella de los escalones.

Tampoco existen reglas fijas para proyectar el escalonamiento de un corte y este deberá ser propuesto para cada caso particular. En el caso de suelos con cohesión y fricción, el perfil del escalonamiento debe ser tal que se llegue a una inclinación razonable para todo el corte considerando un talud simple que promedie a todos los escalones. La altura y el ancho de los escalones, aparte de la condición anterior y del costo, muchas veces se deben fijar por las consideraciones de prevención contra la erosión superficial del agua y la detención de derrumbes.

### 3.5.5 Uso de explosivos

La superficie de falla sobre la cual ocurre un deslizamiento es muchas veces lisa y pulida; el caso típico de este fenómeno es el de masas de suelo cohesivo que deslizan sobre mantos de roca o suelos mucho más duros. Este tipo de contactos constituyen también una superficie potencial de deslizamiento.

En tales situaciones, se ha recurrido a veces a utilizar explosivos para romper y hacer rugoso un contacto de tal naturaleza; se proporciona así una mejor liga friccional a los dos materiales en contacto. La eficiencia del método se aumenta si a cierta profundidad de la superficie de falla existen mantos drenantes a los que la explosión comunique con dicha superficie, a la que entonces se proporciona drenaje.

En la utilización de este método se debiera cuidar el manejo de los explosivos, pues de otra manera se corre el riesgo de que la explosión acelere el deslizamiento sobre cualquier superficie previamente formada o lo genere sobre una superficie potencial.

Se ha dudado mucho sobre la permanencia de una corrección por medio de explosivos y el punto se discute con frecuencia, sin que exista un entendimiento claro al respecto. Parece que la mayoría de los especialistas opinan que para que el método sea exitoso es preciso que exista una formación dura debajo de la superficie de falla. También conviene mencionar que en todos los casos en que se ha usado se ha reportado un asentamiento importante en los meses siguientes a su puesta en práctica. Es cuestionable cualquier ventaja de drenaje que se pueda obtener mediante el uso de explosivos; los fragmentos resultantes no forman un filtro, de manera que con seguridad los pequeños espacios entre ellos se sellaran al depositarse material muy fino arrastrado en el flujo de agua. Los deslizamientos más profundos quedan fuera del alcance del método, por la violencia de las explosiones necesarias para ponerlo en práctica.

Los explosivos se pueden usar también en derrumbes y caídos, pero no como método de corrección sino de remoción. Es probable que el aspecto más sugestivo del uso de explosivos sea su costo, que suele ser muy inferior al de otras soluciones, al grado que aun suele ser ventajoso económicamente un programa que incluya varias aplicaciones sucesivas del procedimiento a lo largo de varios años.

En el caso de cortes en que los caídos y derrumbes se presenten en la zona de coronamiento puede ser una buena política la remoción periódica del material que se va soltando.

### 3.5.6 Empleo de vegetación

Se trata ahora de un método preventivo y correctivo de fallas por erosión. Los movimientos de tierra que acompañan a la construcción de cortes y terraplenes producen inevitablemente una destrucción muy indeseable de la cobertura vegetal, dejando a los suelos expuestos al ataque de agua superficial y vientos. Se acepta que la vegetación cumple dos funciones importantes; en primer lugar, disminuye el contenido de agua en la parte superficial, y en segundo, da consistencia a esa parte por el entramado mecánico de sus raíces. Como quiera que las plantas o el pasto toman el agua que necesitan del suelo en que crecen, se pueden plantear varios criterios para seleccionar el tipo de especies más convenientes en un caso dado; desde luego, el uso de plantas propias de la región será en principio recomendable y evitara fracasos posibles en la adaptación al ambiente de especies importadas, fracasos que son difíciles de prever para un ingeniero; pero hay especies que toman demasiada agua del suelo y otras que toman mucho menos, produciendo grados muy diferentes de abatimiento en los contenidos de agua superficiales. En suelos arcillosos, seguramente pueden convenir más las primeras, al garantizar una corteza de suelo más resistente, pero en suelos arenosos un secado intenso en la superficie hace a los materiales más erosionables y ello no es conveniente.

Cuando se trata de arbolado en los coronamientos de los cortes o como barreras contra invasión de arena, las consideraciones anteriores no son muy válidas y el criterio debe quizá circunscribirse al uso de las especies locales que tengan mejores posibilidades de adaptación al lugar específico que se trate.

La experiencia ha probado que es mas efectivo para defender taludes la plantación continúa de pastos y plantas herbáceas, en vez de la plantación de matas o áreas aisladas. Como quiera que el costo de ambas soluciones también es diferente, la actitud del ingeniero debe quedar condicionada a la feracidad de la región; hay zonas en que la forestación se produce en forma casi natural e inevitable; otras en que es muy difícil el crecimiento vegetal. La plantación aislada incrementa mucho la posibilidad de infiltración y escurrimiento, por otra parte, en el caso de terraplenes muy altos ha dado buen resultado la plantación de arbustos en hileras, para hacer perder velocidad al agua que escurra.

El riesgo de las plantaciones que se efectúe cuando es abundante y prolongado, debe verse como indeseable desde el punto de vista doble de la economía y la conservación para evitarlo se ha recurrido a colocar costras de arcilla y tierra vegetal sobre taludes construidos con suelos que no ofrecen de pos si soporte adecuado a la vida; estas costras conservan la humedad en mayor grado, lo que favorece la vegetación.

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

#### 4.1 Nivel de investigación

De acuerdo al problema planteado y tomando en cuenta la clasificación de los niveles de investigación (Hurtado de Barrera, 1996), el nivel del trabajo se define como una investigación descriptiva y explicativa, ya que consiste en la caracterización de un hecho o fenómeno, con el fin de establecer su estructura o comportamiento, buscando el porque de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

#### 4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación empleado para desarrollar los objetivos planteados se clasifica como una investigación de campo, debido a que los datos e información necesaria serán obtenidos directamente del entorno real u objeto de estudio, sin manipular o controlar variable alguna.

La información y datos necesarios se obtendrán mediante levantamientos geológicos en el área deslizada, específicamente en la cantera Cantil Sur de la Planta Pertigalete, Municipio Guanta, estado Anzoátegui, información cuya integridad no será alterada ni modificada, cumpliendo así con la definición hecha por Sabino (1986), quien propone que “ las investigaciones de campo se basan en datos primarios, obtenidos directamente de la realidad”.

#### 4.3 Población de la investigación

De acuerdo con Balestrini (1998), la población o universo puede estar referido a cualquier conjunto de elementos de los cuales pretendemos indagar y conocer sus características, o una de ellas, y para el cual serán válidas las conclusiones obtenidas en la investigación. Es el conjunto finito o infinito de personas, casos o elementos que presentan características comunes.

Por lo cual, la población se ve definida por la Cantera Cantil Sur de la Planta Pertigalete y sus diferentes cotas, ya que este es el área de interés para este trabajo de investigación.

#### 4.4 Desarrollo de la investigación

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se dispuso de varias etapas, las cuales son, una planificación del trabajo a realizar en campo, la ejecución del trabajo en campo y la interpretación de la información en actividades de oficina (Figura 4.1).

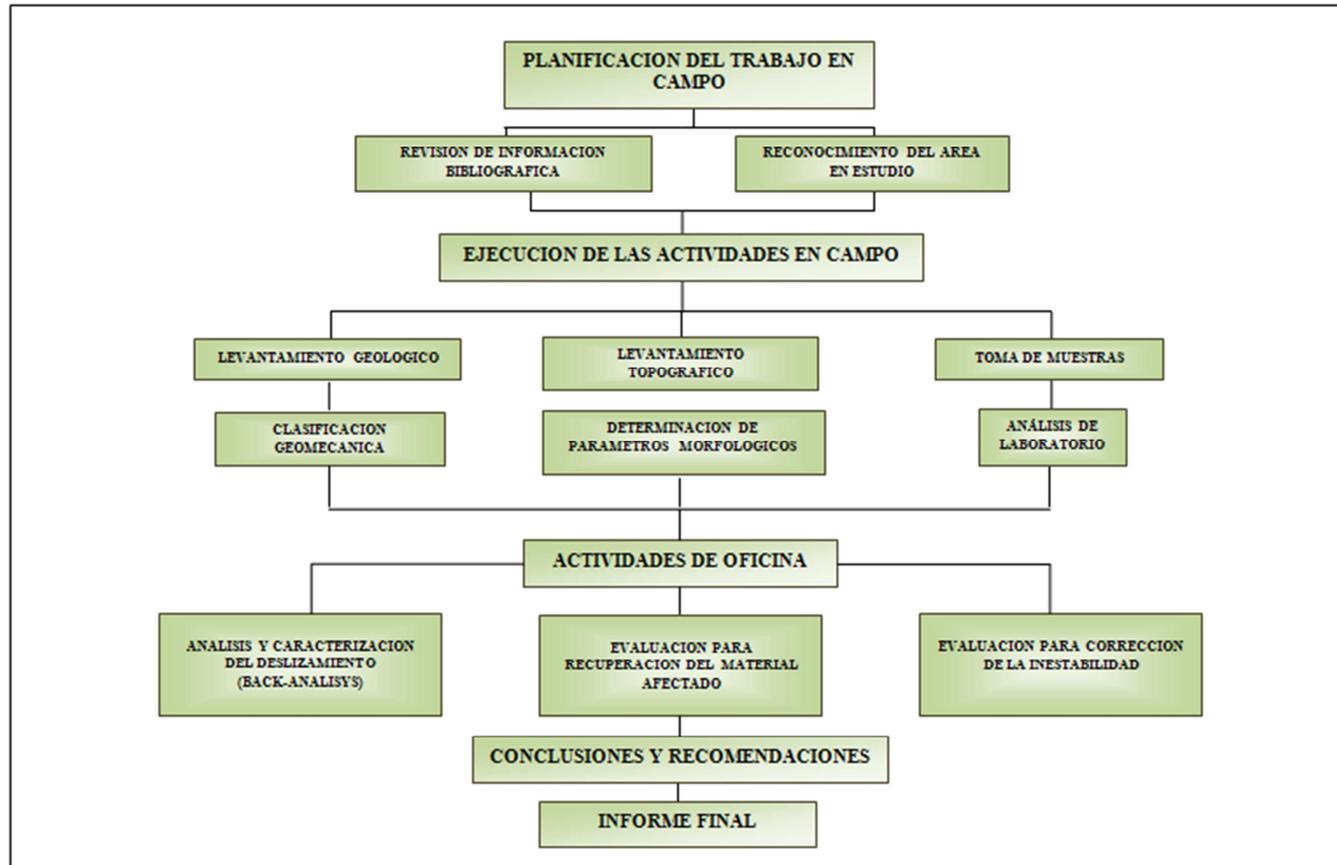


Figura 4.1 Flujograma de las actividades desarrolladas.

#### 4.4.1. Planificación del trabajo de campo

Para esta etapa se efectuó una revisión de información bibliográfica teniendo en cuenta los aspectos geológicos, topográficos, climáticos, geomorfológicos y ambientales de la zona, con el fin de tener una visión general del área en estudio. De la información recaudada podemos mencionar, publicaciones geológicas e informes geotécnicos, mapas topográficos de la cantera Cantil Sur, mapa geológico, planes de explotación anual e información relacionada con el desarrollo de la cantera Cantil en los últimos años. Durante esta etapa se necesito de un reconocimiento del área en estudio, con el cual se ubicaron las vías por las cuales se realizo el levantamiento geológico de superficie, la clasificación geomecánica de los materiales presentes, así como las zonas más convenientes para la toma de muestras y puntos relevantes para el desarrollo del levantamiento topográfico.

#### 4.4.2. Ejecución del trabajo de campo

Con base en la planificación previa se llevo a cabo la ejecución de las actividades en campo. Dentro de estas, el levantamiento geológico y clasificación geomecánica del los materiales presentes en el área afectada, el levantamiento topográfico, la determinación de los parámetros morfológicos del deslizamiento y la toma de muestras para análisis químicos.

4.4.2.1 Levantamiento geológico: el levantamiento geológico se realizo haciendo una descripción visual de los elementos que componen el deslizamiento, medición de espesores, mediciones de escarpes y grietas, grado de meteorización, diaclasamiento, descripción de estructuras geológicas presentes, entre otros. Todo esto mediante el uso de herramientas como la brújula brunton, cinta métrica, cámara fotográfica y pico de mano.

4.4.2.2 Levantamiento topográfico: el levantamiento topográfico se realizó bordeando todos los escarpes y superficies irregulares generadas por el deslizamiento con la finalidad de delimitar el área afectada, demarcando tanto los escarpes principales como las grietas de tracción secundarias formadas por el desplazamiento. Se inicio desde la corona (nivel 150) hacia los flancos izquierdo y derecho del deslizamiento. Para el levantamiento se necesito el apoyo del equipo de topógrafos de la empresa, y el uso de un teodolito digital (estación total) modelo GPT – serie 3000 marca Topcon, prismas y cinta métrica.

4.4.2.3 Determinación de parámetros morfológicos: conjuntamente al levantamiento topográfico se determinaron los parámetros morfológicos del deslizamiento utilizando la terminología recomendada por la International Association for Engineering Geology (IAEG). Los parámetros medidos fueron los siguientes:

1. Ancho de la masa desplazada ( $W_d$ ): Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud  $L_d$ .
2. Ancho de la superficie de falla ( $W_r$ ): Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud  $L_r$ .
3. Longitud de la masa deslizada ( $L_d$ ): Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
4. Longitud de la superficie de falla ( $L_r$ ): Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
5. Profundidad de la masa desplazada ( $D_d$ ): Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por  $W_d$  y  $L_d$ .

6. Profundidad de la superficie de falla ( $D_r$ ): Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por  $W_r$  y  $L_r$ .

7. Longitud total ( $L$ ): Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

8. Longitud de la línea central ( $L_{cl}$ ): Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos (Figura 4.2).

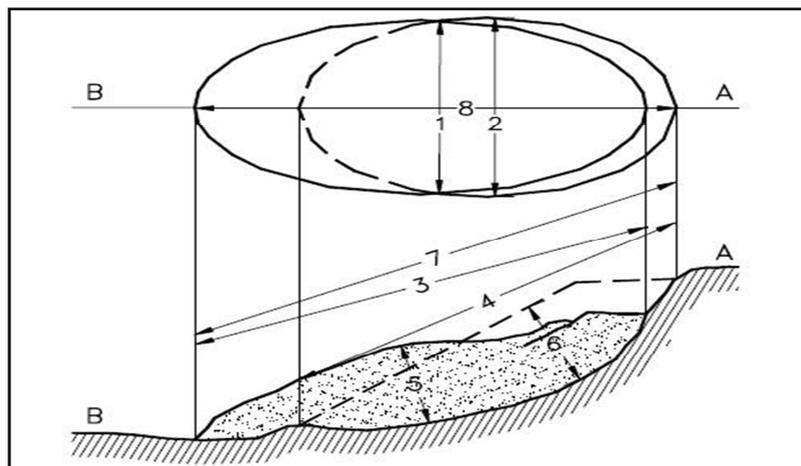


Figura 4.2 Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a la IAEG  
(Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2009).

4.4.2.4 Toma de muestras: la toma de muestras se hizo de forma manual, con la ayuda de herramientas como pico de mano, pala, mandarina y cincel, introduciendo luego el material en bolsas plásticas identificadas con la ubicación de su extracción. Esta selección de muestras tuvo base en la importancia que tienen para la producción del cemento y agregados, al igual que su ubicación en los frentes desplazados, obteniendo un total de 5 muestras para su análisis químico respectivo.

4.4.2.5 Análisis químicos de laboratorio: los análisis químicos de las muestras obtenidas en campo se realizaron con el fin de conocer la composición química y calidad del material presente en el deslizamiento. El procedimiento para su ejecución fue el siguiente:

- A la muestra obtenida se le reduce su tamaño, dependiendo del material a analizar (caliza, esquisto o arcilla), mediante una trituradora de mandíbula marca Soiltest. Se trituran aproximadamente dos (2) kilogramos de material para tener un excedente en caso de ser necesario repetir el análisis. Luego el material ya triturado es introducido en una bolsa plástica previamente identificada para su homogenización (Figura 4.3).



Figura 4.3 Trituración y homogenización de las muestras.

- Ya con la muestra homogenizada se extraen 150 gramos aproximadamente y se colocan en una bandeja de hierro o aluminio para su posterior secado en el horno a unos 200°C, durante unos 10 minutos. Este procedimiento se realiza con el fin de eliminar cualquier contenido de humedad de la muestra.



Figura 4.4 Secado al horno de la muestra.

- La muestra completamente seca se introduce en un molinillo de anillos durante unos 90 segundos aproximadamente. Para este proceso se utilizan los 150 gramos de material ya puestos al horno y una tara de anillos específica, la cual varía dependiendo del tipo de material a moler (caliza, esquisto ó arcilla). La muestra molida se introduce en una bolsa plástica previamente identificada para su homogenización (Figura 4.5).



Figura 4.5 Molienda de la muestra.

- Ya con la muestra molida se procede a la preparación de la pastilla del material necesaria para el análisis de rayos x. Para esto se pesa en una balanza 0.1 gramos de ácido esteárico, 0.5 gramos de aglomerante, y 11 gramos de la muestra a analizar. Los tres componentes son mezclados en una tara y llevados a un molinillo de anillos digital durante 60 segundos (Figura 4.6).



Figura 4.6 Preparación de la muestra para la pastilla.

- Ya molida la mezcla se lleva a una prensa hidráulica electrónica. En el molde de esta se coloca una cucharada de ácido bórico seguido del material molido (el ácido bórico es usado para la fácil identificación de la pastilla luego de su creación). Luego se procede a someter la muestra a unos 170 KN de presión (Figura 4.7).
- La pastilla hecha se identifica por el lado donde se ubica el ácido bórico, y se lleva a la máquina de rayos x para su análisis químico. Esta prueba viene determinada según el material, ya que existen curvas de tendencia en los análisis para cada muestra (caliza, esquisto ó arcilla). El procedimiento dura aproximadamente 80 segundos, y da como resultado valores de concentración material de la muestra. Entre estos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  (Figura 4.8).



Figura 4.7 Creación de la pastilla usada para el análisis de Rx.



Figura 4.8 Análisis de rayos x.

4.4.2.6 Clasificación geomecánica de los materiales: la clasificación geomecánica de los materiales presentes en el deslizamiento, se realizó mediante la clasificación Rock Mass Rating (RMR) introducida por Bieniawski en 1989. Esta se efectuó en conjunto con el levantamiento geológico de superficie, permitiendo la obtención de rangos de ángulo de fricción para cada material de manera siguiente (Ecuación 4.1):

$$\phi = 5 + \frac{RMR}{2} \text{ (deg)} \quad (4.1)$$

Donde:

$\phi$  = Angulo de fricción interna.

$RMR$  = Valor del Rock Mass Rating.

Para determinar los valores de RMR se tomaron en cuenta los siguientes parámetros de los materiales:

1. Resistencia de la matriz rocosa a la compresión simple. Este valor se estima y clasifica a partir de índices de campo (ISRM, 1981), obteniendo este parámetro con la realización de pruebas de dureza a muestras de roca fresca de los macizos rocosos mediante el uso del pico de mano. Obteniendo rangos de valores de resistencia de acuerdo a los siguientes criterios (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Rangos de valores de resistencia a la compresión simple (Modificado de González de Vallejo, 2002).

<b>Resistencia a la compresión simple (MPa)</b>	<b>Descripción</b>
1 – 5	Muy blanda
5 – 25	Blanda
25 – 50	Moderadamente dura
50 - 100	Dura
100 – 250	Muy dura
> 250	Extremadamente dura

2. Índice de calidad de las rocas (RQD). Este parámetro es estimado midiendo la cantidad de discontinuidades en 1 m<sup>2</sup> del talud, su valor varia entre 0% - 100%, y fue determinado usando la formula empírica propuesta por Bieniawsky en 1989 (Ecuación 4.2):

$$RQD = 115 - 3,3(J_v) \quad (4.2)$$

Donde:

$J_v$  = numero de discontinuidades en 1 m<sup>2</sup>.

3. Espaciado entre las discontinuidades. El espaciado entre los planos de discontinuidades condiciona el tamaño de los bloques de matriz rocosa, y por tanto, define el papel que ésta tendrá en el comportamiento mecánico del macizo rocoso, y su importancia con respecto a la influencia de las discontinuidades. El espaciado viene definido como la distancia entre dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. La medida del espaciado se realizó con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de discontinuidades (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Descripción del espaciado (Modificado de González de Vallejo, 2002).

<b>Descripción</b>	<b>Espaciado</b>
Extremadamente junto	< 20 mm
Muy junto	20-60 mm
Junto	60-200 mm
Moderadamente junto	200-600 mm
Separado	600-2000 mm
Muy separado	2000-6000 mm
Extremadamente separado	>6000 mm

4. Condición o estado de las discontinuidades, lo cual incluye:

- Longitud de la discontinuidad. La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad es su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección del plano y su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según un buzamiento aparente. La medida de la continuidad se realizó con una cinta métrica, si el afloramiento permite

la observación tridimensional de los planos de discontinuidad, deberán medirse las longitudes a lo largo de la dirección y del buzamiento (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Descripción de la longitud de una discontinuidad (Modificado de González de Vallejo, 2002)

<b>Continuidad</b>	<b>Longitud (mts)</b>
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1 – 3 m
Continuidad media	3 – 10 m
Alta continuidad	10 – 20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

- Abertura de la discontinuidad. La abertura es la distancia perpendicular que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno (Tabla 4.4). este parámetro puede ser muy variable en diferentes zonas de un mismo macizo rocoso. La influencia de la abertura en la resistencia al corte de la discontinuidad es importante incluso en discontinuidades muy cerradas, al modificar las tensiones efectivas que actúan sobre las paredes. Su medida se realizó directamente con una regla o cinta métrica, las medidas se realizaron para cada sistema de discontinuidades observado, adoptando los valores medios más representativos de cada una de ellas.

Tabla 4.4 Descripción de las aberturas (Modificado de González de Vallejo, 2002).

<b>Abertura</b>	<b>Descripción</b>
< 0,1 mm	Muy cerrada
0,1 – 0,25 mm	Cerrada
0,25 – 0,5 mm	Parcialmente abierta
0,5 – 2,5 mm	Abierta
2,5 – 10 mm	Moderadamente abierta
> 10 mm	Ancha
1 – 10 cm	Muy ancha
10 – 100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

- **Rugosidad.** La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, que para discontinuidades sin cohesión puede ser estimada a partir de datos de campo y de expresiones empíricas. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura, y por lo general, con el espesor del relleno. El termino rugosidad se emplea en sentido amplio para hacer referencia tanto a la ondulación de las superficies de discontinuidad, como a las irregularidades o rugosidades a pequeña escala de los planos. La rugosidad puede ser medida en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala medida o de la accesibilidad al afloramiento, incluyendo desde estimaciones cualitativas hasta medidas cuantitativas. El método más sencillo, rápido, y utilizado en esta investigación, es la comparación visual de la discontinuidad con los perfiles estándar de rugosidad (Figura 4.9).

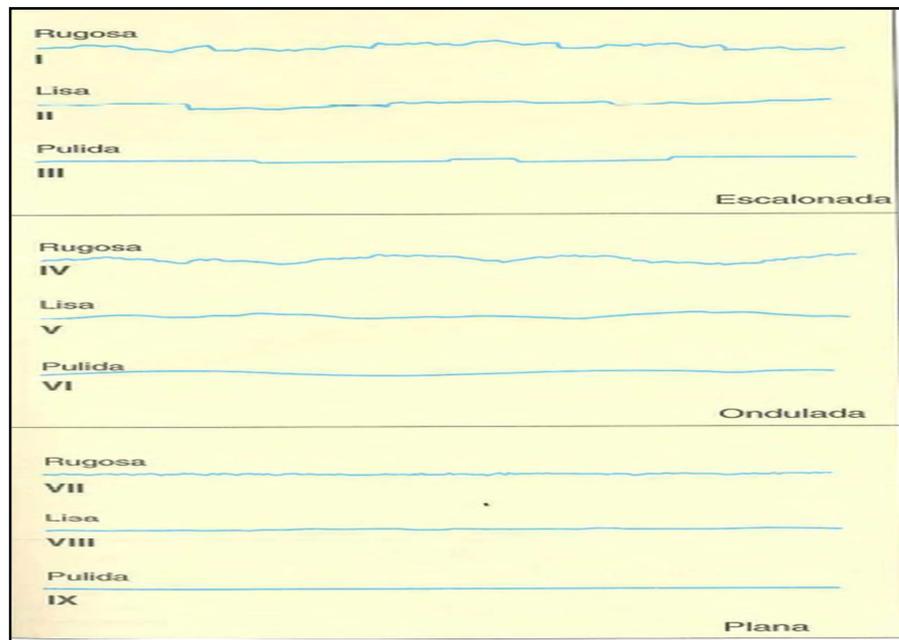


Figura 4.9 Perfiles estandar de rugosidad (Modificado de González de Vallejo, 2002).

- Relleno. Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a la roca de las paredes. Existe gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables. La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. Entre las características principales del relleno que pueden describirse en el afloramiento están su naturaleza, espesor ó anchura, resistencia al corte y permeabilidad (estos dos últimos parámetros de forma indirecta o cualitativa).

- Alteración. El grado de alteración de una discontinuidad es una observación importante en cuanto a que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad,

permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia. La identificación del grado de alteración se realizó de forma sistemática a partir de las siguientes descripciones (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Descripción del grado de alteración (Modificado de González de Vallejo,2002)

<b>Termino</b>	<b>Descripción</b>
Inalterada	No se observa signos de alteración en la discontinuidad.
Ligeramente alterada	Se observan ligeros cambios en el color original de la matriz rocosa.
Alterada	La discontinuidad se ha alterado a un estado de suelo, o fragmentos, manteniéndose la fábrica original.
Descompuesta	La discontinuidad se ha alterado al estado de suelo, algunos o todos los minerales están descompuestos.

5. Presencia ó no de agua subterránea. El agua en el interior de un macizo rocoso procede generalmente del flujo que circula por las discontinuidades. Las observaciones respecto a las filtraciones en los macizos rocosos se presentan como: seco, ligeramente húmedo, húmedo, goteando y como agua fluyendo.

Luego cada uno de los parámetros nombrados le va asignado un valor, por lo cual el RMR viene dado por (Ecuación 4.3):

$$\text{RMR} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) \quad (4.3)$$

El resultado obtenido en el RMR varia de 0 a 100 (Tabla 4.6), y se le sustrae un valor de ajuste, el cual viene determinado por la orientación de las fisuras, las cuales van desde muy favorables a muy desfavorables (Tabla 4.7).

Tabla 4.6 Clasificación general de los macizos (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Media	mala	Muy mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Tabla 4.7 Corrección por la orientación de las discontinuidades (Modificado de González de Vallejo, 2002).

Dirección y buzamiento		Muy favorable	Favorable	Media	Desfavorable	Muy desfavorable
Valor	Túneles	0	-2	-5	-10	-12
	Cimentación	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Para el desarrollo eficaz de esta clasificación se usa la tabla generada por Bieniawsky (1989), que plasma los parámetros ya mencionados con sus respectivos rangos de valores (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Clasificación geomecánica (RMR) de Bieniawsky (1989) (Modificado de González de Vallejo, 2002).

PARAMETROS		RANGO DE VALORES						
Resistencia de la roca intacta	Ensayo carga puntual	> 10 MPa	<sup>4</sup> -10 MPa	2- 4 MPa	1-2 MPa			
	Compresión simple	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Valor	15	12	7	4	2	1	0
RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%		
Valor		20	17	13	8	3		
Espaciado de las discontinuidades		> 2m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	6-20 cm	< 6 cm		
Valor		20	15	10	8	5		
Estado de las discontinuidades	Longitud de las discontinuidades	< 1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	> 20 m		
	Valor	6	4	2	1	0		
	Abertura	nada	< 0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	> 5mm		
	Valor	6	5	3	1	0		
	Rugosidad	Muy rugosa	rugosa	Ligeram rugosa	ondulada	suave		
	Valor	6	5	3	1	0		
Relleno		ninguno	Relleno	Relleno	Relleno	Relleno blando		

			duro < 5 mm	duro > 5mm	blando < 5mm	> 5mm
	Valor	6	4	2	2	0
	Alteración	inalterada	Ligera m alterad a	Moderada alterada	Muy alterada	descompuesta
	Valor	6	5	3	1	0
Flujo de agua en las juntas	Relación Pagua/Pprinc	0	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5
	Condiciones generales	Completa seca	Ligera seca	húmedas	goteando	Agua fluyendo
	Valor	15	10	7	4	0

#### 4.4.3. Interpretación de la información en actividades de oficina

Luego de finalizadas las actividades de trabajo en el campo se procedió con la organización de los datos obtenidos. De esta manera se logro determinar la dinámica del movimiento de masa, elaborar los perfiles geológicos del área afectada, estimar la cantidad de material desplazado, identificar las consecuencias o repercusiones del deslizamiento en la evolución de la cantera, realizar el análisis retrospectivo (back-analisis) del movimiento presente, así como evaluar los procedimientos y métodos que puedan ser aplicables para la recuperación del material desplazado y estabilización de los niveles afectados.

La estimación de material desplazado se realizo mediante el método de las secciones verticales, lo cual consiste en cortes geológicos perpendiculares al eje longitudinal del yacimiento ó área, que muestra una porción plana del cuerpo a

estimar. Para el efecto de esta investigación estas secciones corresponden a los perfiles geológicos realizados sobre el área deslizada. Primeramente se fijan los límites del deslizamiento a lo largo de los niveles afectados, así como la profundidad de la capa de debilidad ó plano de falla.

Para el cálculo se utilizo la siguiente formula (Ecuación 4.4):

$$V = \frac{A_1 + A_2}{2} \times D \quad (4.4)$$

Donde:

$V$  = volumen.

$A_1, A_2$  = Áreas contiguas.

$D$  = Distancia entre las dos áreas.

A continuación se resumen los pasos siguientes:

1. Se elaboraron las secciones geológicas, en donde se reseña las capas afectadas y el plano de falla del deslizamiento con su respectivo buzamiento.
2. Planimétricamente se determino el área del material deslizado en cada sección geológica y luego se sumaron entre si aquellas secciones contiguas.
3. Esta suma entre aras de secciones próximas se dividió entre dos, para determinar el área promedio representativa a estimar.
4. Dicha área promedio se multiplica por la distancia entre secciones, determinándose el volumen de roca respectivo.

5. Cada uno de estos resultados, fueron sumados obteniéndose el volumen de material existente en el deslizamiento.

Para desarrollar el análisis de estabilidad retrospectivo (back-analysis), se utilizaron los valores obtenidos en la clasificación geomecánica, determinando de esta manera el mecanismo, modelo y geometría de la inestabilidad. El análisis se llevo a cabo en base a la topografía presente para el momento en el cual se genero el deslizamiento, utilizando métodos de equilibrio límite, como el método de Janbu, el método de Bishop simplificado y de Fellenius, de acuerdo al material presente en la zona de estudio.

Como herramientas de verificación de los datos obtenidos se uso el programa computarizado Slide (análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio límite como, Bishop, Janbu, Spencer, Fellenius, entre otros).

En la evaluación de los métodos aplicables para la recuperación del material y estabilidad de los niveles afectados, es necesario conocer previamente el comportamiento geomecánico del terreno, el mecanismo y tipología de roturas incluyendo su geometría, los factores geológicos, hidrogeológicos y de otro tipo, influyentes en la inestabilidad. Por lo cual para los parámetros y condiciones asumidas, las medidas de extracción de material y estabilización de los bancos viene definidas por la modificación de la geometría de los taludes o niveles, corrección de drenajes superficiales, relocalización de material deslizado, remoción de la corona, abatimiento de los taludes, sello de grietas y uso de explosivos.

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

Luego de desarrollada la metodología de trabajo planteada y obtenido la información requerida para el estudio geotécnico de la cantera Cantil Sur de la planta Pertigalete, se procedió al análisis e interpretación de los resultados obteniendo lo siguiente:

#### 5.1 Levantamiento geológico de superficie

El levantamiento geológico de superficie para la determinación de las características de la zona afectada, se ejecuto a través de los escarpes ó grietas generadas por el deslizamiento, tomando las siguientes observaciones de los puntos más relevantes:

##### 5.1.1 Estación N°1

Observando el flanco izquierdo del deslizamiento en dirección N59°E, coordenadas N1131745 – E300105, el desplazamiento fue bajo de dos (2) metros en dirección SW, semejante a un hundimiento, en el bloque desplazado se presentan varias grietas de tracción paralelas al escarpe. El material presente esta representado por una arenisca cuarzosa de tendencia friable, de color pardo claro a rojizo, de grano medio con presencia de conglomerados hacia el tope (Formación Barranquin), y una capa de material de relleno, de color gris oscuro a claro, de granulometría variable, compuesto por una mezcla de fragmentos y polvo de caliza, arenas y lutitas negras (Figura 5.1 y 5.2)



Figura 5.1 Flanco izquierdo del deslizamiento.

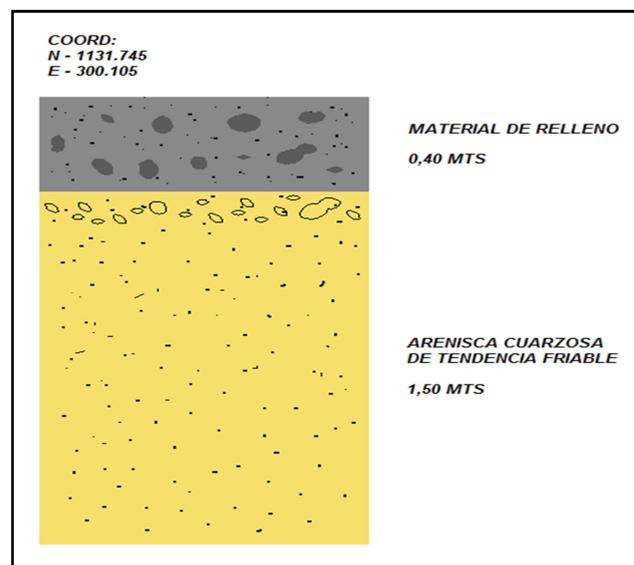


Figura 5.2 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°1.

### 5.1.2 Estación N°2

En la misma dirección N59°E sobre el escarpe izquierdo del deslizamiento, coordenadas N1131706 – E330147, se observa mayor separación entre los bloques, presentando un desplazamiento horizontal de 3 metros, y una profundidad de 2,10 metros aproximadamente, hasta llegar al plano de falla generado por una lutita negra de buzamiento 23° al SW. La columna estratigráfica presente en esta zona esta representada de base a tope por: Una capa de lutita negra de espesor no conocido, identificada como plano de deslizamiento con presencia de estrías de falla, de color gris oscuro a negra; una capa de arenisca de tendencia friable de grano medio con algunos conglomerados, de color pardo claro a rojizo, de 1,80 metros de espesor; y una capa de material de relleno (mezcla de caliza, arena y lutita), de granulometría variable, de color gris oscuro, de 0,30 metros de espesor. Se observan bloques de caliza de entre 0,50 y 1 metro de espesor, dentro y fuera del escarpe, identificados como material suelto, y ubicado en la superficie antes del movimiento (Figura 5.3 y 5.4).

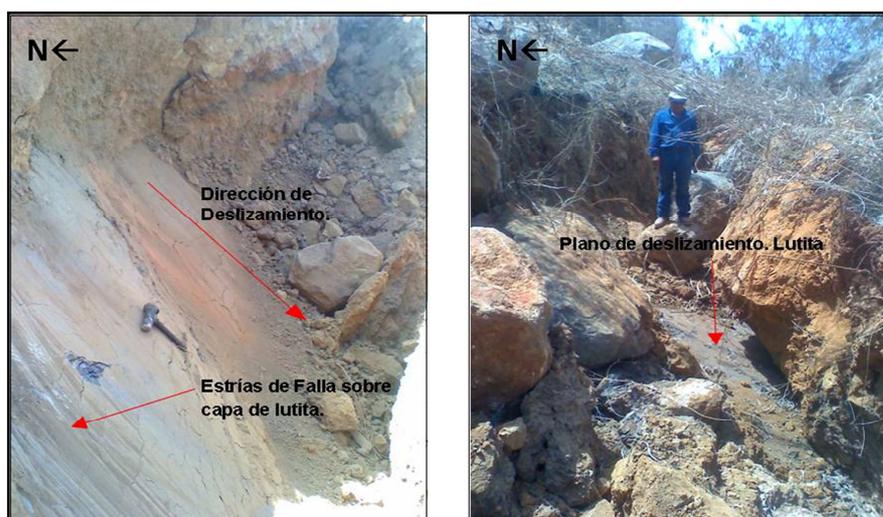


Figura 5.3 Capa lutítica identificada como plano de falla.

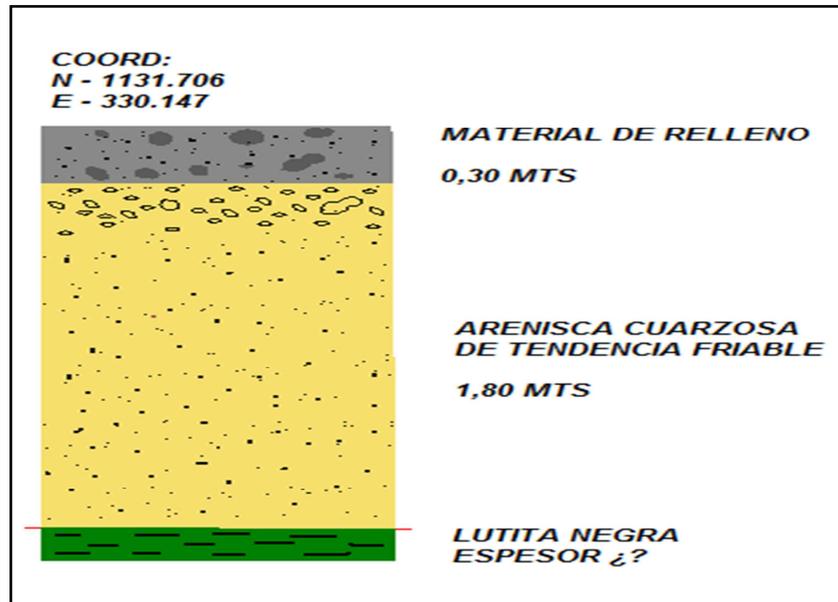


Figura 5.4 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°2.

### 5.1.3 Estación N°3

Ubicándonos próximo a la corona o cresta del deslizamiento sobre su flanco izquierdo, con dirección N89°E, coordenadas N1131665 – E330189, se observa en el escarpe un cambio de litología horizontal, con material conglomerático y arenoso de tendencia friable y presencia de ciertos fragmentos de caliza de diferentes diámetros, de color pardo claro hacia su flanco izquierdo; hacia el flanco derecho, de base a tope, una capa de arenisca cuarcífera, de grano medio a fino, de color pardo claro a rojizo y espesor aflorante de 1,80 metros; una capa de caliza de 2,50 metros de espesor, de color pardo claro en su superficie y grisácea en roca fresca, con presencia de calcita en disolución tanto en sus diaclasas como en su superficie, una capa de lutitas negras de apariencia maciza con presencia de sulfuros de 0,30 metros de espesor. Se identificó en este punto el posible contacto transicional entre la Formación

Barranquín y la Formación Cantil, según información descrita en el plano geológico de la cantera Cantil Sur (Figura 5.5 y 5.6).



Figura 5.5 Frente de escarpe aflorante en la estación N°3.

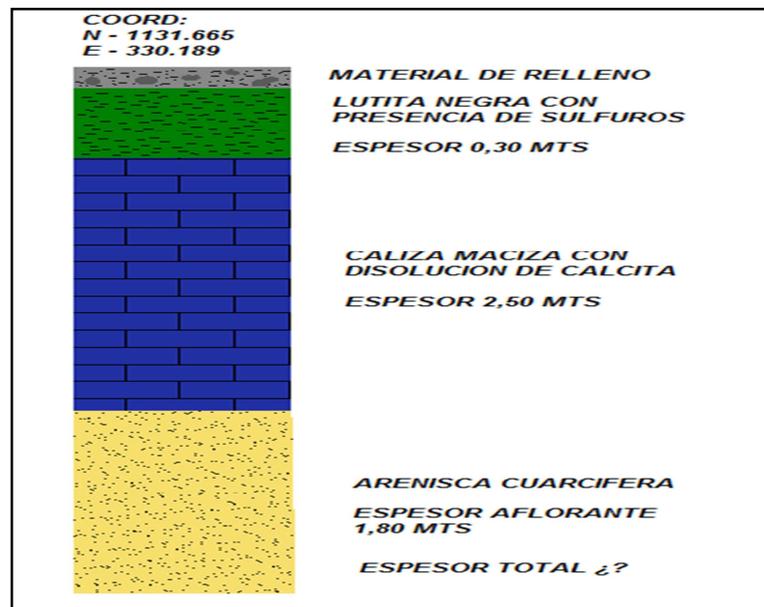


Figura 5.6 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°3.

#### 5.1.4 Estación N°4

Hacia el flanco derecho del deslizamiento próximo a la corona, en dirección S31°W, coordenadas N1131657 – E330197, se observa el mayor desplazamiento de material con una profundidad de 9 metros y una abertura de 6 metros aproximadamente. El material presente en este escarpe posee buzamientos de entre 9° y 13° hacia el Sur Oeste y es el siguiente, de base a tope: Arenisca cuarcífera maciza de grano medio a fino, de color pardo claro, con espesor aflorante de 2,30 metros; una capa de caliza de 2 metros de espesor, de color gris claro a blanquecina, altamente diaclasada, con presencia de cavernas y alto contenido de calcita en disolución, formando estalactitas en las fracturas, y vetas de cristales de tamaños considerables; una capa de lutita negra de 1,20 metros de espesor, de apariencia maciza, con alto contenidos de sulfuros; una capa de caliza de color gris azulado en roca fresca y pardo claro en roca meteorizada, altamente diaclasada, de 2,50 metros de espesor (Figura 5.7 y 5.8).



Figura 5.7 Escarpe derecho generado por el deslizamiento.

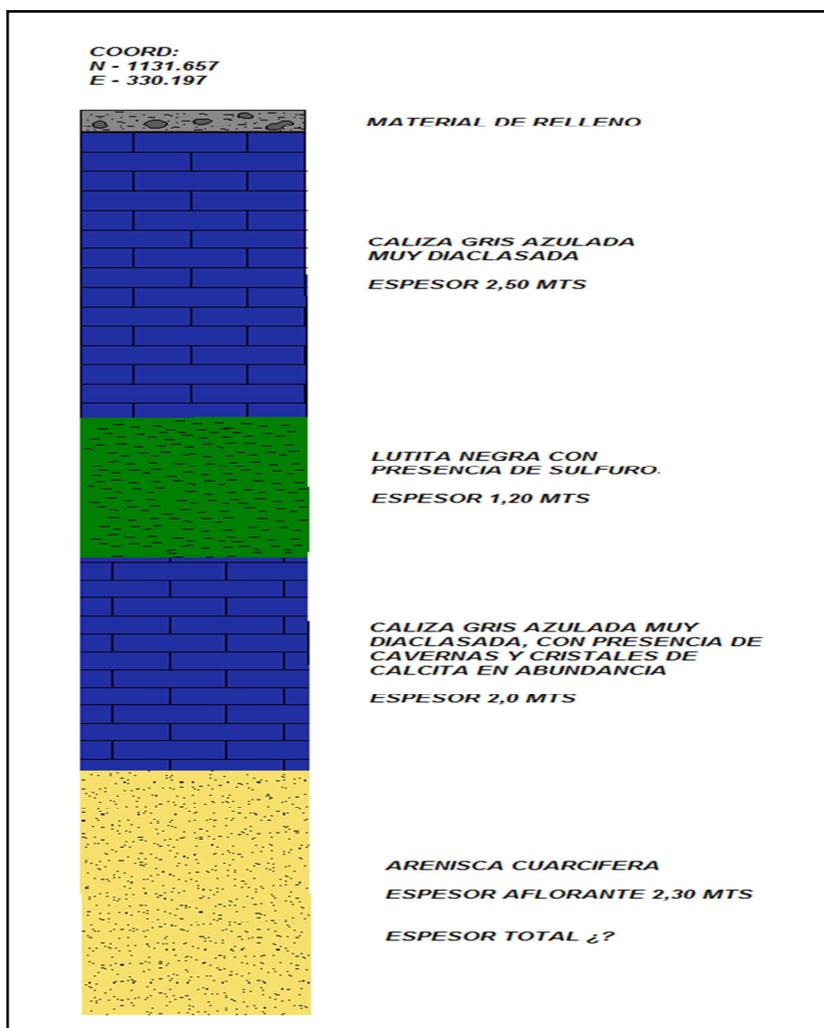


Figura 5.8 Columna estratigráfica aflorante en la estación N°4.

#### 5.1.5 Estación N°5

En la coordenada N1131610 – E330181 sobre el flanco derecho y en dirección S31°W, se observa que la profundidad del deslizamiento es variable desde 7 a 2 metros (con respecto a la base de los niveles afectados), al igual que el desplazamiento horizontal que varía de entre 8 y 2 metros. Se presenta en el escarpe

la misma litología que en el punto anterior, de base a tope: areniscas cuarcíferas, calizas con alto contenido de calcita, lutita negra, y calizas grises macizas, con espesores mayores de caliza en la parte superior y menor cantidad de cristales en la caliza inferior. Se evidencia el desprendimiento de bloques de caliza en la parte superior del escarpe sobre la capa de lutita sulfúricas. No se identificó el plano de falla por la presencia de bloques y escombros de caliza de diámetro variable (Figura 5.9 y 5.10).



Figura 5.9 Litología presente en la estación N° 5.



Figura 5.10 Desplazamiento de bloques de caliza en la estación N° 5.

### 5.1.6 Estación N°6

En este punto se encuentra la corona del deslizamiento, coordenadas N1131667 – E330209, se observan grietas de tracción de diferentes profundidades y direcciones, entre estas: grieta perpendicular al deslizamiento en dirección N43°W de 250 metros y grietas de tracción paralelas al borde derecho e izquierdo del deslizamiento (Figura 5.11).



Figura 5.11 Corona del deslizamiento y grietas secundarias de la corona.

### 5.2 Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizó con el fin de representar gráficamente en el mapa el área de estudio, tomando los datos y elementos principales que rigen geoméricamente el deslizamiento, como lo son los escarpes principales y las grietas de tracción. (Tabla 5.1) (Figura 5.12) (Anexo 2).

Tabla 5.1 Levantamiento topográfico del deslizamiento de la Cantera Cantil  
Sur.Planta Pertigalete.

<b>PTO</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>	<b>COTA</b>	<b>DESCRIPCION</b>
1,0	330188.16 6	1131674,08 7	150.05 7	Borde Derecho de la Corona
2,0	330209.07 2	1131667,89 0	151.00 7	Centro de la Corona
3,0	330200.51 4	1131650,24 0	150.61 5	Borde Izquierdo de la Corona
4,0	330195.32 7	1131628,26 0	146.32 4	Escarpe Izquierdo
5,0	330178.48 2	1131602,45 5	137.37 6	Escarpe Izquierdo
6,0	330207.14 8	1131567,21 3	137.39 8	Grieta Izquierda secundaria
7,0	330215.85 6	1131588,52 1	140.55 4	Grieta Izquierda secundaria
8,0	330204.39 4	1131535,93 8	125.98 1	Grieta Izquierda secundaria
9,0	330167.10 3	1131579,32 2	125.88 3	Escarpe Izquierdo
10,0	330159.80 1	1131553,90 9	112.59 9	Escarpe Izquierdo
11,0	330139.28 3	1131546,00 4	102.13 5	Escarpe Izquierdo
12,0	330101.92 0	1131751,33 1	137.56 2	Escarpe Derecho
13,0	330061.40 7	1131743,27 0	124.86 4	Grieta Derecha Secundaria
14,0	330059.58 9	1131732,63 5	124.69 4	Escarpe Derecho
15,0	330045.89 1	1131717,67 5	116.06 2	Escarpe Derecho
16,0	330023.32 9	1131721,85 8	116.04 6	Escarpe Derecho
17,0	330220,39	1131638,51	150,93 0	Grieta Izquierda secundaria
18,0	330219,03	1131653,31	151,32 0	Grieta corona secundaria
19,0	330210,10	1131677,27	150,91 0	Grieta corona secundaria
20,0	330198,03	1131684,05	150,29 0	Grieta Derecha secundaria

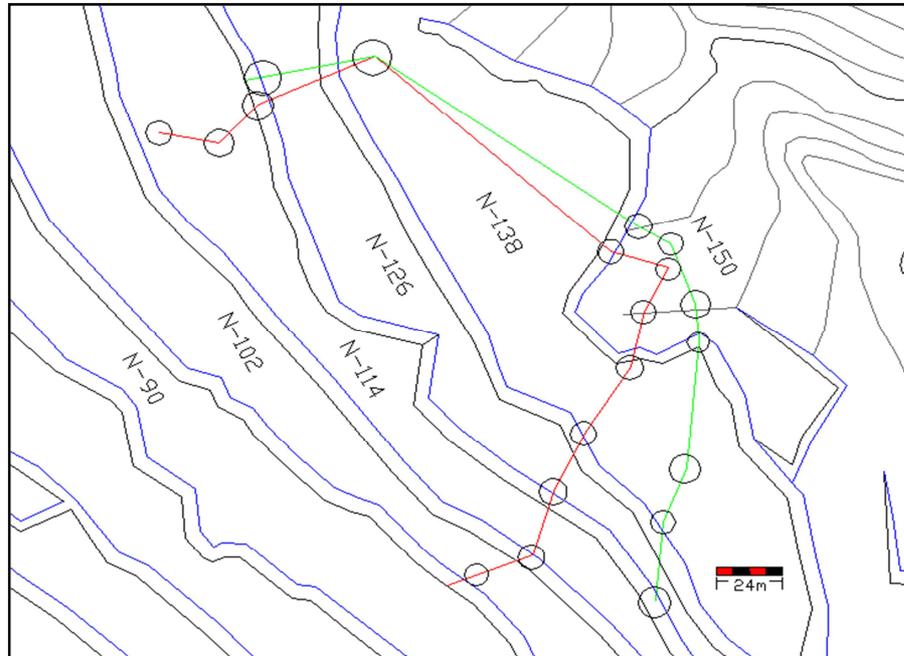


Figura 5.12 Levantamiento topográfico de la zona en deslizamiento.

### 5.3 Determinación de parámetros morfológicos

Los parámetros morfológicos del deslizamiento según la terminología recomendada por la International Association for Engineering Geology (I.A.E.G.), determinados mediante el levantamiento topográfico y los perfiles del área deslizada son (Figura 5.13):

1. Ancho de la masa deslizada: 197,13 metros.
2. Ancho de la superficie de falla: 205,20 metros.
3. Longitud de masa deslizada: 230,10 metros.

4. Longitud de la superficie de falla: 217,82 metros.
5. Profundidad de la masa desplazada: 10 metros aproximadamente.
6. Profundidad de la superficie de falla: 13 metros aproximadamente.
7. Longitud total: 249,11 metros.
8. Longitud de la línea central: 241,44 metros.

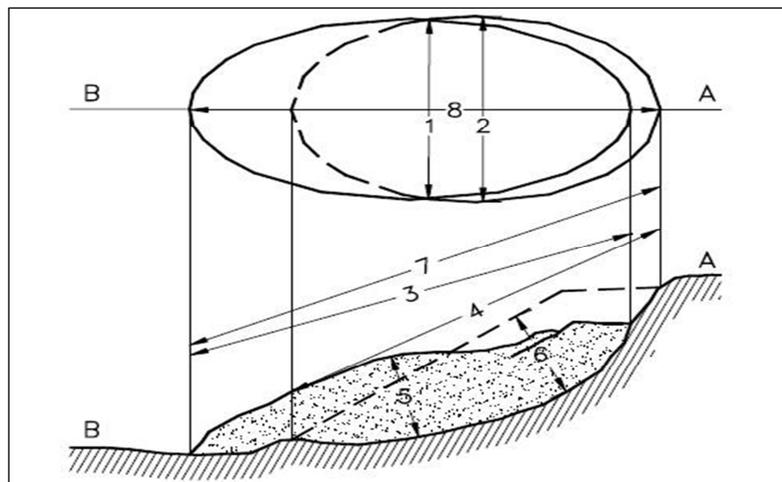


Figura 5.13 Dimensiones de los movimientos en masa según la IAEG (Modificado de Rico A. y Del Castillo H., 2005).

#### 5.4 Determinación de las características químicas del material deslizante

La determinación de las características químicas del material presente en el deslizamiento se realizó con el fin de conocer la calidad del mismo, y de esta manera

poder comprobar si el material posee los requerimientos necesarios para su uso en el proceso de producción de cemento y/o agregados.

El material analizado se basa en seis (6) muestras de roca Caliza, tomadas de los diferentes puntos de la zona en deslizamiento en donde existe su mayor concentración. Los resultados de los análisis son los siguientes (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Características químicas de la roca Caliza presente en el deslizamiento.

Muestra	Componente Químico							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
1	5.47	0.82	1.08	51.31	0.69	0.16	0.07	0.13
2	2.70	1.09	0.71	53.22	0.76	0.32	0.07	0.21
3	3.42	0.45	0.85	52.60	0.71	0.44	0.07	0.06
4	3.80	0.65	0.89	52.08	0.68	0.37	0.08	0.12
5	2.65	0.80	0.74	49.82	0.80	0.28	0.05	0.18
6	4.35	0.78	1.15	53.11	0.7	0.12	0.06	0.11

### 5.5 Elaboración de perfiles geológicos

En total se elaboraron cinco (5) perfiles geológicos, abarcando toda la zona en estudio, estos fueron realizados en dirección Noreste-Suroeste, paralelos a la dirección del deslizamiento y a lo largo de el, con el propósito de conocer el espesor real de las capas de suelo presentes en la zona. A continuación se presenta la descripción breve de uno de los perfiles elaborados (Anexo 3):

### 5.5.1 Perfil geológico C-C'

El perfil geológico fue realizado paralelo al sentido del desplazamiento, en dirección Noreste-Suroeste, en escala 1:1000, sobre los puntos de los sondeos exploratorios 091072, 091067, 091062 y 091057 realizados en la zona. En este perfil se observa el contacto entre las Formaciones Cantil y Barranquin, determinado por la transición de las capas de Caliza (delgadas hacia el tope de la Formación Barranquin y macizas hacia la Formación Cantil). Destacando de manera importante el buzamiento del contacto, debido a su influencia en la causa de deslizamiento presente (Figura 5.14).

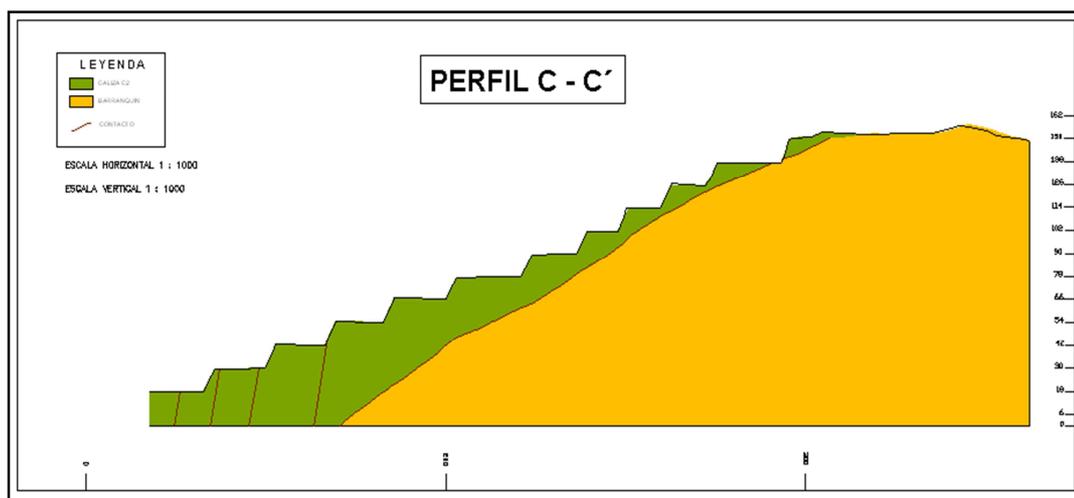


Figura 5.14 Perfil geológico C-C' de la cantera Cantil Sur.

### 5.6 Estimación de material desplazado

Según los datos obtenidos mediante el cálculo de estimación de reservas por el método de las secciones verticales, el volumen de material deslizado fue de 171888,5

m<sup>3</sup>, de los cuales 63075 m<sup>3</sup> esta representado por roca caliza apta para la producción de cemento, y 108813,5 m<sup>3</sup> por material denominado estéril (Tabla 5.3 y Tabla 5.4).

Tabla 5.3 olumen estimado de roca caliza deslizada.

PERFIL	Área por Perfil (m <sup>2</sup> )	Distancia entre Perfiles (mts)	Suma de Áreas (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )
P - 465	4,39	50	-	-
P - 515	114,87	50	59,63	2981,5
P - 565	252,1	50	183,485	9174,25
P - 615	376,05	50	314,075	15703,75
P - 665	1.032,57	50	704,31	35215,5
Volumen total				63075 m <sup>3</sup>

Tabla 5.4 Volumen estimado de material estéril deslizado.

PERFIL	Área por Perfil (m <sup>2</sup> )	Distancia entre Perfiles (mts)	Suma de Áreas (m <sup>2</sup> )	Volumen parcial (m <sup>3</sup> )
P - 465	94,19	50	-	-
P - 515	398,22	50	246,205	12310,25
P - 565	642,52	50	520,37	26018,5
P - 615	673,15	50	657,835	32891,75
P - 665	830,57	50	751,86	37593
Volumen total				108813,5 m <sup>3</sup>

### 5.7 Repercusión del deslizamiento en la evolución y desarrollo de la cantera Cantil Sur

Para el período 2008–2009, según el plan de explotación de las canteras, se estimó un objetivo de producción de materias primas para cemento en un orden de 5.476.000 Tm; de las cuales 3.500.000 TM de calizas son de la cantera Cantil.

El deslizamiento afectó 171888,5 m<sup>3</sup> (unos 379.888,35 TM) de material en dirección Sur-Oeste, abarcando los niveles comprendidos entre las cotas 150 y 90, generando las siguientes consecuencias:

- Modificación del pit final en el área deslizada de la cantera Cantil Sur.
- La remoción de 171.888,5 m<sup>3</sup> de material, del cual la mayoría será aprovechado como materia prima para la producción de agregados.
- Desviación de recursos (cargadores, tractores, perforadoras, martillos, gastos de explosivos y personal) destinados a la producción, hacia el desarrollo y estabilización de la zona deslizada.
- Retención de reservas de materia prima para la producción de cementos y agregados en los niveles inferiores o pie del deslizamiento (108.111,33 m<sup>3</sup>, entre los niveles 114, 102 y 90), lo cual afecta el desarrollo y evolución de la cantera Cantil Sur.

## 5.8 Clasificación geomecánica

La clasificación geomecánica de los materiales afectados por el deslizamiento se realizó mediante el método RMR de Bieniawski (1989), con el fin de estimar los parámetros mecánicos de los macizos y materiales presentes, a un bajo costo y de forma sencilla. El método fue aplicado sobre los frentes de los taludes adyacentes al deslizamiento y dentro del mismo, obteniendo los siguientes resultados:

### 5.8.1 Clasificación geomecánica de la roca Caliza

La clasificación de este material se realizó sobre los frentes de roca caliza de gran espesor de la Formación Barranquin, observando los parámetros de clasificación presentados por Bieniawski como resistencia de la matriz rocosa, RQD, separación entre diaclasas, estado de las discontinuidades y la presencia de agua freática. Obteniendo los siguientes resultados (Tabla 5.5):

Tabla 5.5 Clasificación geomecánica de la roca Caliza.

<b>Clasificación Geomecánica – Roca Caliza</b>			
Parámetros de clasificación	Observación	Valoración	
Resistencia de la Matriz Rocosa	Entre 100-250 MPa	12	
RQD	Entre 25% -50%	6	
Separación entre diaclasas	Entre 0,2-0,6 mts	10	
Estado de las discontinuidades	Longitud	< 1 mts	6
	Abertura	Entre 1-5 mm	1
	Rugosidad	Ligeramente rugosa	3
	Relleno	Ninguno	6
	Alteración	Ligeramente alterada	5
Agua Freática	Seco	15	
	<b>Total</b>	64	
Ajuste por orientación de las fisuras	Medianamente favorables	-25	
	<b>RMR Total</b>	39	

Según los datos obtenidos el material se clasifica como categoría IV, y se le considera de calidad mala, con ángulo de rozamiento entre 15° y 25°.

#### 5.8.2 Clasificación geomecánica de la roca Caliza con presencia de cristales

Siguiendo el mismo lineamiento presentado por Bieniawski, (1989), se realizó la clasificación geomecánica de la roca Caliza con presencia de cristales, perteneciente a la Formación Barranquin, obteniendo los siguientes parámetros (Tabla 5.6).

Tabla 5.6 Clasificación geomecánica de la roca Caliza con presencia de cristales.

<b>Clasificación Geomecánica – Roca Caliza con cristales</b>			
Parámetros de clasificación	Observación	Valoración	
Resistencia de la Matriz Rocosa	Entre 100-250 MPa	12	
RQD	< 25%	3	
Separación entre diaclasas	Entre 0,2-0,6 mts	10	
Estado de las discontinuidades	Longitud	Entre 1-3 mts	4
	Abertura	> 5 mm	0
	Rugosidad	Rugosa	5
	Relleno	Ninguno	6
	Alteración	Muy alterada	1
Agua Freática	Seco	15	
	<b>Total</b>	56	
Ajuste por orientación de las fisuras	Medianamente favorables	-25	
	<b>RMR Total</b>	31	

Mediante los datos obtenidos el material rocoso se clasifica como categoría IV, se le considera de calidad mala, con ángulos de rozamiento entre 15° y 25°.

### 5.8.3 Clasificación geomecánica de macizo de Arenisca

Según las observaciones realizadas en campo y siguiendo la metodología antes aplicada los resultados fueron los siguientes (Tabla 5.7).

Tabla 5.7 Clasificación geomecánica de la Arenisca.

<b>Clasificación Geomecánica – Arenisca</b>			
Parámetros de clasificación	Observación	Valoración	
Resistencia de la Matriz Rocosa	Entre 50-25 MPa	4	
RQD	Entre 75% -90%	17	
Separación entre diaclasas	Entre 0,06-0,6 mts	9	
Estado de las discontinuidades	Longitud	< 1 mts	6
	Abertura	Entre 1-5 mm	1
	Rugosidad	Ligera	3
	Relleno	Ninguno	6
	Alteración	Inalterada	6
Agua Freática	Seco	15	
	<b>Total</b>	<b>67</b>	
Ajuste por orientación de las fisuras	Medianamente favorables	-25	
	<b>RMR Total</b>	<b>42</b>	

Mediante los datos obtenidos se puede determinar que el material se clasifica como categoría III, el cual se considera de calidad media, con ángulos de rozamiento entre 25° y 35°.

### 5.9 Análisis de estabilidad retrospectivo (Back-análisis)

Para determinar los parámetros y condiciones existentes antes del deslizamiento, se realizó un análisis de estabilidad retrospectivo (back análisis) en condiciones de estabilidad crítica, con el uso de métodos de equilibrio límite en base a la topografía existente antes del movimiento de masa.

Los análisis se ejecutaron sobre los perfiles topográficos A-A', B-B', C-C' y D-D' específicamente, los cuales cubren las principales áreas de la zona de estudio, usando como herramienta el programa de estabilidad de taludes Slide para la verificación de resultados y determinación de las posibles superficies de rotura.

De esta manera los parámetros geotécnicos y condiciones asumidas para los materiales presentes fueron los siguientes (Tabla 5.8):

Tabla 5.8 Parámetros geotécnicos asumidos para los análisis retrospectivos

<b>CAPAS AFECTADAS</b>	<b><math>\gamma</math> (KN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>RMR</b>	<b>COHESIÓN</b>
Caliza gris (producción)	26	39	0
Lutitas negras (meteorizadas)	22	0	0
Calizas blanquecinas (con cavernas y cristales)	24	31	0
Arenisca	23,5	37	0
Intercalaciones de Areniscas y lutitas	23	Gsi= 43	0

#### 5.9.1 Perfil A-A'

Se realizó el análisis de estabilidad retrospectivo de acuerdo a las observaciones efectuadas en campo, como dirección, desplazamiento, profundidad del plano de rotura observado, clasificación geomecánica y peso de los suelos presentes; aplicando los métodos de equilibrio límite de Bihop, Fellenius y Janbu, para Factores de Seguridad iguales o menores a uno (1) y superficie de rotura circular. De esta manera, se determinaron los siguientes parámetros que condicionan el deslizamiento presente:

$$\text{Ángulo de fricción } (\phi') = 26^\circ$$

Estos valores son aceptables para la inestabilidad del área, de acuerdo a las condiciones en las que se observó el plano de deslizamiento (Figura 5.15).

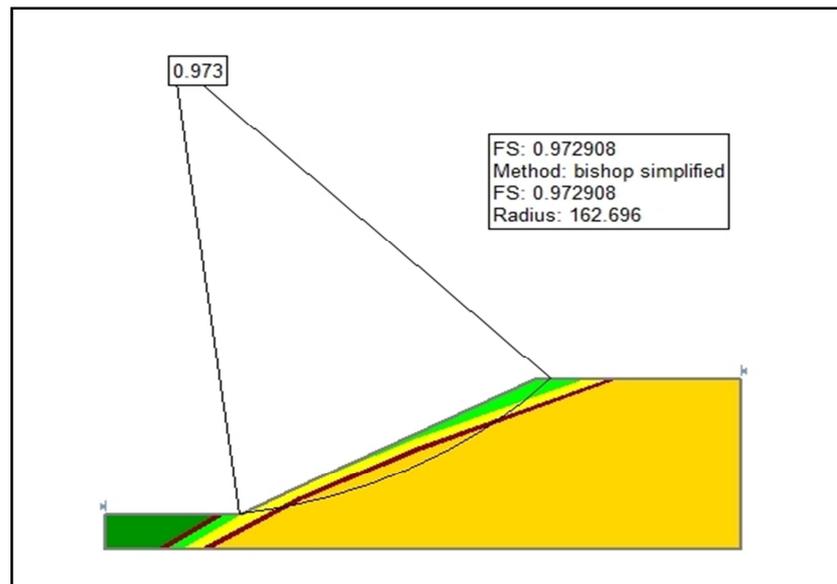


Figura 5.15 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil A-A' mediante el método de Bishop simplificado.

### 5.9.2 Perfil B-B'

Para el presente perfil se realizaron los análisis de estabilidad retrospectivos bajo las mismas condiciones observadas en el perfil A-A', salvo que la profundidad del plano de rotura fue un poco mas profunda. Aplicando los métodos de equilibrio límite de Bihop, Fellenius y Janbu, para Factores de Seguridad iguales o menores a uno (1) y superficie de rotura circular (Figura 5.16). Determinando los siguientes parámetros que condicionan el deslizamiento presente:

$$\text{Ángulo de fricción } (\phi') = 28^\circ$$

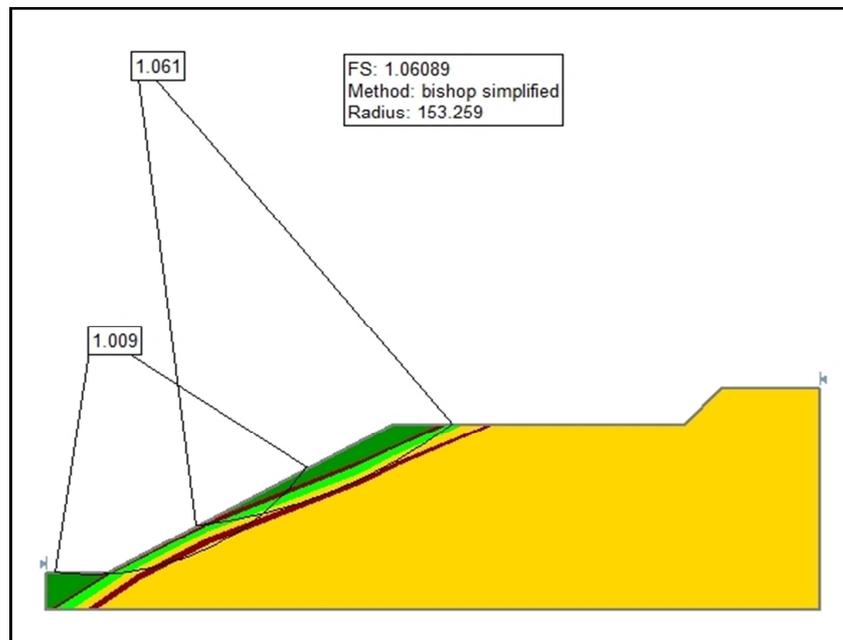


Figura 5.16 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil B-B' mediante el método de Bishop simplificado.

### 5.9.3 Perfil C-C'

Se analizó la estabilidad del área de acuerdo a las observaciones realizadas en campo al igual que los perfiles anteriores (dirección, desplazamiento, profundidad del plano de rotura observado, entre otros); aplicando los métodos de equilibrio límite de Bihop, Fellenius y Janbu, para Factores de Seguridad iguales o menores a uno (1) y superficie de rotura circular (Figura 5.17). Determinando los siguientes parámetros:

Ángulo de fricción ( $\phi'$ )=  $27^\circ$

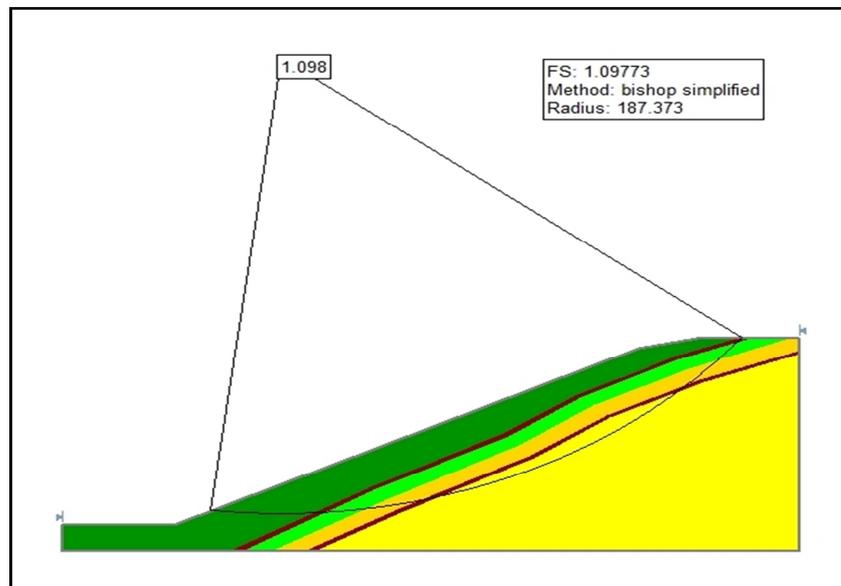


Figura 5.17 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil C-C' mediante el método de Bishop simplificado.

En esta área se generó un mayor desplazamiento, con un plano de rotura más profundo, por lo cual los valores obtenidos son válidos para las capas inferiores próximas a dicho plano observado.

#### 5.9.4 Perfil D-D'

En esta área de la cantera Cantil Sur no se observó un desplazamiento significativo, sólo la presencia de algunas grietas de tracción en el nivel superior (nivel 150), por lo cual se le realizó el análisis de estabilidad retrospectivo para determinar el grado de peligrosidad que posee la zona, dado que se encuentra adyacente al flanco con mayor desplazamiento del fenómeno estudiado (Figura 5.18). Dando como resultado los siguientes parámetros:

Ángulo de fricción ( $\phi'$ ) =  $29^\circ$

De acuerdo a los parámetros determinados en este análisis, se pudo observar que el factor de seguridad generado para la superficie de rotura es próximo a los 1,5; valor aceptable para las condiciones de estabilidad aplicadas, y para las evidencias de rotura observadas en la zona.

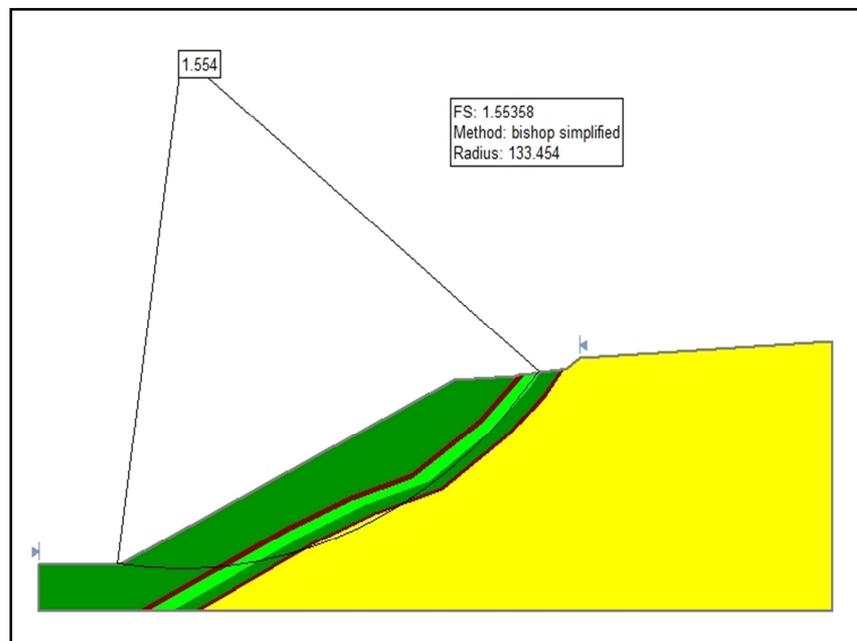


Figura 5.18 Resultado del análisis retrospectivo para el perfil D-D' mediante el método de Bishop simplificado.

## 5.10 Procedimientos y métodos aplicables para la recuperación del material afectado por el deslizamiento

Para la recuperación de la materia prima y la corrección de la zona en deslizamiento, era necesario evaluar los posibles métodos a utilizar de acuerdo a las condiciones observadas y análisis realizados en el área.

El material a recuperar para los procesos de producción de cemento y agregados viene condicionado por la calidad y composición química que este presente, mediante los cálculos realizados anteriormente, se estimó un total de 171.888,5 m<sup>3</sup> de material desplazado, del cual 63.075 m<sup>3</sup> son de roca caliza y 108.813,5 m<sup>3</sup> son de material estéril (denominando estéril al material presente que no es roca caliza, perteneciente a la Formación Barranquin).

Para una mejor organización en la recuperación de la materia prima y corrección del deslizamiento, se propone dividir el área afectada en tres zonas a desarrollar, una primera zona compuesta por la cabecera o límite superior del deslizamiento, entre los niveles 150 y 138 de la cantera Cantil Sur; la zona dos por el cuerpo o zona media del deslizamiento, entre los niveles 126 y 114; y la zona tres compuesta por el pie o límite inferior del deslizamiento, específicamente entre los niveles 102 y 90 (Anexo 4).

### 5.10.1 Métodos aplicables a la zona 1

Los métodos aplicables sobre la cabecera o límite superior del deslizamiento, son los siguientes:

5.10.1.1 Relocalización y remoción de material: el objetivo de este método es recuperar el material afectado para su uso en la producción de cemento y/o agregados y trasladar material adyacente a los límites del deslizamiento para un mejor desarrollo de la recuperación y estabilización del área. Este método nos generara un mayor espacio para el transito de los equipos móviles a utilizar, como también reduce el peso activo presente en el área.

La relocalización es aplicable dentro y fuera de los límites del deslizamiento, específicamente próximo a las coordenadas N1.131.710-E330.201, N1.131.667–E330.209 y N1.131.637–E330.226, de la cantera Cantil Sur. Siendo una aplicación de bajo costo, ya que se cuenta con la maquinaria necesaria para su desarrollo.

La remoción de material nos permite la recuperación del material apto para la producción de cementos y/o agregados, al igual que la corrección del deslizamiento y estabilidad de la zona afectada mediante la reducción del esfuerzo cortante actuante. Es aplicable a toda la parte superior de la zona en deslizamiento y a los límites del mismo, el costo de este método es variable conforme a la cantidad de material a remover y a las condiciones en las que se presente el mismo.

La cantidad de material a mover viene establecido de acuerdo a la profundidad del plano de rotura en la zona, siendo para esta un plano de rotura de 13 metros de profundidad aproximadamente.

5.10.1.2 Escalonamiento y abatimiento de taludes: este método técnico nos permite realizar la corrección del deslizamiento y estabilidad de la zona mediante la reducción de los esfuerzos cortantes actuantes, siendo el primer punto a tomar en cuenta para la solución de la inestabilidad. Debido a las dimensiones de los taludes originales y al buzamiento de las capas de suelo que lo conforman, se plantea la creación de un escalonamiento representado por al menos 4 bancos y ángulo de inclinación próxima o por debajo al ángulo de buzamiento de las capas de suelo presentes.

5.10.1.3 Creación de drenajes superficiales: con la creación de drenajes superficiales se establece más estabilidad en la zona corregida, aumentando la resistencia al corte, disminuyendo la capacidad de infiltración del suelo mediante la influencia del agua. Esta técnica o método es aplicable encima de la corona del deslizamiento, en la superficie de la masa en movimiento y sobre el escalonamiento, siendo esencial para este tipo de formaciones geológicas con alto contenido de material rocoso.

Para esta zona se propone la creación de drenajes superficiales, en dirección Noroeste y paralelos a los frentes de los taludes, sobre la corona del deslizamiento, y en cada base del escalonamiento propuesto anteriormente. De esta manera se genera una nueva dirección del flujo de agua superficial y de escorrentía en los taludes.

5.10.1.4 Sello de grietas: este método técnico se realiza con el fin de corregir y eludir deslizamientos posteriores en las zonas adyacentes a la afectada, reduciendo la inestabilidad por infiltración de aguas superficiales o de escorrentía. Es aplicable encima de la corona y en los límites del deslizamiento, y en específico sobre material perteneciente a la formación Barranquin de tendencia arenosa.

5.10.4.5 Uso de explosivos: es un método rudimentario para el tratado de taludes, pero permite la corrección del deslizamiento y la recuperación de materia prima apta para la producción. Aunque aumenta la resistencia al corte de los materiales presentes, es aplicable en los límites del deslizamiento y en frentes rocosos macizos.

Para la zona a desarrollar, el uso de explosivo estaría condicionado solo a frentes macizos rocosos ubicados en los límites del deslizamiento debido a la difícil extracción mecánica mediante el uso de tractores.

#### 5.10.2 Métodos aplicables a la zona 2

Los métodos aplicables a la zona media del deslizamiento, entre los niveles 126 y 114 son los siguientes:

5.10.2.1 Relocalización y remoción de material: el objetivo de este método es recuperar el material desplazado y afectado por el deslizamiento, así como relocalizar el material adyacente a los límites del mismo para un mayor acondicionamiento del área, mejoras en las vías de acceso, y la reducción del peso activo de la zona. Siendo una aplicación de bajo costo, ya que se cuenta con la maquinaria necesaria para su desarrollo.

El material a movilizar en esta área estaría ubicado en los límites del deslizamiento, próximo a las coordenadas N1.131.782-E330.097 y N1.131.574-E330.200.

La remoción de material para esta zona permitirá la corrección y estabilización mediante la reducción de los esfuerzos cortantes actuantes, al igual que la recuperación de materia prima necesaria para el proceso de producción. Este método es aplicable en toda el área y fuera de los límites del deslizamiento, siendo rentable y

eficiente en este tipo de suelos. En su desarrollo es necesario en ocasiones el uso de explosivos como método de arranque del material desplazado.

La remoción de material estaría distribuida en aproximadamente 42.000 toneladas adyacentes a los flancos derecho e izquierdo del deslizamiento, específicamente sobre las coordenadas N1.131.703-E330.105 y N1.131.652-E330.150, al igual que unas 27.000 toneladas ubicadas en la zona central, sobre las coordenadas N1.131.649-E330.115.

5.10.2.2 Abatimiento de taludes: mediante este método es posible la corrección del deslizamiento y estabilidad de la zona, ya que reduce los esfuerzos cortantes actuantes en el. De acuerdo a los parámetros geotécnicos y características estructurales observadas, el abatimiento o no de los taludes se presenta condicionado por la diferencia en el buzamiento de las capas presentes en el deslizamiento, por lo cual se requiere de un estudio mas profundo para determinar las dimensiones de los nuevos taludes.

5.10.2.3 Creación de drenajes superficiales: mediante la creación de drenajes superficiales se reducen los esfuerzos cortantes actuantes por la influencia del agua, generando una mayor estabilidad. Para la zona a tratar los drenajes estarían ubicados en la base de los taludes finales, luego de la estabilización total del área y en dirección Noroeste, produciendo una mejora considerable en el proceso de infiltración y escorrentía de las aguas.

### 5.10.3 Métodos aplicables a la zona 3

Los métodos aplicables para la recuperación de materia prima y corrección del deslizamiento en el pie o límite inferior del deslizamiento son los siguientes:

5.10.3.1 Remoción de material: la remoción de material para esta zona permitirá la corrección y estabilización mediante la reducción de los esfuerzos cortantes actuantes, al igual que la recuperación de las vías de acceso a los niveles 102 y 90 de la cantera Cantil Sur. Es aplicable en toda el área y fuera de los límites del deslizamiento, utilizando en ocasiones el uso de explosivos como método de extracción del material afectado.

Para la zona a tratar el material a remover estaría representado por aproximadamente 10.000 toneladas, ubicadas en las coordenadas N1.131.629-E330.087 y N1.131.595-E330.062, aplicando a la vez el tratamiento y re-construcción de los taludes originales.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. La zona en deslizamiento de la cantera Cantil Sur esta compuesta por dos formaciones geológicas: la Formación Cantil, representada por calizas macizas de aspecto arrecifal, de color gris azulado, con pequeñas intercalaciones de lutitas negras en sus grietas y contactos, altamente diaclasada y calidad de roca mala; y la Formación Barranquin, constituida por una alternancia no constante de calizas grisáceas a blanquecinas con presencia de cavernas y cristales de calcita, areniscas cuarcíticas de grano medio a fino de color pardo a rojizo con tendencia friable, y lutitas verdosas a negras con apariencia esquistosa y estratificación laminar.

2. El deslizamiento de la cantera Cantil Sur presenta una superficie de falla de aproximadamente 218 metros, a una profundidad de 14 metros; desplazando 171.888,5m<sup>3</sup> de material en dirección Sur-Oeste.

3. El deslizamiento afectó 63.075 m<sup>3</sup> de roca Caliza apta para la producción de cemento y/o agregados, y 108.813,5 m<sup>3</sup> de material estéril.

4. El material de Caliza desplazado muestra características químicas que cumplen con los requerimientos necesarios para la producción de cementos y/o agregados, presentando valores de CaCO entre 49% y 54%.

5. El deslizamiento trajo como consecuencia la modificación del pit final de la cantera Cantil Sur, la desviación de recursos destinados a la producción como: cargadores, tractores, perforadoras, martillos, gastos en explosivos y personal, hacia el desarrollo y estabilidad de la zona; al igual que la retención de reservas de materia prima en los niveles inferiores y adyacencias al deslizamiento.

6. El deslizamiento presento roturas para valores de ángulo de fricción entre  $24^{\circ}$  y  $30^{\circ}$ . Siendo un deslizamiento de tipo compuesto o múltiple, con planos de falla a diferentes profundidades dentro de la Formación Barranquin.

7. El deslizamiento esta condicionado por la resistencia a la fricción de las capas de suelo presentes, y cohesiones bajas. Teniendo como factores desencadenantes: la variación de las fuerzas debido al peso de los materiales, la erosión interna y externa de los capas de suelo presentes, el grado de alteración, diaclasamiento y facturación de los materiales; y el stress transitorio generado por el uso constante de explosivos.

8. Se propone dividir el área deslizada en tres zonas a tratar. La zona 1 compuesta por la cabecera ó límite superior del deslizamiento, la zona 2 formada por el centro del deslizamiento, entre los niveles 126 y 114 de la cantera Cantil Sur específicamente, y una zona 3 compuesta por el pie ó límite inferior del deslizamiento. Usando como métodos técnicos de corrección y estabilización, la relocalización de material, la remoción de material, el escalonamiento y abatimiento de los taludes, la creación de drenajes superficiales y el uso de explosivos en algunos casos.

## Recomendaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación, se recomienda al Departamento de Canteras de la Planta Pertigalete evaluar las siguientes sugerencias:

1. Realizar perforaciones con extracción de núcleo en las siguientes coordenadas: N1.131.772-E330.016, N1.131.763-E330.098, N1.131.694-E330.203, N1.131.622-E330.208, N1.131.549-E330.180, N1.131.554-E330.102, N1.131.616-E330.138, N1.131.686-E330.143, N1.131.695-E330.089, N1.131.634-E330.093, N1.131.679-E330.013, N1.131.622-E330.037. De manera que se puedan verificar los resultados estimados en esta investigación y proseguir con la estabilización necesaria.
2. Ejecutar perforaciones con extracción de núcleo a partir de esta investigación, en todas las perforaciones exploratorias a realizar en la cantera o en donde lo amerite, con el fin de obtener la información geotécnica necesaria para mitigar los fenómenos naturales como movimientos de masa.
3. Preparar el laboratorio físico de la Planta Pertigalete con instrumentos y herramientas que permitan la realización de ensayos geotécnicos precisos, como permeabilidad, porosidad, corte directo y ensayo triaxial.
4. Establecer controles mas estrictos y precisos para la protección de los taludes, antes los mecanismos de extracción usados en los procesos de producción.
5. Debido a la presencia de lluvias constantes en casi todo el año, se recomienda establecer mejoras en los controles de drenajes superficiales para los taludes superiores en todas las canteras de la Planta Pertigalete, reduciendo así las posibilidades de otros movimientos de masa generados por este medio.

6. Hacer uso de los métodos de relocalización de material, remoción de material, abatimiento de taludes, creación de drenajes superficiales, y uso de explosivos; en el proceso de corrección y estabilización del deslizamiento estudiado como métodos más precisos y eficaces para el caso estudiado.

## REFERENCIAS

Balestrini, M. (1998). **CÓMO SE ELABORA EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**. (2da Edición). BL Consultores Asociados, servicio Editorial. Caracas.

Bieniawski, Z.T. (1989). ENGINEERING CLASIFICATION OF JOINTED ROCK MASSES. En González de Vallejo L. (2002). **INGENIERÍA GEOLÓGICA**. Pearson Educación. Madrid, pp 230.

CEMEX VENEZUELA (2007). **MANUAL DE CURSO PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO**. Centro de adiestramiento Planta Pertigalete.

CEMEX VENEZUELA (2009). **PLAN DE EXPLOTACION CANTERAS CANTIL, VIVERO, QUERECUAL Y SAN JOSE. ENERO 2009–DICIEMBRE 2009**. Planta Pertigalete. Coordinación de Canteras.

Cruden, D.M. y Varnes, D.J. (1996). LANDSLIDES TYPES AND PROCESSES. En González de Vallejo L. (2002). **INGENIERÍA GEOLÓGICA**. Pearson Educación. Madrid, pp 628.

Felder, B. et al. (1980) **EVALUACIÓN DE FORMACIONES EN VENEZUELA**. Schulumberger. pp 14- 27.

González de Vallejo L. (2002). **INGENIERÍA GEOLÓGICA**. Pearson Educación. Madrid, pp 430-484.

Hedberg, H.D. (1937). Estratigrafía de la sección del río Querecual en el noreste de Anzoátegui, Venezuela. En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Hedberg, H.D. (1950). Geology of the eastern Venezuela basin (Anzoátegui-Monagas-Sucre-eastern Guárico portion). En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Hedberg, H.D. y Pyre, A. (1944). Stratigraphy of northeastern Anzoátegui, Venezuela. En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Hernández, R. y Cols (1998), **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**. Mc. Graw- Hill. México, pp 12-18.

Hurtado de Barrera, J. (1996). **EL ANTEPROYECTO Y EL MARCO TEÓRICO. UN ENFOQUE HOLÍSTICO**. Fundación SYPAL. Editorial Magisterio. Caracas.

Juarez B. y Rico R. (1995). **MECÁNICA DE SUELOS. TOMO 2. TEORÍA Y APLICACIONES DE LA MECÁNICA DE SUELOS**. Editorial Limusa. México, pp 273-276.

Liddle, R.A. (1928). THE GEOLOGY OF VENEZUELA AND TRINIDAD. En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Meneses R. (1986). **PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO**. Centro de adiestramiento Planta Pertigalete.

Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Petróleos de Venezuela (PDVSA-Intevep) (1997). **CÓDIGO GEOLÓGICO DE VENEZUELA (CGV)**, 14 de Noviembre 2001, [[http:// www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico)].

Rico A. y Del Castillo H. (2005). **LA INGENIERÍA DE SUELOS EN LAS VÍAS TERRESTRES (CARRETERAS, FERROCARRILES Y AEROPISTAS). VOLUMEN 1**. Editorial Limusa. México, pp 277-382.

Rod, E. y Maync, W. (1954). Revision of Lower Cretaceous stratigraphy of Venezuela. En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Rosales, H. (1959). Discusión sobre la Formación El Cantil del noreste de Venezuela. En González de Vallejo L. (2002). **INGENIERÍA GEOLÓGICA**. Pearson Educación. Madrid, pp 625.

Salvador, A. (1964). Proposed simplification of the Stratigraphic Nomenclature in the Eastern Venezuela Basin. En Ministerio de Energía y Minas (1997). **LÉXICO ESTRATIGRÁFICO DE VENEZUELA**. Dirección de Geología, Tercera Edición, Caracas.

Sociedad venezolana de geotécnica (2000). **CALAMIDADES GEOTECNICAS URBANAS CON VISIÓN AL SIGLO XXI. LA EXPERIENCIA PARA PROYECTOS DEL FUTURO.** XIV seminario de SVDG. Caracas.

Tragsa y Tragsatec (1994) **RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA DE CUENCAS Y CONTROL DE LA EROSIÓN.** Ediciones Mundiprensa. Madrid. pp 650.

Varnes, D.J. (1988). SLOPE MOVEMENT TYPES AND PROCESSES. En González de Vallejo L. (2002). **INGENIERÍA GEOLÓGICA.** Pearson Educación. Madrid, pp 625.

## **APENDICES**

### **APÉNDICE A**

Tabla de sondeos en malla 50 x 50 metros de la zona en deslizamiento de la cantera Cantil Sur, con datos básicos como: composición química, profundidad, tipo de contacto y observaciones litoestratigráficas.

Tabla A.1 Sondeos en malla 50 x50 metros sobre la cantera Cantil Sur.

PERFIL	BLOQUE	DESDE (mts)	HASTA (mts)	STID	CONTIPO	CACO3	MGO	SIO2
<b>P565 (A-A')</b>	081062	0	10	CC2	FDS	67,26	0,4	24,08
	081057	0	12,6	CC2		97,05	0,46	0,94
	081057	12,6	24,6	CC2	FDS	91,21	0,51	3,6
<b>P615 (B-B')</b>	086067	0	12,5	CC2	FDS	81,84	0,53	13,49
	086062	0	12	CC2	NORM	71,44	0,45	19,42
	086062	12	24	B		37,4	2,12	39,29
	086062	24	36	B	FDS	22,42	1,7	47,55
	086057	0	12,13	CC2		97,82	0,5	0,39
	086057	12,13	24,13	CC2		91,75	0,61	3,15
	086057	24,13	36,13	CC2	FDS	94,73	0,55	2,23
<b>P665 (C-C')</b>	091072	0	8,35	CC2	NORM	63,74	0,41	26,11
	091072	8,35	13,13	B	FDS	63,74	0,41	26,11
	091067	0	12,5	CC2		87,13	0,51	5,92
	091067	12,5	15,9	CC2	NORM	57,39	0,4	30,6
	091067	15,9	24,5	B	FDS	57,39	0,4	30,6
	091062	0	12,15	CC2		86,07	0,59	8,82
	091062	12,15	24,15	CC2		80,02	0,48	13,2

	091062	24,15	33,1	CC2	NORM	75,59	0,38	15,14
	091062	33,1	36,15	B	FDS	75,59	0,38	15,14
	091057	0	12,3	CC2		61,9	0,42	25,15
	091057	12,3	24,3	CC2		94,98	0,55	1,9
	091057	24,3	36,3	CC2		90,09	0,54	4,48
	091057	36,3	48,3	CC2	FDS	91,27	0,6	3,79

Continuación de la Tabla A.1

PERFIL	BLOQUE	DESDE (mts)	HASTA (mts)	STID	CONTIPO	CACO3	MGO	SIO2
<b>P715 (D-D')</b>	096067	0	11,88	CC2		95,5	0,56	1,41
	096067	11,88	23,88	CC2	FDS	88,3	0,55	5,31
	096062	0	12,4	CC2		92,11	0,47	3,5
	096062	12,4	24,4	CC2		93,02	0,52	2,56
	096062	24,4	36,4	CC2	FDS	82,36	0,49	11,61
	096057	0	13,26	CC2	FDS	84,72	0,53	7,65
	0960572	0	12,9	CC2		67,17	0,42	25,35
	0960572	12,9	24,9	CC2		93,93	0,55	2,91
	0960572	24,9	36,9	CC2	FDS	77,68	0,64	13,34
<b>P765</b>	101072	0	7,23	B		36,86	0,66	39,54

	101072	7,23	19,23	B		17,26	0,34	59,22
	101072	19,23	31,23	B	FDS	32,29	0,37	49,88
	101072	31,23	35					
	101067	0	11,8	B		24,06	0,35	44,57
	101067	11,8	18,5	B	FAL	52,59	0,44	23,63
	101067	18,5	23,8	B		52,59	0,44	23,63
	101067	23,8	36,8	B	FDS	95,87	0,57	1,7
	101062	0	5,4	BRE		39,48	0,42	35,46
	101062	5,4	12,6	BRE		39,48	0,42	35,46
	101062	12,6	24,6	BRE	FDS	28,13	0,27	42,94

## APÉNDICE B

Gráficos de los Análisis de Estabilidad Retrospectivos (Back Análisis),  
mediante los métodos de Janbu Simplificado y Fellenius.

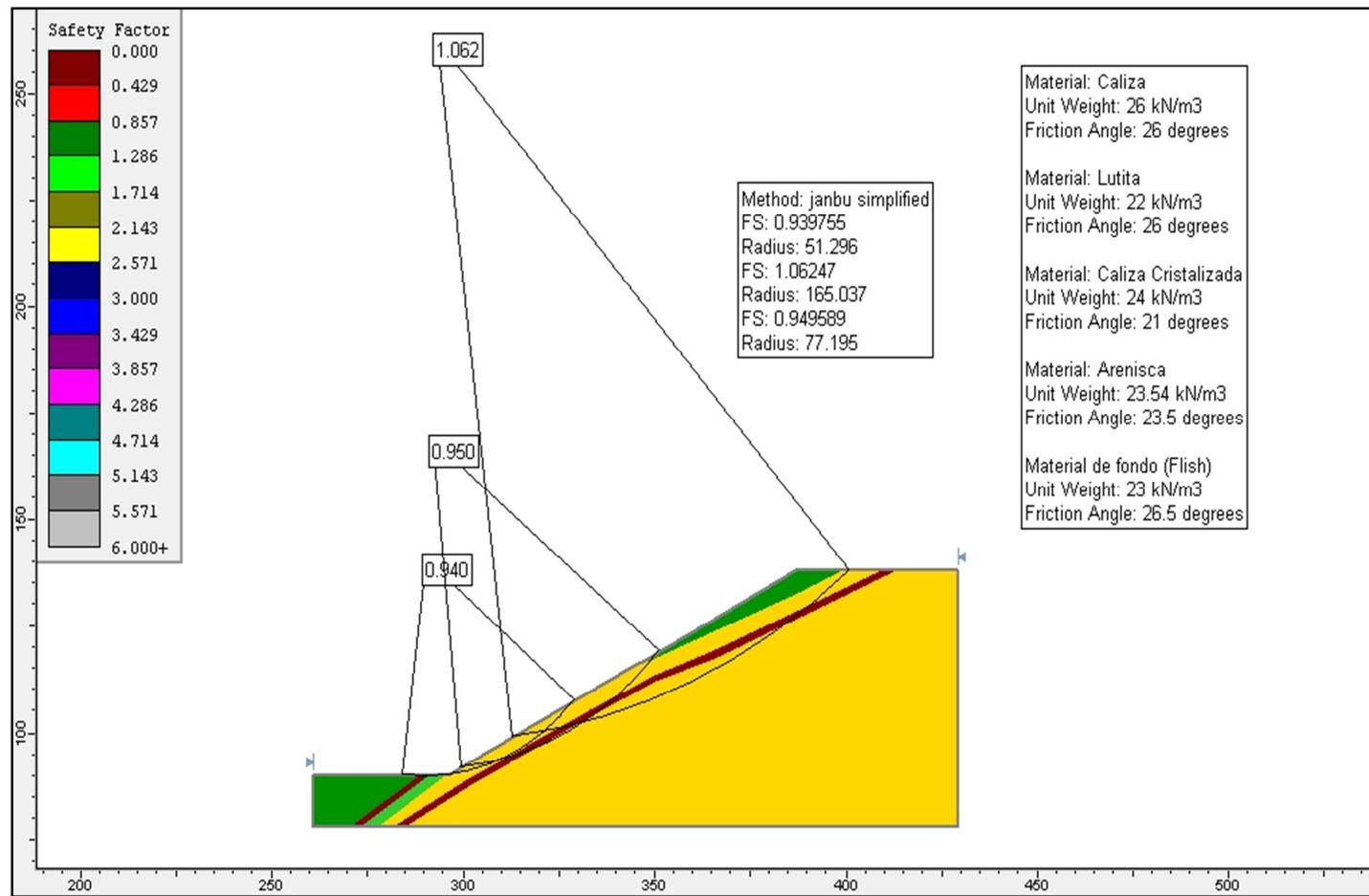


Figura B.1. Análisis retrospectivo para el perfil A-A' mediante el método de Janbu simplificado.

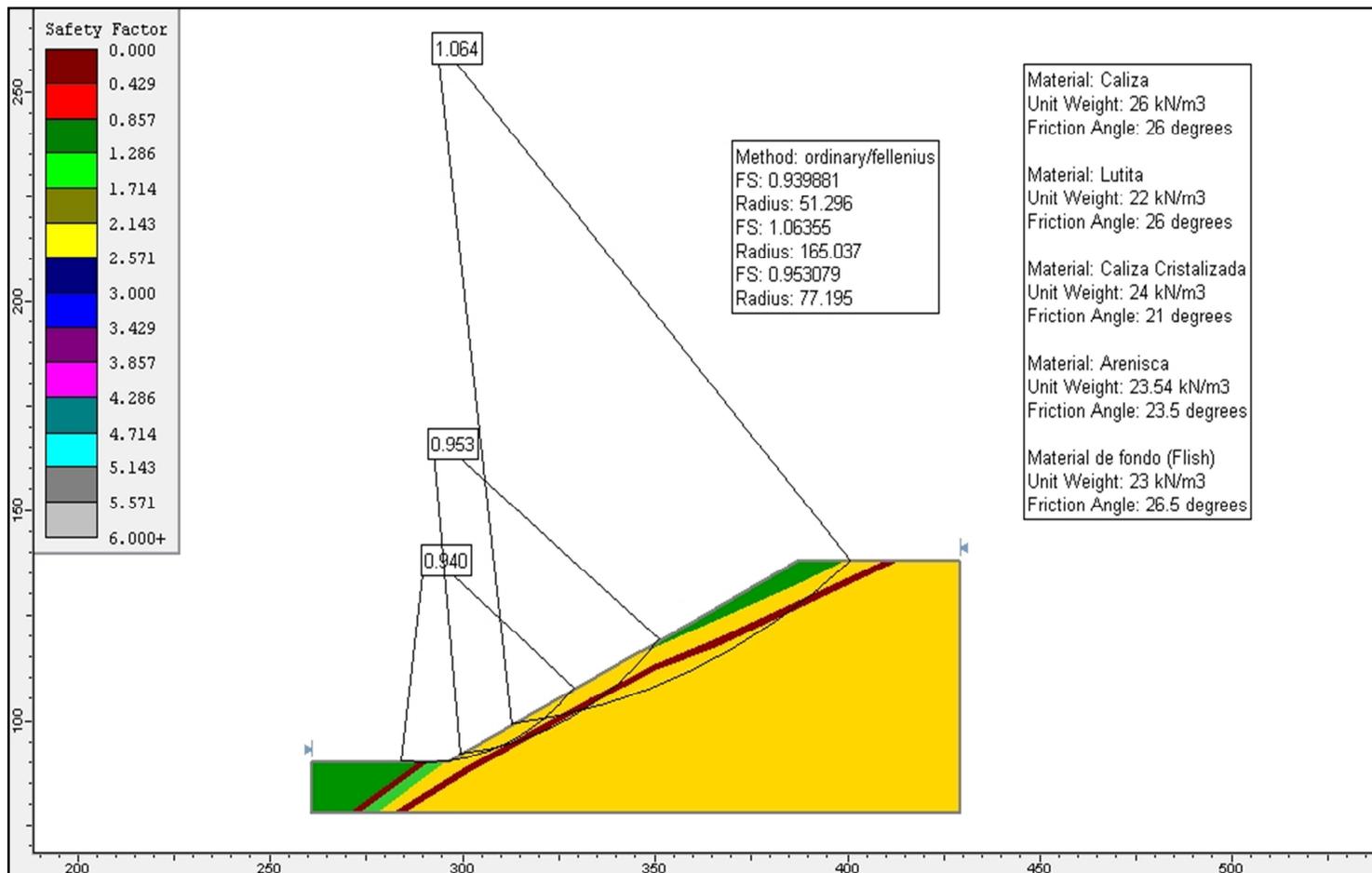


Figura B.2. Análisis retrospectivo para el perfil A-A' mediante el método de Fellenius.

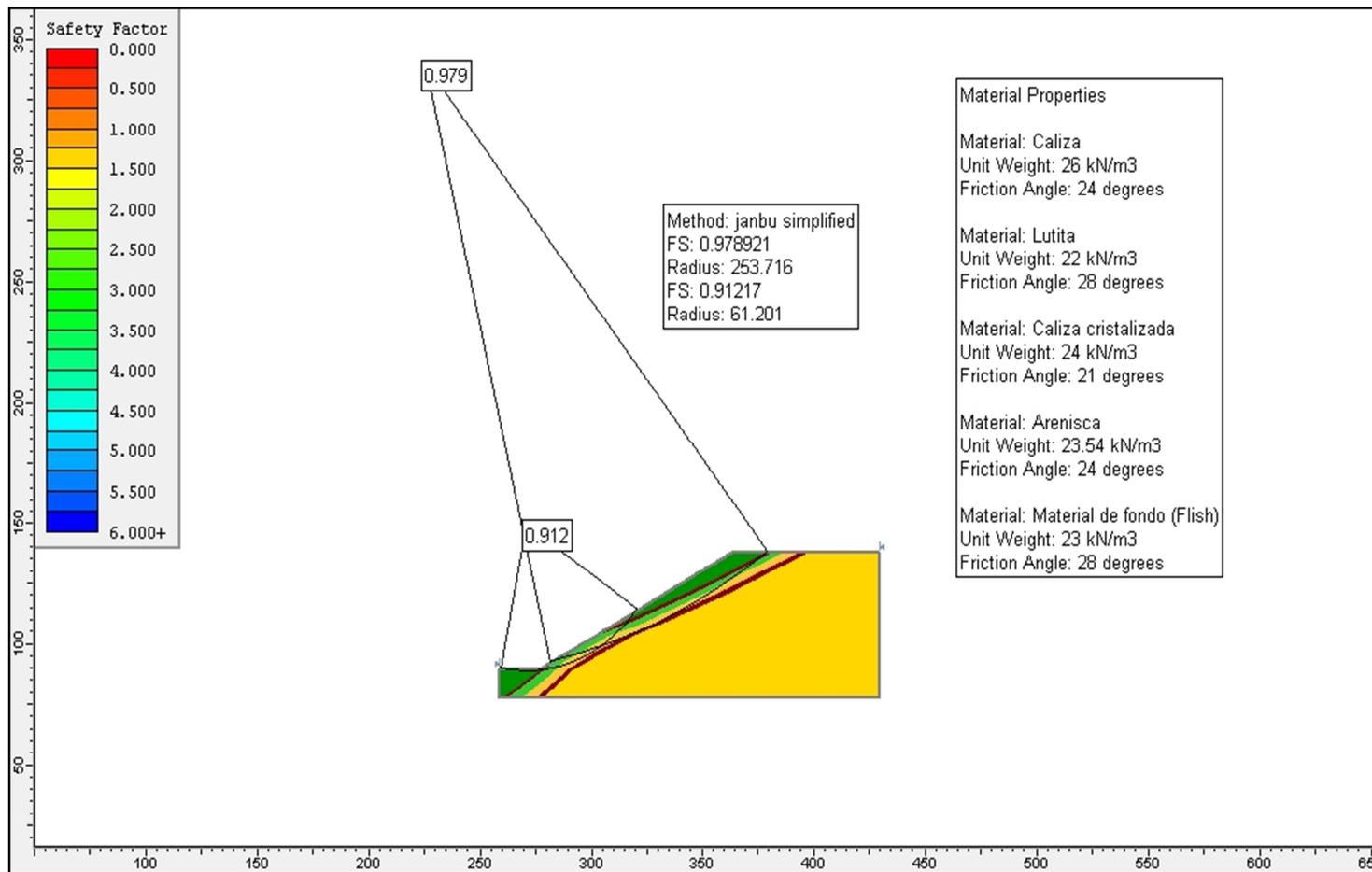


Figura B.3. Análisis retrospectivo para el perfil B-B' mediante el método de Janbu simplificado.

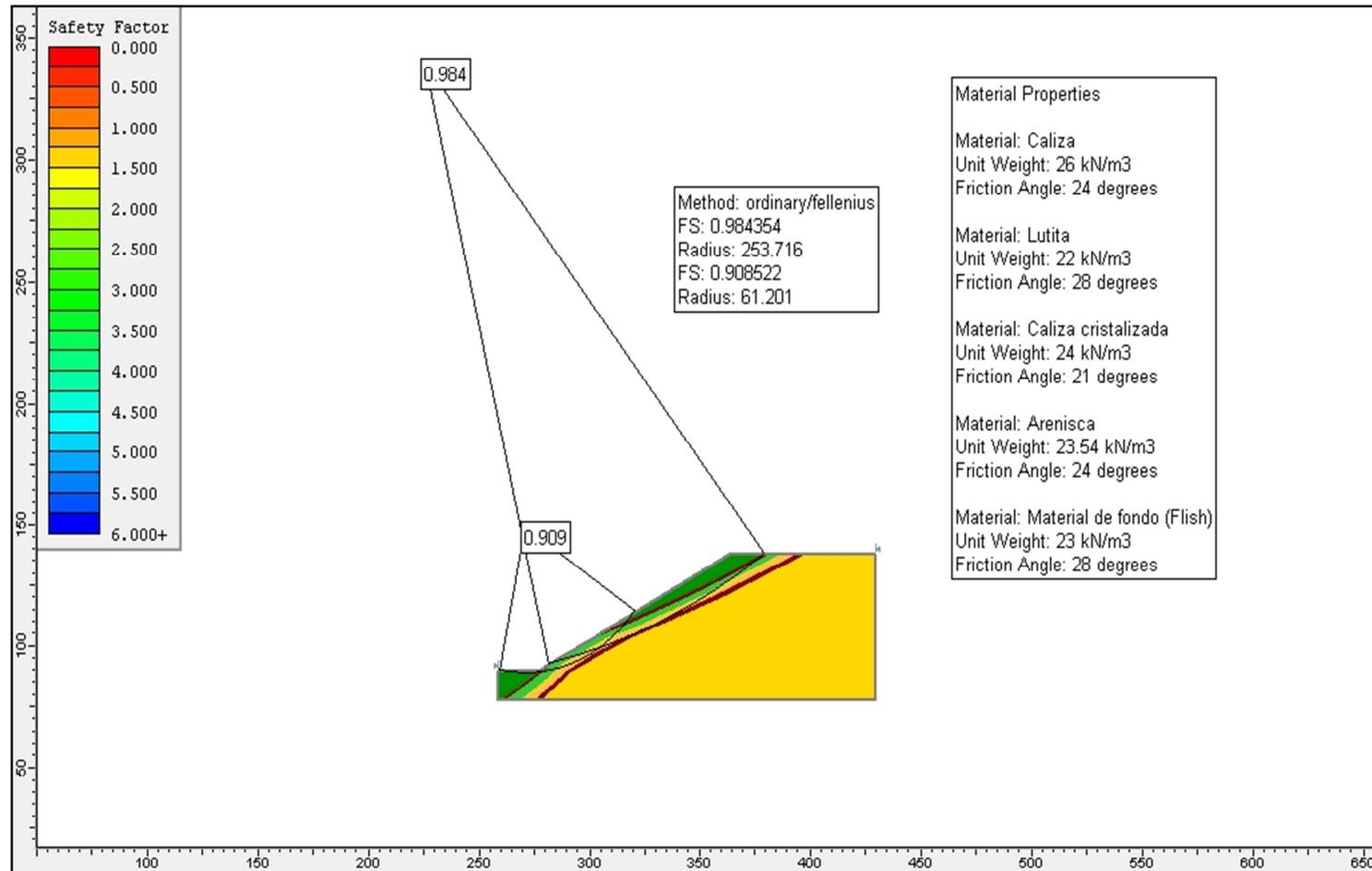


Figura B.4. Análisis retrospectivo para el perfil B-B' mediante el método de Fellenius.

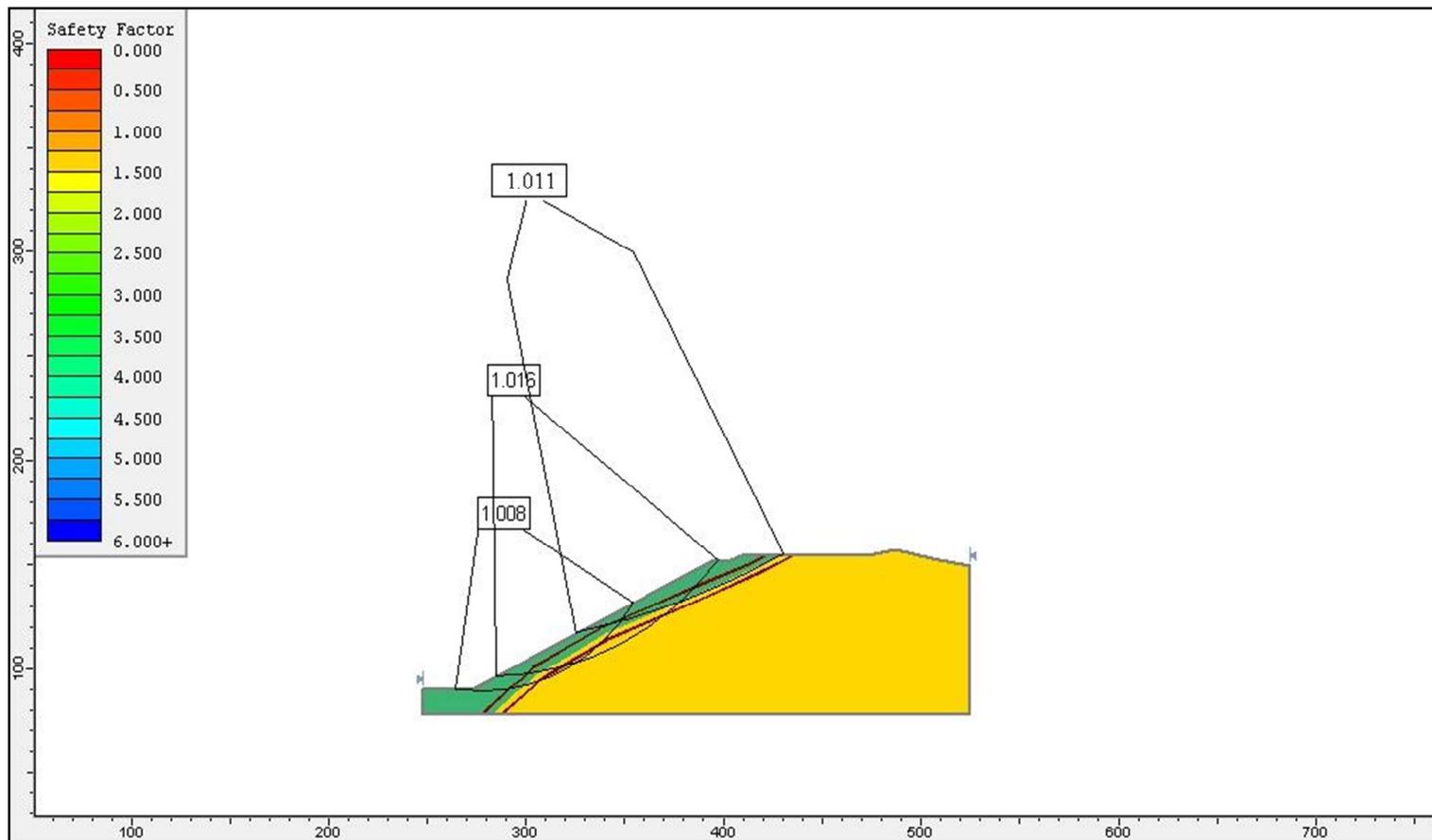


Figura B.5. Análisis retrospectivo para el perfil C-C' mediante el método de Janbu simplificado.

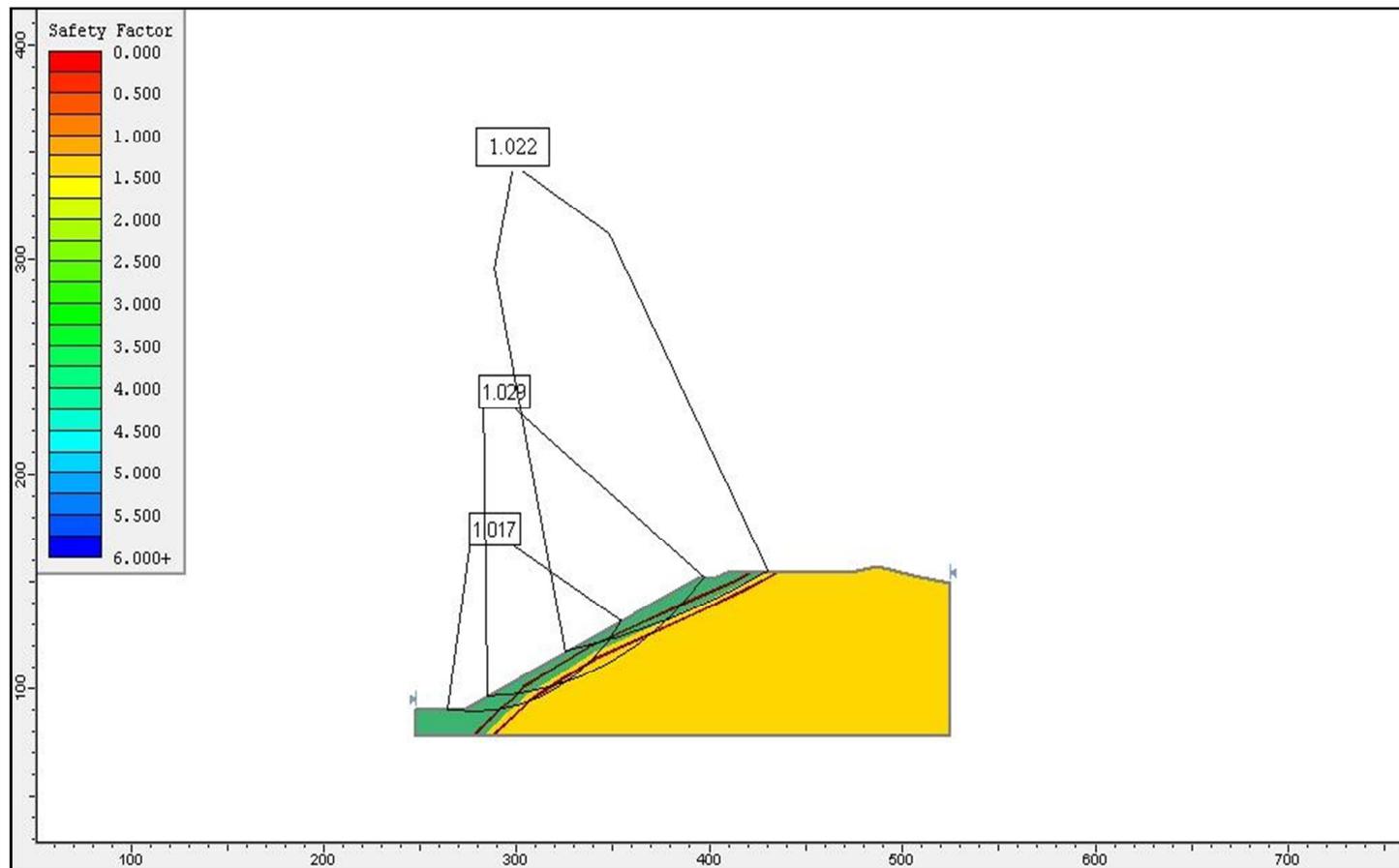


Figura B.6. Análisis retrospectivo para el perfil C-C' mediante el método de Fellenius.

## APÉNDICE C

Ecuaciones de los Métodos de Fellenius, Bishop y Janbu, utilizados para los análisis retrospectivos

### C.1 Ecuación usada para el análisis de estabilidad retrospectivo por el método de Fellenius.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - U_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \left( \frac{a}{R} \right)} \quad (C.1)$$

Donde:

$C'$  = Cohesión en términos de tensiones efectivas.

$\phi'$  = Angulo de fricción interna en grados.

$\gamma$  = Peso específico de la roca o el terreno.

$\gamma_w$  = Peso específico del agua.

$\alpha$  = Angulo positivo o negativo de la base de la dovela con respecto a la horizontal.

$W$  = Peso de la dovela.

$Z$  = Altura del nivel de agua en la grieta de tracción.

$L$  = Longitud de la base de la dovela.

**C.2 Ecuación usada para el análisis de estabilidad retrospectivo por el método de Bishop.**

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{c' b_i + (W_i - U_i b_i) \tan \phi'}{\cos \alpha_i \left[ 1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right]} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \left( \frac{a}{R} \right)} \quad (C.2)$$

**C.3 Ecuación usada para el análisis de estabilidad retrospectivo por el método de Janbu.**

$$FS = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n \frac{[c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{\left( 1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2} \quad (C.3)$$

Donde la ecuación para  $f_0$  es:

$$f_0 = 1 + k \left( \frac{d}{T} - 1, 4 \left( \frac{d}{T} \right)^2 \right)$$

Siendo:

Para  $C' = 0$  un valor de  $K = 0,31$ .

Para  $C' > 0$ ,  $\phi' > 0$  un valor de  $K = 0,50$ .

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/5

<b>Título</b>	Estudio geotécnico de la zona en deslizamiento de la cantera Cantil Sur de la planta Pertigalete, Km 6 carretera nacional Guanta-Cumaná estado Anzoátegui.
<b>Subtítulo</b>	

### Autor(es)

<b>Apellidos y Nombres</b>	<b>Código CVLAC / e-mail</b>	
<b>Mata A. Osmar J.</b>	<b>CVLAC</b>	<b>17.163.833</b>
	<b>e-mail</b>	<b>osmarj@hotmail.com</b>
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	

### Palabras o frases claves:

<i>Deslizamientos</i>
<i>Talud</i>
<i>Estabilidad</i>
<i>Geotecnia</i>

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/5

### Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
<i>Departamento de Geotecnia</i>	<i>Ingeniería Geológica</i>

### Resumen (abstract):

El siguiente estudio se desarrolló debido a la necesidad de la Coordinación de Canteras de la Planta Pertigalete, ubicada en el kilómetro 6 de la carretera nacional Guanta – Cumaná, de estudiar geotécnicamente el deslizamiento presente en una de sus canteras, específicamente la Cantera Cantil Sur. El estudio geotécnico del área afectada consta de un reconocimiento geológico que permite verificar la litología y estructuras presentes en los taludes desplazados, un levantamiento topográfico para conocer la morfología y dimensiones del deslizamiento, la toma de muestras para identificar las características químicas del material perturbado, una clasificación geomecánica para determinar la calidad de la matriz rocosa presente, la elaboración de secciones geológicas, la estimación de la cantidad de material desplazado, para posteriormente llevar a cabo el análisis de estabilidad retrospectivo y determinar los métodos aplicables para la recuperación del material y estabilidad de la zona afectada hasta los límites de explotación permitidos. Para los análisis de estabilidad fueron usados tres métodos de equilibrio límite, el de Bishop simplificado, Janbu y Fellenius, usando como medio de verificación el programa de análisis de estabilidad de taludes denominado Slide 5.0. Llegando a la conclusión de que en el área afectada se presenta el posible contacto transicional entre las Formaciones Cantil y Barranquin, evidenciado por el cambio litológico entre calizas macizas e intercalaciones de areniscas y lutitas negras, con un total de 171888,5 m<sup>3</sup> de material desplazado, de calidad de roca mala, resultando inestable para una superficie de rotura compuesta de factor de seguridad menor a los 1.3, de acuerdo a los rangos denominados estables para canteras a cielo abierto de matriz rocosa. Proponiendo la corrección del deslizamiento mediante el uso de métodos técnicos y rentables como la extracción y relocalización de material, abatimiento de taludes, diseño de sistemas de drenajes superficiales, uso de explosivos, y generación de nuevos bancos.

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/5

### Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
<i>Ramos M., Javier</i>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input checked="" type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	14.145.647
	<b>e-mail</b>	<i>jdramos@udo.edu.ve</i>
	<b>e-mail</b>	
<i>Echeverría, Dafnis</i>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	4.506.408
	<b>e-mail</b>	<i>Djed4506@hotmail.com</i>
	<b>e-mail</b>	
<i>Torrealba, Anny</i>	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>ROL</b>	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	<b>CVLAC</b>	
	<b>e-mail</b>	
	<b>e-mail</b>	

### Fecha de discusión y aprobación:

Año	Mes	Día
<i>2010</i>	<i>07</i>	<i>14</i>

Lenguaje: spa

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/5

### Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis-Estudio geotécnico de la zona en deslizamiento de la cantera cantli sur.doc	Application/msword

### Alcance:

**Espacial:** \_\_\_\_\_ (Opcional)

**Temporal:** \_\_\_\_\_ (Opcional)

**Título o Grado asociado con el trabajo:** Ingeniero Geólogo

**Nivel Asociado con el Trabajo:** Pre-grado

**Área de Estudio:** Departamento de Geotecnia

**Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:** Universidad de Oriente

## Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/5

---

**Derechos:**

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado  
“Los Trabajos de grado son exclusiva propiedad de la  
Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros  
fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo,  
quien lo participara al Consejo Universitario”



**AUTOR 1**

---

**AUTOR 2**

---

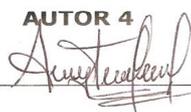
**AUTOR 3**



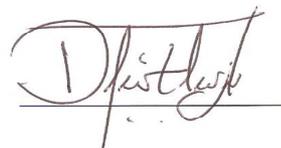
**TUTOR**

---

**AUTOR 4**



**JURADO 1**



**JURADO 2**

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS:**

