

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Incidencia del agua en los procesos de inestabilidad de taludes y laderas en el centro y norte de la ciudad de Guayaquil”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERIA CIVIL

Presentada por:

Miguel Ángel Chávez Abril

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2015

AGRADECIMIENTO

A la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL por haberme formado integralmente en mi profesión, a todos mis Profesores, a mi Director de Tesis y de un modo muy especial a mi padre, el Doctor Ingeniero Miguel Ángel Chávez Moncayo, un ejemplo a seguir.

DEDICATORIA

A mis queridos padres a quienes tanto debo y me honro de ser su hijo, a mis hermanos mayores y mis familiares más cercanos.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



MSc. Alby Aguilar P.

PRESIDENTA



Ing. Luis Zambrano C.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Mijail Arias H.

VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



Miguel Ángel Chávez Abril

RESUMEN

El estudio de la incidencia del agua en la estabilidad de los taludes y laderas en la ciudad de Guayaquil requiere un análisis teórico inicial especialmente orientado a la temática propuesta, a partir de una información geotécnica relativamente abundante.

Se demuestra la importancia de tener en cuenta las situaciones existentes, considerando las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas y geotécnicas de los terrenos en estudio, para luego proceder al análisis del comportamiento específico, frente a la acción de las lluvias.

Así se analizan los macizos rocosos deforestados y excavados, contando con los efectos del fenómeno natural de la meteorización y del deterioro en las laderas intervenidas; por otra parte el funcionamiento de los depósitos de suelo naturales y de los rellenos de suelos producto de acciones antrópicas equivocadas, sin el empleo de la técnica.

Se llega a demostrar que las discontinuidades y particularmente las fracturas tectónicas son directamente afectadas por el agua que se infiltra,

fluye o queda retenida en el interior de los macizos rocosos, generándose así condiciones de inestabilidad. Dentro de este contexto también se analiza la orientación de las discontinuidades y su interacción en relación a los taludes o laderas, a partir de lo cual se establecen diferentes formas de inestabilidad que implican la movilización (deslizamiento, caída o desplome) de masas y bloques de roca.

Teniendo en cuenta el comportamiento de los macizos rocosos y las masas de suelo sometidas a la acción del agua a nivel superficial, sub superficial y profundo, (incluyendo la acción del nivel freático y las presiones intersticiales) se formulan esquemáticamente soluciones para contrarrestar o manejar la acción negativa del agua.

Finalmente se desarrollan tres casos característicos de análisis de las condiciones de inestabilidad de taludes y laderas en la ciudad de Guayaquil.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-------|
| RESUMEN..... | VI |
| ÍNDICE GENERAL | VIII |
| ABREVIATURAS | XI |
| SIMBOLOGÍA | XII |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XIX |
| ÍNDICE DE MAPAS | XXI |
| ÍNDICE DE ECUACIONES | XXII |
| ÍNDICE DE FOTOS | XXIII |
| INTRODUCCIÓN..... | XXV |
| 1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO..... | 1 |
| 1.1. Justificación | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 2 |
| 2. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE | 4 |
| 2.1. Cartografía y Topografía..... | 4 |

| | |
|---|-----|
| 2.2. Geología y sismicidad..... | 19 |
| 2.3. Hidrología | 34 |
| 2.4. Geohidrología | 36 |
| 2.5. Geotecnia | 39 |
| 3. ANÁLISIS TEÓRICO DEL FLUJO EN MEDIOS POROSOS Y FRACTURADOS APLICADO A LADERAS Y TALUDES. | 60 |
| 3.1. Hidráulica de Suelos..... | 60 |
| 3.2. Hidráulica de Rocas..... | 67 |
| 4. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE DESESTABILIZACIÓN RELACIONADOS AL AGUA. | 77 |
| 4.1. Deslizamientos | 77 |
| 4.2. Erosión | 84 |
| 4.3. Procesos de desestabilización mixtos | 87 |
| 5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD E INCIDENCIA DEL AGUA EN EL FACTOR DE SEGURIDAD | 89 |
| 5.1. Rocas fracturadas..... | 89 |
| 5.2. Rocas meteorizadas..... | 97 |
| 5.3. Suelos residuales y coluviales | 98 |
| 6. SOLUCIONES GEOTÉCNICAS PARA CONTROLAR LOS EFECTOS DEL AGUA | 100 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6.1. | Soluciones de drenaje superficial | 100 |
| 6.2. | Soluciones de drenaje sub superficial y subterráneo..... | 107 |
| 6.3. | Soluciones de mitigación en infraestructura construida..... | 109 |
| 7. | ESTUDIOS DE CASOS. | 114 |
| 7.1. | Deslizamientos en suelos y rocas muy meteorizadas | 114 |
| 7.2. | Deslizamientos en taludes con rocas fracturas..... | 132 |
| 7.3. | Deslizamiento por causas antrópicas predominantes..... | 138 |
| 8. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 149 |
| 8.1. | CONCLUSIONES..... | 149 |
| 8.2. | RECOMENDACIONES..... | 152 |

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| FICT | Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra |
| FS | Factor de seguridad |
| GPS | Sistema de posicionamiento global |
| HDPE | High density Polyethylene |
| IGM | Instituto geográfico militar |
| INAHMI | Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología |
| INOCAR | Instituto Oceanográfico de la Armada |
| NEC | Norma Ecuatoriana de la Construcción |
| NF | Nivel freático |
| NL | Número de Lane |
| MKS | Metro kilogramo y segundos |
| RQD | Rock quality designation |
| SS | Sensu Strictu |
| SU | Undrained Shear Strength |
| USLE | Universal soil loss equation |
| UU | Undrained and unconsolidated |

SIMBOLOGÍA

| | |
|--------------------|-------------------------------------|
| ° | Grado sexagesimal |
| °C | Grado centígrado |
| cm | Centímetro |
| cm ² | Centímetro cubico |
| cm ³ | Centímetro cubico |
| g | Gramo |
| kg | Kilogramo |
| kg/cm ² | Kilogramo/ centímetro cuadrado |
| KN/m ² | Kilo Newton/ metro cuadrado |
| KN/m ³ | Kilo Newton/metro cúbico |
| m | Metro |
| m ² | metro cuadrado |
| m ³ | Metro cúbico |
| MJ/ha/mm/año | Mega Joule/hectárea/milímetro/año |
| Ton | Tonelada |
| Ton/m ³ | Tonelada/ metro cúbico |
| Ton/ha/año | Tonelada/hectárea/año |
| M _{pa} | Mega Pascal (Newton/metro cuadrado) |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Emplazamiento de los sitios de estudio A, B y C en el Cerro El Carmen..... | 6 |
| Figura 2.2 Levantamiento topográfico del sitio A, y ubicación de los tres perfiles típicos realizados. [70] | 7 |
| Figura 2.3 Perfiles topográficos del sitio A. [70]..... | 8 |
| Figura 2.4 Topografía del sitio B. [70]..... | 9 |
| Figura 2.5 Perfiles topográficos del sitio B. [70]..... | 10 |
| Figura 2.6 Topografía del sitio C y Perfiles. [70]..... | 11 |
| Figura 2.7 Ubicación del área de deslizamiento Cerro Azul en una foto satelital. | 12 |
| Figura 2.8 Topografía del sitio de deslizamiento en el Cerro Azul, ubicación de los perfiles longitudinales. [31] | 13 |
| Figura 2.9 Perfiles 1, 2, 3 y 4 en el sitio de deslizamiento en el Cerro Azul. [31] | 14 |
| Figura 2.10 Perfiles 5, 6, 7 y 8 en el sitio de deslizamiento en el Cerro Azul. [31] | 15 |
| Figura 2.11 Fotografía Satelital del sitio de estudio en Bastión Popular. | 16 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.12 Sector de Bastión Popular, con la ubicación del Perfil Longitudinal A-B. | 17 |
| Figura 2.13 Perfil transversal C-D. | 18 |
| Figura 2.14 Perfil longitudinal de talud en la Ferroviaria..... | 19 |
| Figura 2.15 Simbología del Mapa de Formaciones geológicas en la ciudad de Guayaquil. [10] | 32 |
| Figura 2.16 Modelo I propuesto por Hoek y Bray. [37] | 44 |
| Figura 2.17 Modelo II propuesto por Hoek y Bray. [37] | 45 |
| Figura 2.18 Red estereográfica en donde se han graficado tres planos (líneas curvas que señalan el buzamiento) correspondientes a tres discontinuidades..... | 48 |
| Figura 2.19 Zonas de meteorización en una ladera según Goodman. [34] | 52 |
| Figura 2.20 Variaciones del nivel freático en función de la cantidad de lluvias. | 55 |
| Figura 3.1 Experimento que muestra el flujo que ocurre en el conducto de arena, de A hasta B, debido a la diferencia de carga que poseen. | 61 |
| Figura 3.2 Líneas de corriente o de flujo y líneas equipotenciales formando una red de flujo en una ladera. La primera línea de flujo es la de máxima saturación..... | 62 |
| Figura 3.3 Posibilidades de fracturas abiertas de superficies lisas y rugosas, en ciertos casos con relleno. Se destaca como parámetro el espesor de las fracturas. [2] | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.4 Familia de fracturas no continuas, de espesor variable, que se encuentran incluidas en la matriz rocosa delimitada por la línea violácea. [2] | 70 |
| Figura 3.5 Parámetros hidráulicos de un macizo rocoso, fractura de una familia K_i , K_f Conductividad hidráulica de una fractura, K Conductividad hidráulica de una familia de fracturas. [13] | 71 |
| Figura 4.1 Escala de velocidad de movimientos en masa. [64] | 79 |
| Figura 4.2 Deslizamiento tipo flujo. [64]..... | 81 |
| Figura 4.3 Elementos y partes de un deslizamiento. [64] | 83 |
| Figura 4.4 Explicación esquemática de los procesos erosivos debidos a la acción del agua. [20] | 85 |
| Figura 4.5 Secciones típicas del proceso de erosión superficial profunda, con pendiente abajo, colapsos laterales, acumulación de materiales y posterior alud..... | 88 |
| Figura 5.1 El deslizamiento ocurre en estas condiciones: $\Psi_f > \psi_p > \phi$ [3]. | 91 |
| Figura 5.2 Discontinuidades que intervienen en un deslizamiento plano. [3] [57] | 91 |
| Figura 5.3 Deslizamiento por cuñas. [57] | 92 |
| Figura 5.4 Deslizamiento de paquetes de estratos. [64]..... | 93 |
| Figura 5.5 Deslizamiento en bloques del macizo rocoso. [64]..... | 94 |
| Figura 5.6 Deslizamientos rotacionales en diferentes condiciones. (64) | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.7 Caída de bloques de roca. [64] | 97 |
| Figura 5.8 Cuerpo de suelos coluviales y su desestabilización mediante un corte para construir una vía..... | 99 |
| Figura 6.1 Solución de desvío de drenaje que ingresa a un área afectada. | 102 |
| Figura 6.2 Solución para conducir el agua en laderas reduciendo la energía y por tanto sin generar erosión. [22] | 104 |
| Figura 6.3 Solución para caída de bloques. La trinchera también puede incluir arcilla en el fondo para amortiguar la energía que traen los bloques. [50] | 107 |
| Figura 6.4 Dren de zanja dotado de geotextil como filtro. | 108 |
| Figura 6.5 Acción del agua en un relleno sin compactar y efecto en la infraestructura..... | 111 |
| Figura 6.6 Diseño de una pantalla de intersección de flujo. | 113 |
| Figura 7.1 Planta topográfica con la ubicación de varios perfiles en el sentido del deslizamiento. [31] | 117 |
| Figura 7.2 Topografía del Cerro Azul antes de la construcción de la vía Perimetral. Consta la ubicación del Perfil S-6. [31]..... | 118 |
| Figura 7.3 Información geológica y geotécnica del Cerro Azul. [31].... | 119 |
| Figura 7.4 Perfil geotécnico que incluye el perfil natural del terreno, el perfil de meteorización, la estratificación de la Formación Cayo y la ubicación de las fracturas tectónicas..... | 120 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.5 Procedimiento seguido para graficar los planos de discontinuidades, respecto a la orientación del perfil topográfico de la ladera. | 122 |
| Figura 7.6 Determinación de la probable superficie de ruptura (trazos rojos) entre la estratificación y las fracturas de la familia F1 (NF son trazos azules)..... | 123 |
| Figura 7.7 Determinación de las cargas hidrostáticas referidas a la posición del nivel freático y al camino recorrido. | 124 |
| Figura 7.8 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31]. | 131 |
| Figura 7.9 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31]. | 131 |
| Figura 7.10 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31]. | 132 |
| Figura 7.11 Planos de las discontinuidades F1, F2, F3, la estratificación y el talud en análisis..... | 133 |
| Figura 7.12 Intersección de las discontinuidades F2 y F3..... | 134 |
| Figura 7.13 Perfil típico del Cerro Del Carmen incluyendo los planos de estratificación y la intersección de las fracturas F2 y F3, además la fractura F1 que corta a aquellas 2. | 135 |
| Figura 7.14 Cuñas que se forman debido a la intersección de las fracturas F2 y F3 y las fracturas F1 | 136 |
| Figura 7.15 Vista esquemática, en tres dimensiones, de un relleno en una ladera | 139 |
| Figura 7.16 Ladera rellena sobre una hondonada natural, en con materiales producto de excavaciones. En la superficie existen numerosas viviendas. | 139 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.17 Perfil transversal en la hondonada rellena. En la superficie existen numerosas viviendas. | 140 |
| Figura 7.18 Corrida #1 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular". | 144 |
| Figura 7.19 Corrida #2 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular". | 145 |
| Figura 7.20 Corrida #3 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular". | 146 |
| Figura 7.21 Corrida #4 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular". | 147 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla I Parámetros para estudiarlas discontinuidades. [41]..... | 50 |
| Tabla II Escala de grados de meteorización. [41] | 53 |
| Tabla III Determinación de los pesos volumétricos de las rocas del Cerro Del Carmen. [56] | 57 |
| Tabla IV Determinación de las propiedades geomecánicas de rocas del Cerro Del Carmen. [56] | 58 |
| Tabla V Determinación de las características de las discontinuidades del macizo rocoso del Cerro Del Carmen. [56]..... | 59 |
| Tabla VI Coeficiente de recorrido en diferentes tipos de suelo. [48] | 65 |
| Tabla VII Clasificación de los movimientos en masa en función de la velocidad del movimiento. [64] | 80 |
| Tabla VIII Valoración de la erosión. [69] | 87 |
| Tabla IX Parámetros geotécnicos de cerro Azul..... | 125 |
| Tabla X Corrida #1 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana..... | 126 |
| Tabla XI Corrida #2 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana..... | 128 |

Tabla XII Corrida #3 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana. 129

Tabla XIII Parámetros recopilados de suelos y rocas de Guayaquil [31] [56] [29]. 141

Tabla XIV Variación porcentual del factor de seguridad de las 3 primeras corridas en comparación a la corrida #4. 148

ÍNDICE DE MAPAS

| | |
|--|----|
| Mapa I Mapa de Formaciones geológicas en la ciudad de Guayaquil. [10] | 31 |
| Mapa II Mapa de la zonificación sísmica del Ecuador. [68]..... | 34 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|---------------------|-----|
| (Ecuación 1)..... | 63 |
| (Ecuación 2) | 64 |
| (Ecuación 3) | 64 |
| (Ecuación 4) | 64 |
| (Ecuación 5)..... | 65 |
| (Ecuación 6)..... | 70 |
| (Ecuación 7) | 72 |
| (Ecuación 8)..... | 72 |
| (Ecuación 9)..... | 73 |
| (Ecuación 10)..... | 74 |
| (Ecuación 11)..... | 74 |
| (Ecuación 12)..... | 75 |
| (Ecuación 13)..... | 75 |
| (Ecuación 14)..... | 75 |
| (Ecuación 15)..... | 75 |
| (Ecuación 16)..... | 76 |
| (Ecuación 17)..... | 86 |
| (Ecuación 18) | 125 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|--|----|
| Foto 1 Micropliegues de la Formación Guayaquil Chert..... | 23 |
| Foto 2 Estratos de la Formación Guayaquil Chert..... | 23 |
| Foto 3 Estratos de la formación Guayaquil Chert en el lado Norte del Cerro El Carmen. | 24 |
| Foto 4 Estratos plegados de la formación Guayaquil Chert en el lado Norte del Cerro El Carmen..... | 24 |
| Foto 5 Estratos de la formación Guayaquil Chert en la parte alta, en la parte inferior se tiene el contacto con la Formación Cayo SS, en el lado Norte del Cerro El Carmen. | 25 |
| Foto 6 Deslizamiento del cerro Azul..... | 26 |
| Foto 7 Deslizamiento del cerro Azul en 1998. Afectación a la vía Perimetral [31] | 26 |
| Foto 8 Deslizamiento al pie de la vía Perimetral que está construida sobre el depósito aluvial..... | 27 |
| Foto 9 Estratos rocosos de Chert en la Ferroviaria. | 29 |
| Foto 10 Estratos rocosos de Chert en la Ferroviaria, nótese la proximidad de las viviendas..... | 29 |

| | |
|--|-----|
| Foto 11 Deslizamientos planos en los estratos rocosos, sector la Ferroviaria. | 30 |
| Foto 12 Deslizamiento de la capa meteorizada ocurrida en el sector Bastión Popular. | 98 |
| Foto 13 Control de la erosión de materiales finos sobre una calzada. . | 103 |
| Foto 14 Estabilización de un talud donde se habían caído grandes bloque de roca. | 105 |
| Foto 15 Corte de un talud de 80° y estabilización mediante bulones anclados, malla electro soldada, drenes filtro y una capa de hormigón proyectado..... | 106 |
| Foto 16 Geomanto para controlar la caída de fragmentos de roca meteorizada..... | 106 |
| Foto 17 Canal con sistema de retención del agua sedimentos y reducción de la energía. | 109 |

INTRODUCCIÓN

Se ha podido constatar que el agua, proveniente de las precipitaciones, tiene una incidencia directa en la estabilidad de diferentes tipos de terreno, en especial cuando se trata de laderas afectadas por la deforestación y también en el caso de taludes producto de acciones antrópicas, tales como excavaciones y rellenos para construir obras o para explotar materiales pétreos.

Precipitaciones como las que ocurren durante el fenómeno de El Niño u otras situaciones meteorológicas fuera de las condiciones normales, causan un verdadero impacto, tanto en el sub suelo como en la superficie, en este último caso se presentan los procesos erosivos [20].

Para analizar la incidencia del agua cuando fluye interna y externamente en los macizos rocosos, depósitos de suelo y en rellenos, existen dos alternativas para el análisis del flujo de agua que son: la primera, los flujos en medios porosos y la segunda en medios fracturados.

Existen también algunas variantes en los análisis, lo que depende de las características y el comportamiento tanto de los suelos como de las masas de rocas en sus diferentes condiciones naturales [28].

El estudio de la acción de las lluvias tiene una muy significativa importancia para el adecuado manejo de las obras de ingeniería y en particular, dada la incidencia social, en los proyectos de infraestructura urbana.

CAPÍTULO 1

1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1. Justificación

Existen suficientes evidencias como para deducir que el agua, en diferentes acciones provoca problemas de inestabilidad en taludes y laderas que son parte integrante o relacionado a diferentes obras de ingeniería.

Durante los fenómenos de El Niño se tienen los mayores efectos de la acción de las aguas lluvias ya que causan daños y afectaciones que pueden ser de gran incidencia en todos los niveles socio-económicos [43 y 48].

Es indudablemente interesante realizar una descripción, cuantificación y valoración de la acción del agua en los medios naturales y en los generados por el desarrollo urbano que incluye una gran cantidad de obras de infraestructura.

1.2.Objetivos

Objetivo principal.-

La investigación que se propone tiene como objetivo fundamental describir, evaluar y cuantificar la acción negativa del agua en diferentes condiciones, situaciones y mecanismos de desestabilización, relacionados a casos reales, para al mismo tiempo visualizar soluciones prácticas.

Objetivos específicos.-

1. Estudiar y analizar los parámetros meteorológicos más importantes e incidentes en la estabilidad de taludes.
2. Analizar las condiciones geológicas.
3. Analizar y valorar la acción del flujo de las aguas subterráneas y del nivel freático.
4. Analizar y cuantificar los parámetros geotécnicos más relevantes.
5. Analizar los efectos y cuantificar la acción de la sismicidad.
6. Determinar los efectos negativos más importantes de las precipitaciones en la estabilidad de taludes.
7. Describir y analizar soluciones preventivas, constructivas y post constructivas.

CAPÍTULO 2

2. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

2.1. Cartografía y Topografía

La presente investigación se realizó en la ciudad de Guayaquil, la de mayor población urbana del territorio ecuatoriano. Existe abundante información fotográfica y cartográfica la cual se encuentra en fotografías y planos del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escalas 1:50.000 y 1:25000. La M.I. Municipalidad de Guayaquil también encomendó al IGM para la realización de planos de restitución aéreo fotogramétrica mediante controles en hitos con coordenadas y cotas reales, con lo que se obtuvo topografía 1:5000.

Para la realización de los proyectos de túneles de los cerros El Carmen y Santa Ana, por parte de la ESPOL, también se efectuó la topografía de campo con la que se obtuvieron planos a escalas 1:000 y 1:500.

En otros proyectos como los estudios y diseños para estabilizar el deslizamiento en el Cerro Azul, [31] efectuados por la ESPOL, también se generaron levantamientos topográficos con mayores detalles. Se han realizado levantamientos topográficos en el sector norte de la ciudad donde existen asentamientos urbanos, algunos de ellos sin una previa planificación.

Con la ayuda del software Google Earth, se han ubicado los tres sectores investigados, señalando en ellos los sitios concretamente estudiados.

Cerro El Carmen.- se muestran tres marcas de los sitios donde se desarrollan los correspondientes análisis (Figura 2.1).

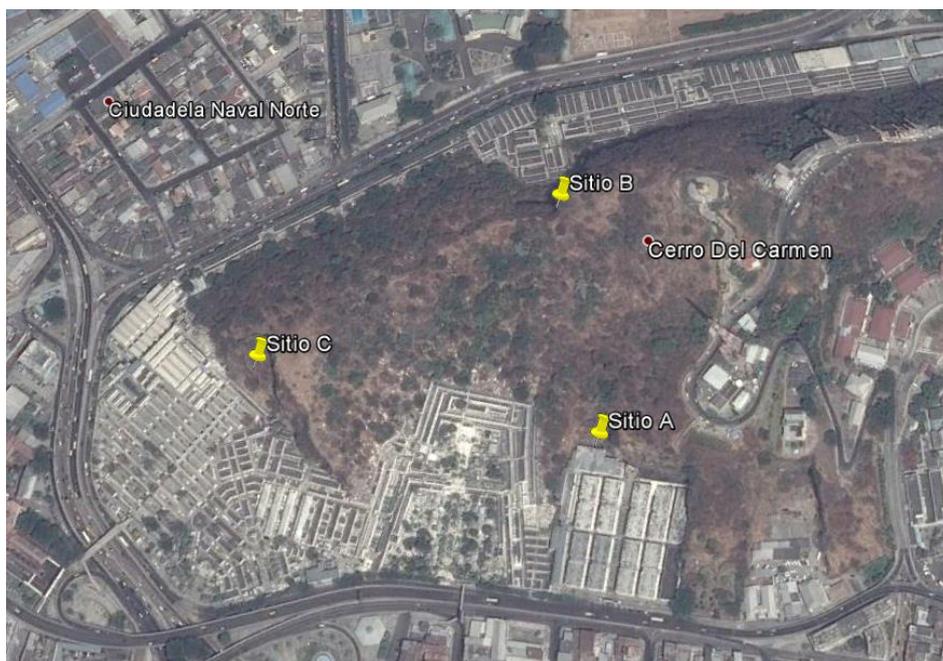


Figura 2.1 Emplazamiento de los sitios de estudio A, B y C en el Cerro El Carmen.
Fuente: Software Google Earth

Levantamiento Topográfico y Perfiles en los taludes.-

A continuación se presentan tanto el levantamiento, como los perfiles realizados (Figuras 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6) en los sitios A, B y C, que son fácilmente identificados:

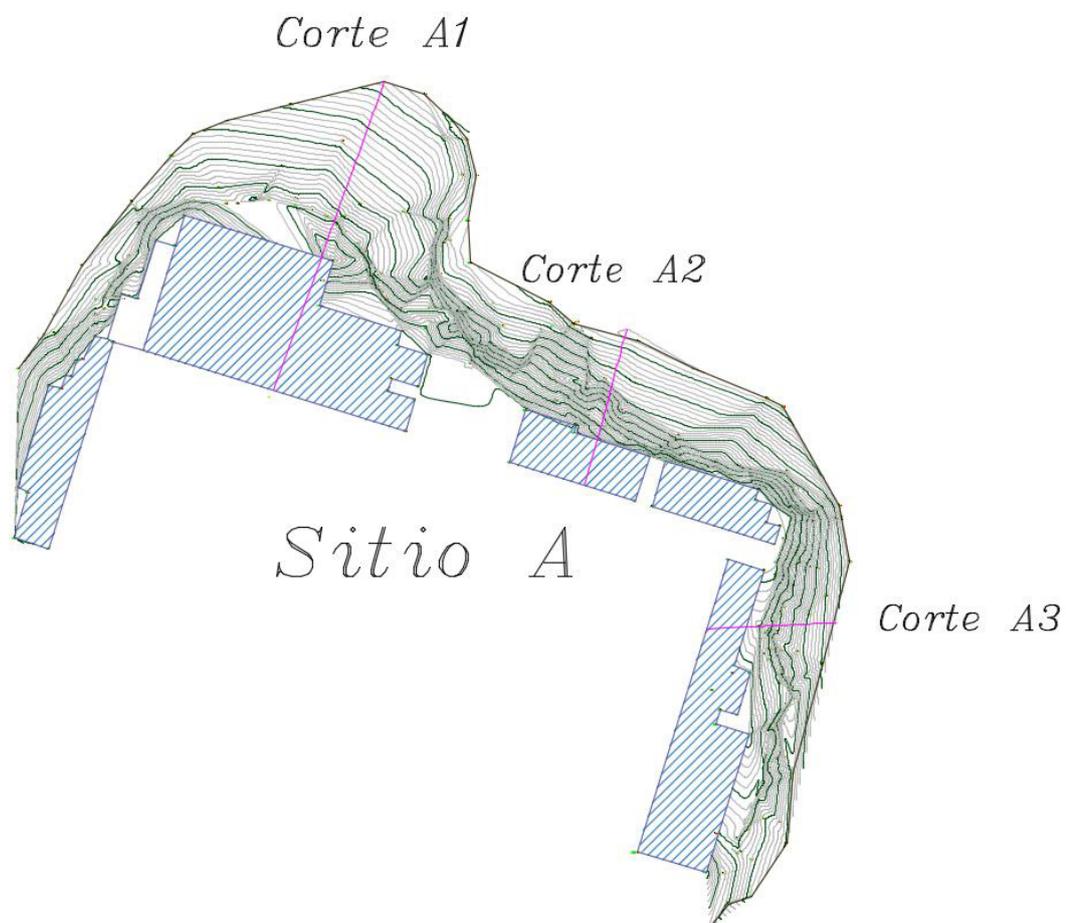


Figura 2.2 Levantamiento topográfico del sitio A, y ubicación de los tres perfiles típicos realizados. [70]

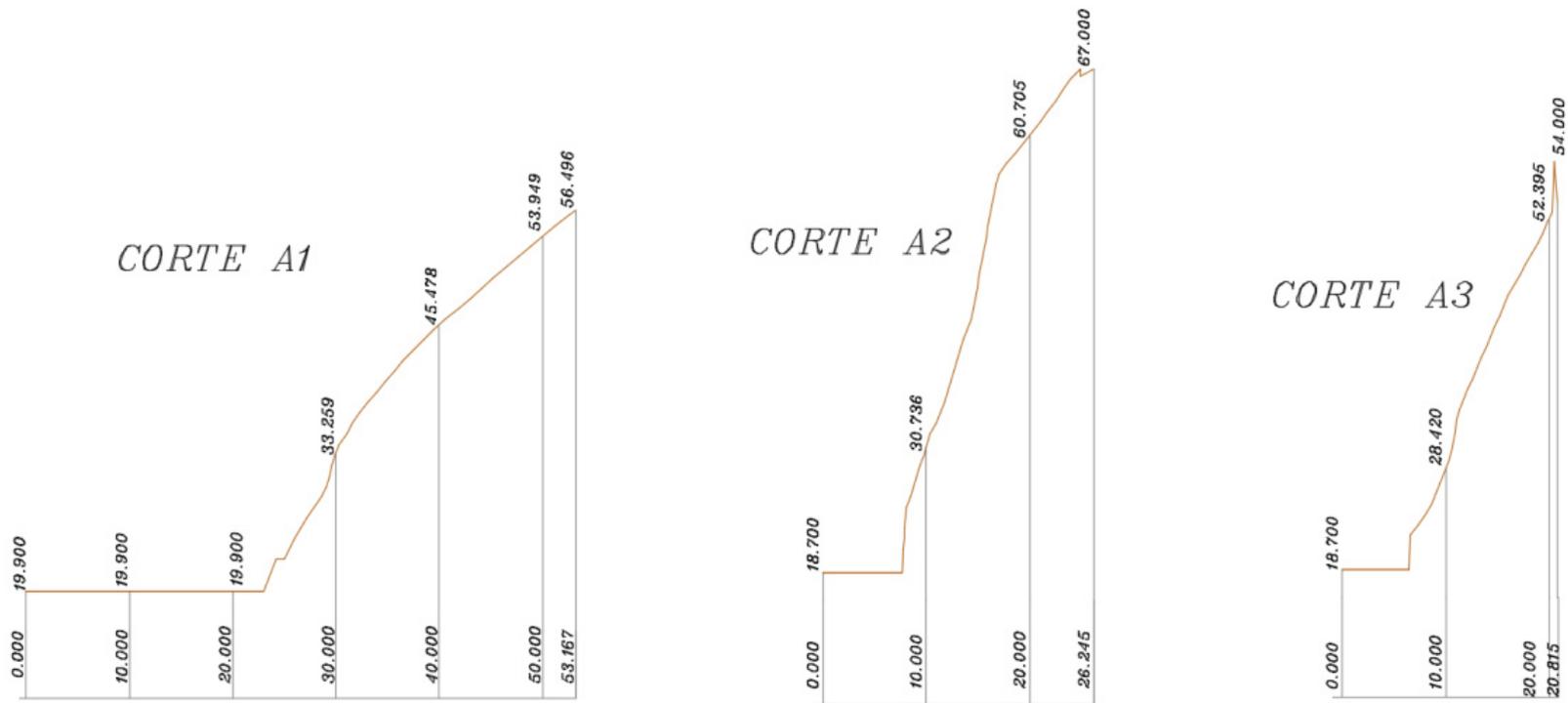


Figura 2.3 Perfiles topográficos del sitio A. [70]

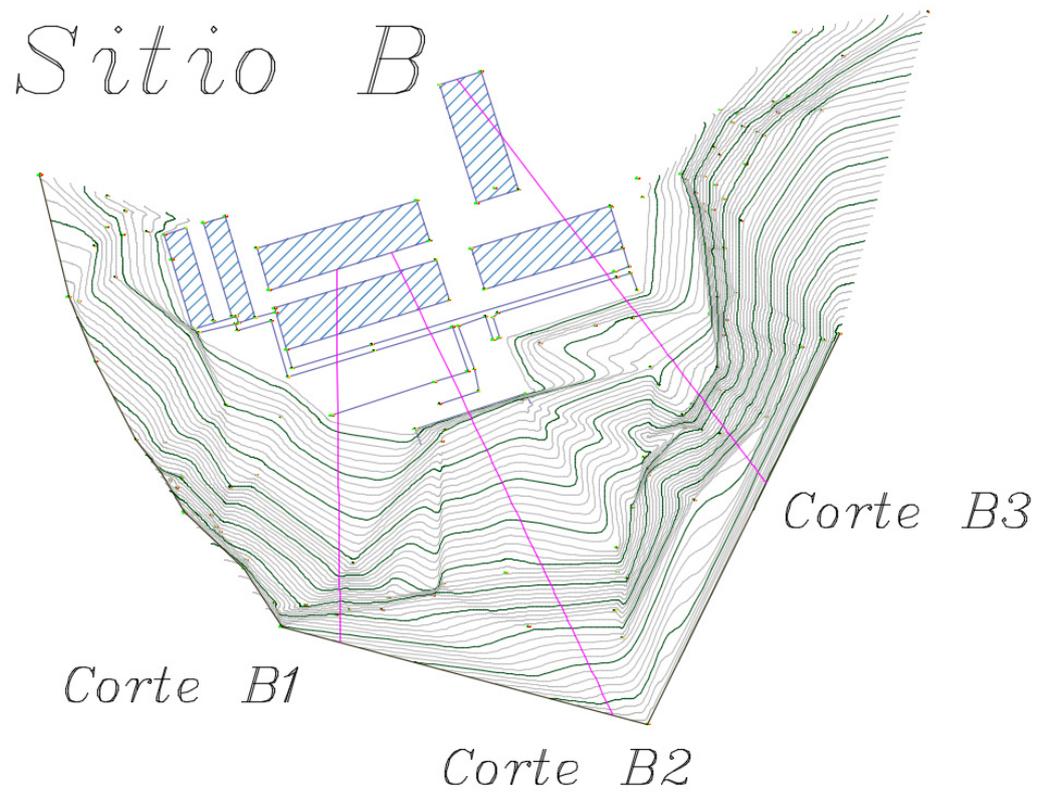


Figura 2.4 Topografía del sitio B. [70]

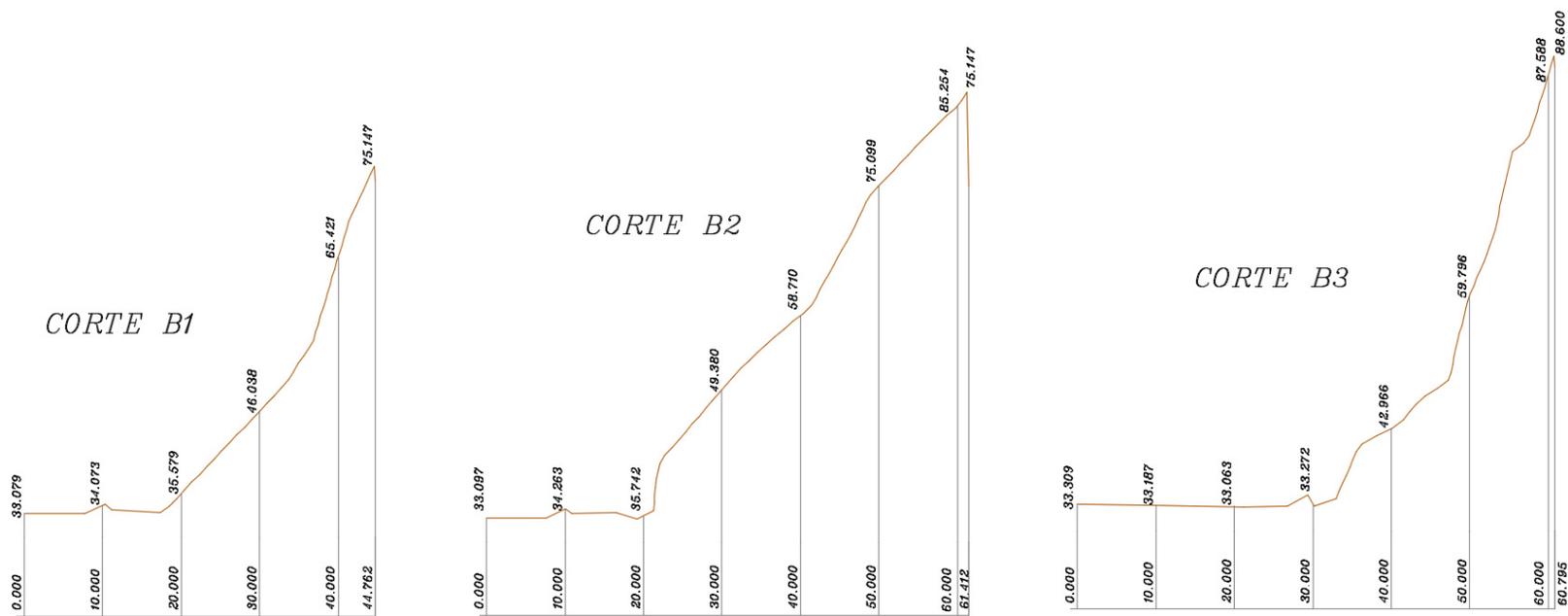


Figura 2.5 Perfiles topográficos del sitio B. [70]

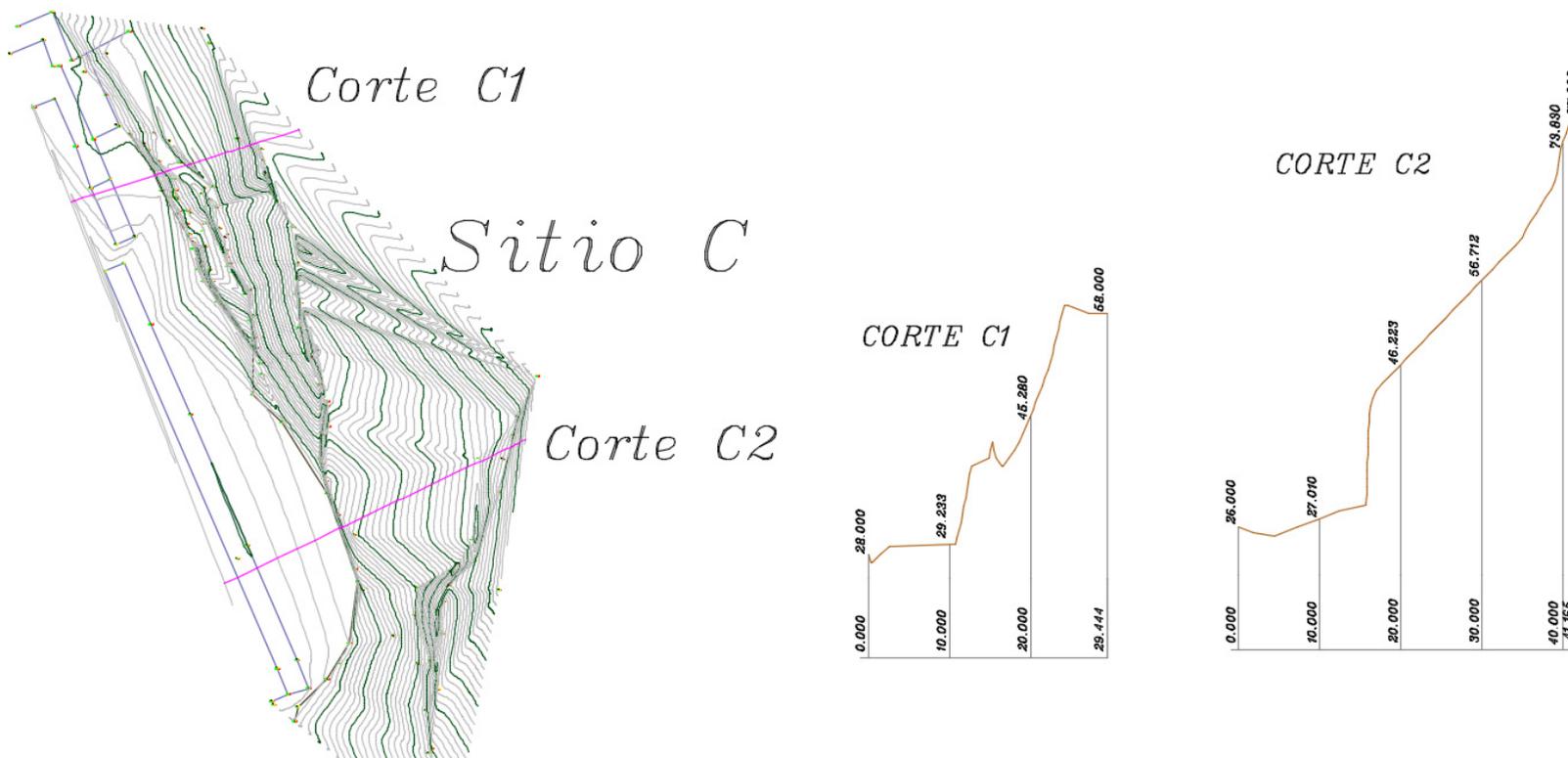


Figura 2.6 Topografía del sitio C y Perfiles. [70]

Cerro Azul.- El sitio de interés constituye el sector de mayor altitud, donde ocurrió el más grande deslizamiento dado en el área urbana de la ciudad de Guayaquil, teniendo como cercanías a la avenida Perimetral, el centro comercial “Riocentro Ceibos” y además la urbanización Los Parques. Por medio del software Google Earth (Figura 2.7), se ubica el sitio de estudios y los lugares adyacentes vinculados al caso.

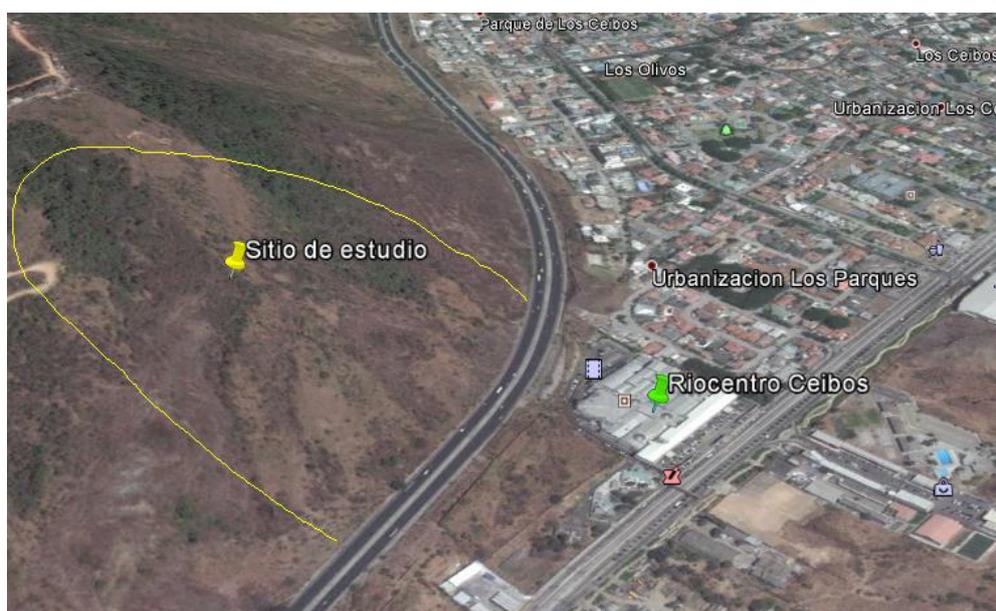


Figura 2.7 Ubicación del área de deslizamiento Cerro Azul en una foto satelital.
Fuente: Google Earth

A continuación se representara (Figura 2.8) el plano del levantamiento topográfico del área que incluye el deslizamiento. Se muestran 8 perfiles topográficos levantados (Figuras 2.9 y 2.10), uno a uno, en el área afectada.

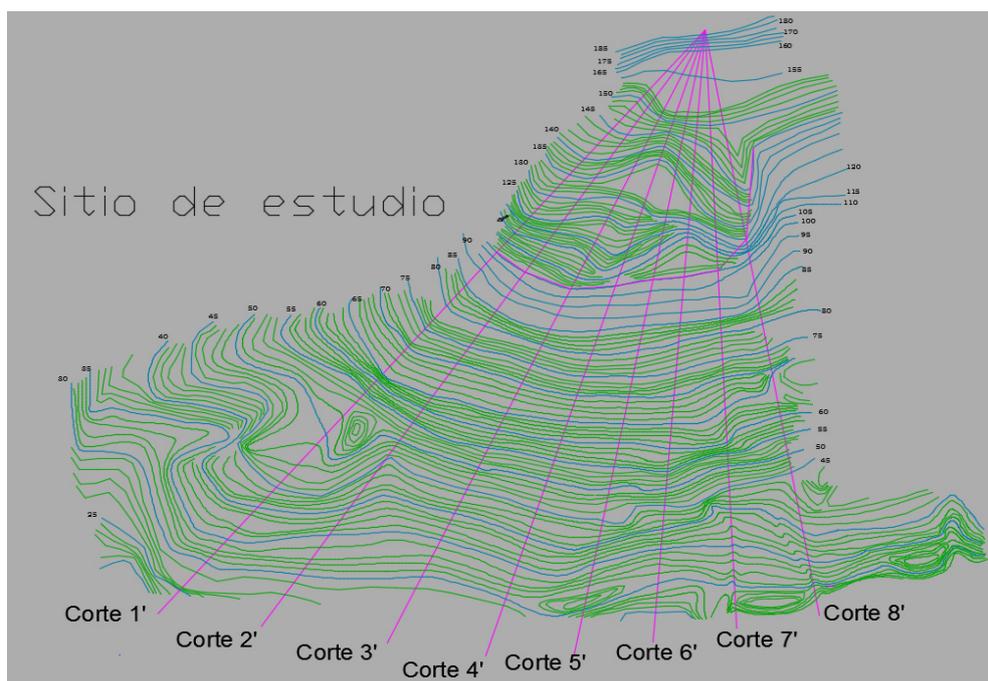


Figura 2.8 Topografía del sitio de deslizamiento en el Cerro Azul, ubicación de los perfiles longitudinales. [31]

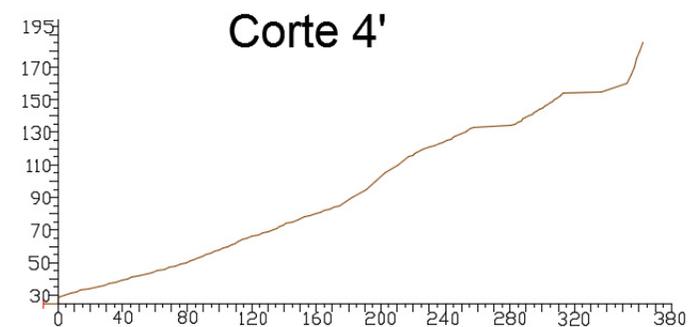
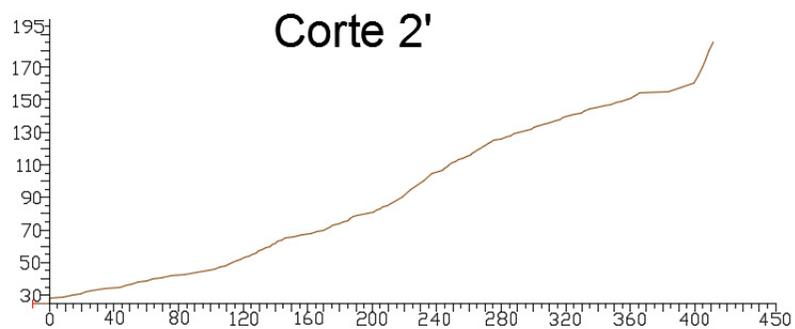
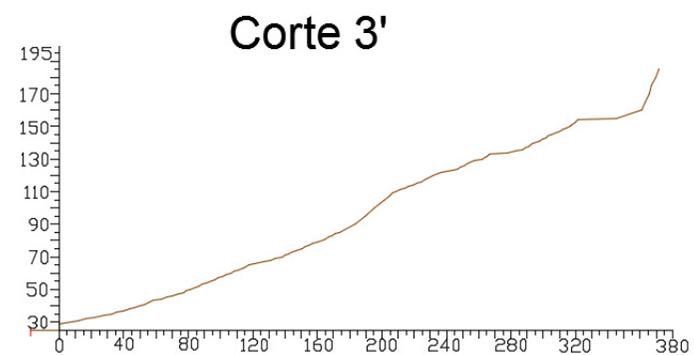
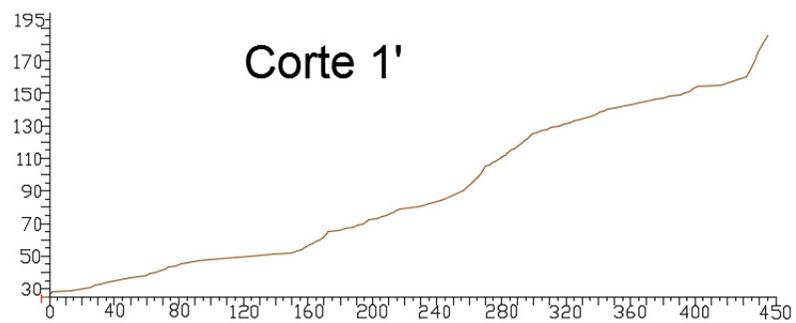


Figura 2.9 Perfiles 1, 2, 3 y 4 en el sitio de deslizamiento en el Cerro Azul. [31]

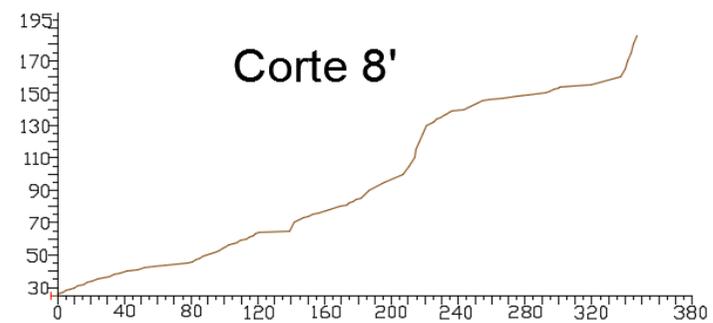
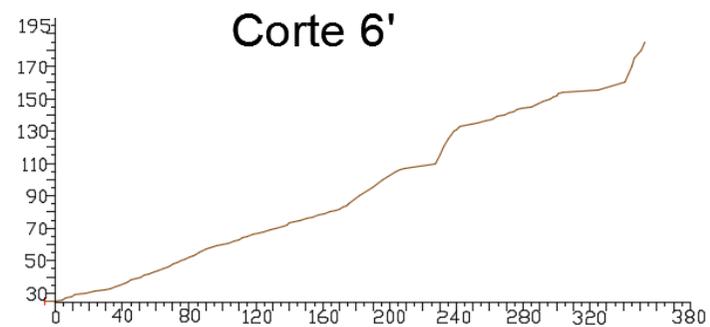
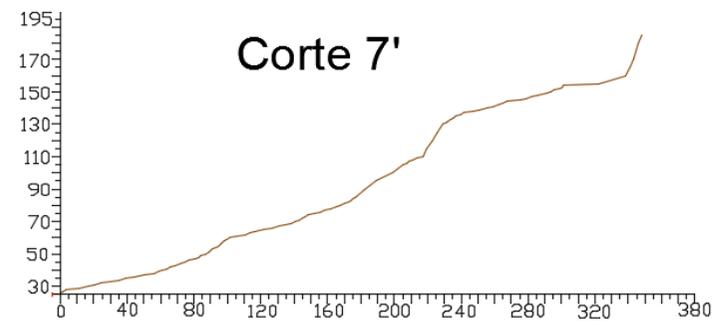
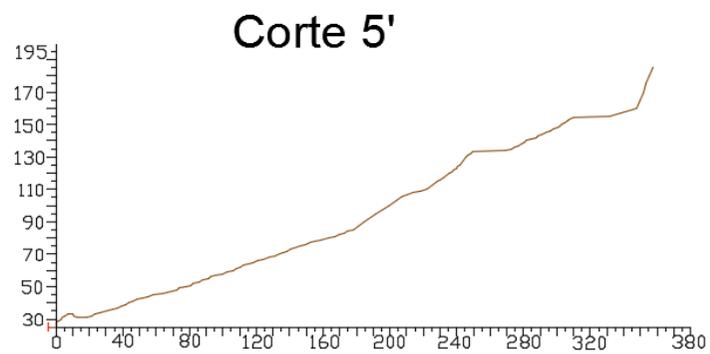


Figura 2.10 Perfiles 5, 6, 7 y 8 en el sitio de deslizamiento en el Cerro Azul. [31]

Bastión Popular.- En la fotografía satelital del software Google Earth (Figura 2.11) se presenta la ubicación general de área donde se han dado varios deslizamientos.

Con la finalidad de analizar unos de los casos más críticos, mediante la ayuda de un GPS Diferencial, se han efectuado dos perfiles topográficos. Se presenta el perfil longitudinal (Figura 2.12) cuyos puntos extremos tienen las siguientes coordenadas:

A ($X= 2^{\circ} 04' 52''$ $Y=79^{\circ} 55' 53''$); B ($X= 2^{\circ} 05' 25''$ $Y=79^{\circ} 55' 45''$)



Figura 2.11 Fotografía Satelital del sitio de estudio en Bastión Popular.
Fuente: Google Earth.

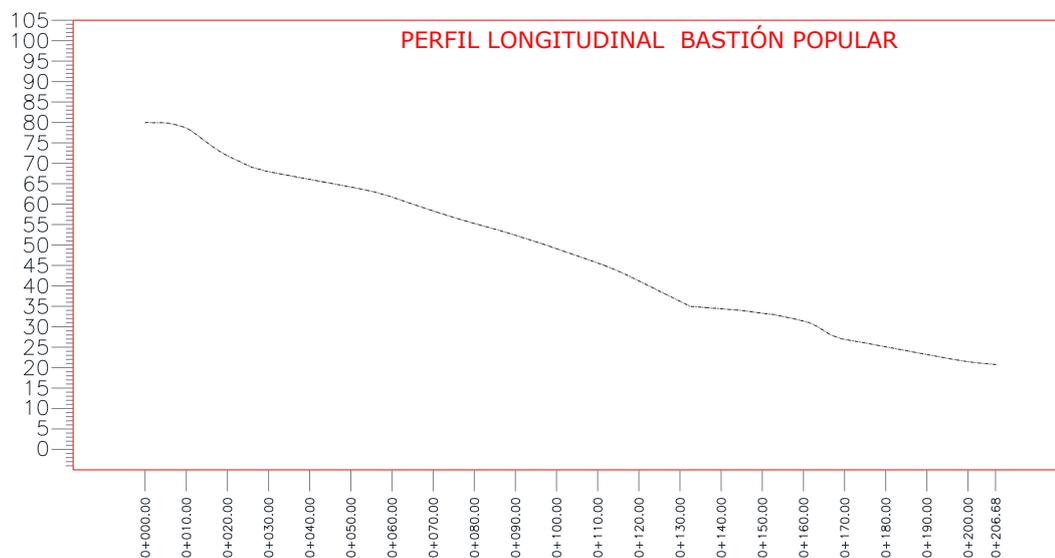


Figura 2.12 Sector de Bastión Popular, con la ubicación del Perfil Longitudinal A-B.
Fuente: propiedad del autor de la tesis

Se presenta el perfil transversal (Figura 2.13) que tiene las coordenadas:

$$C \quad (X= 2^{\circ} 04' 57'' \quad Y=2^{\circ} 04' 54'')$$

$$D \quad (X= 2^{\circ} 04' 54'' \quad Y= 79^{\circ} 55' 43'')$$

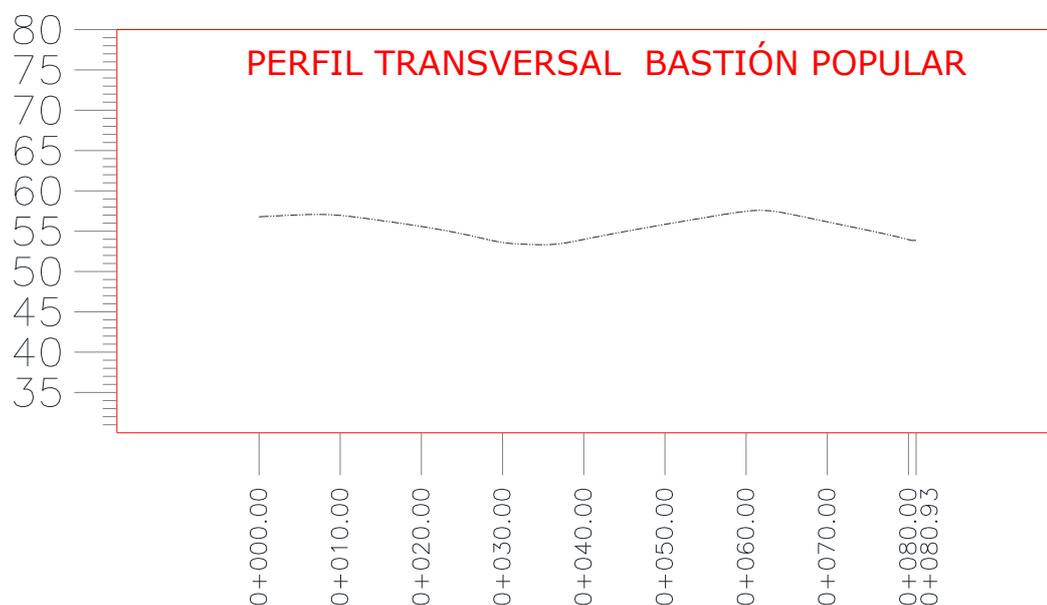


Figura 2.13 Perfil transversal C-D.
Fuente: propiedad del autor de la tesis

Colinas de la Ferroviaria.-Los taludes y laderas que actualmente se aprecian son bien empinados, por lo que es muy difícil presentar un plano con curvas de nivel que caractericen estos taludes. Por esta razón, mediante una estación total que utiliza el rebote de señales laser, se efectuó el levantamiento topográfico del talud típico. (Figura 2.14).

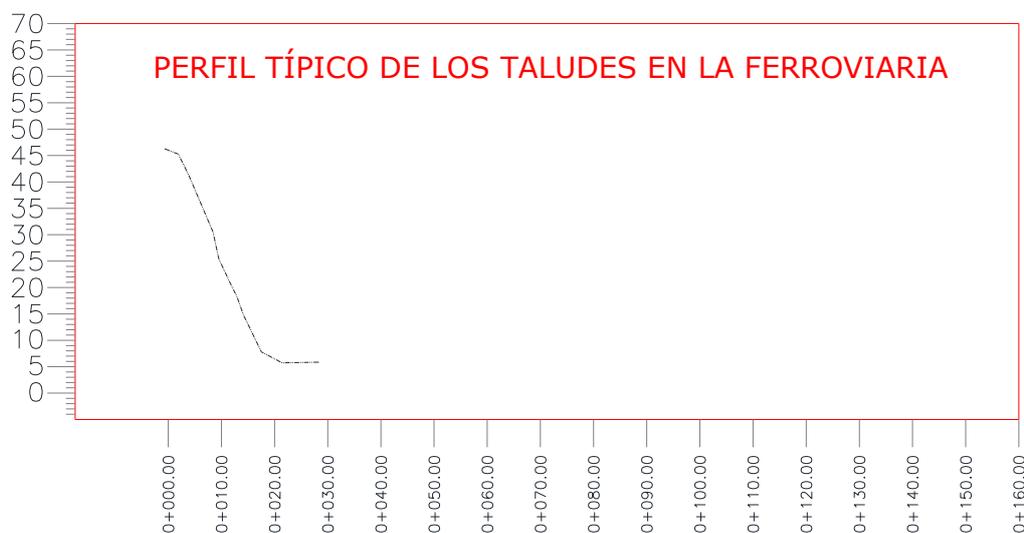


Figura 2.14 Perfil longitudinal de talud en la Ferroviaria.

Fuente: propiedad del autor de la tesis

2.2. Geología y sismicidad

Dentro del punto de vista geológico en la ciudad de Guayaquil, se tienen tres dominios geomorfológicos que son los siguientes [53] (Mapa I):

Planicie Aluvial depositada desde el pasado geológico por los ríos actualmente denominados Daule y Babahoyo,

El complejo Deltaico-Estuarino del Río Guayas y los esteros salados

La Cordillera Chongón-Colonche que realmente se inicia en la población de Durán dirigiéndose en dirección Sur Este Noroeste

En la ciudad de Guayaquil se tienen varias elevaciones de alturas variables entre 100 y 400m, que tienen los siguientes nombres: Santa Ana, El Carmen, San Pedro, Bellavista, Cerro Blanco, Prosperina, Cerro Azul, entre otros en la parte Norte de la ciudad, siendo el último mencionado el más alto.

En los sectores altos donde se ha desarrollado y se sigue desarrollando la ciudad de Guayaquil, se tienen las siguientes formaciones geológicas [53]:

En el sector Norte las formaciones Piñón y Cayo, en el Sur la misma Formación Cayo y Guayaquil Chert, en el sector Este, también la Formación Cayo. Por el sector Este se tiene las formaciones Cayo y Guayaquil Chert, además San Eduardo, Las Masas y Ancón.

Cabe destacar que en la parte final de todas las laderas se tienen depósitos coluviales de diferentes características y dimensiones.

Las investigaciones para esta tesis fueron realizadas exclusivamente en áreas en donde afloran las formaciones Cayo y Guayaquil Chert, por lo que se describen a continuación:

Formación Cayo.- Dicho conjunto está conformado por unos 3000 metros de estratos rocosos que son los más resistentes en la costa ecuatoriana. Dicho paquete de estratos está constituido por lutitas arcillosas, lutitas tobáceas, lutitas silicificadas; areniscas finas y de grano medio, areniscas grauvacas y brechas finas de material volcánico. La Formación Cayo, que es del Cretácico, descansa sobre la formación Piñón [53].

Por muchos años se ha considerado que la Formación Cayo se subdivide en los Miembros Cayo Sensu strictu y Cayo Calentura, siendo este último el de mayor edad ya que es subyacente.

En la actualidad hay geólogos que consideran que los miembros geológicos mencionados deben ser designados más bien como formaciones geológicas.

Formación Guayaquil Chert.- Esta formación geológica es supra yacente, es decir está sobre la Formación Cayo y tiene menor edad geológica [53].

Está conformada casi en su totalidad por lutitas, limonitas y los cherts, que son lutitas totalmente silicificadas de un color plomo oscuro característico cuando son poco meteorizadas, en muchos sectores son

plegadas, que se denominan “slumps”. Por ser las rocas de menor edad aparecen en las partes más altas del centro y Noroeste de la ciudad.

Geología de Cerro El Carmen.- En este cerro se encuentra el Cementerio General de la ciudad de Guayaquil, tiene una altura de hasta 100m y en décadas pasadas (hace más de 50 años) ha sido un sector de explotación de canteras para materiales de construcción, dejando en el lado su taludes de hasta 65m de altura, verticales. Esta situación ha permitido observar no solo los frentes rocosos expuestos sino también el comportamiento de dichos taludes frente al deterioro. [53]

En el lado Sur del Cerro se observa que desde la superficie hasta unos 25m de espesor aflora la Formación Guayaquil Chert, con sus estratos muy característicos por sus colores grises y cremas y por la presencia de micropliegues (Fotos 1 y 2). Bajo los estratos de la Formación mencionada se encuentra la Formación Cayo SS.



Foto 1 Microplegues de la Formación Guayaquil Chert
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

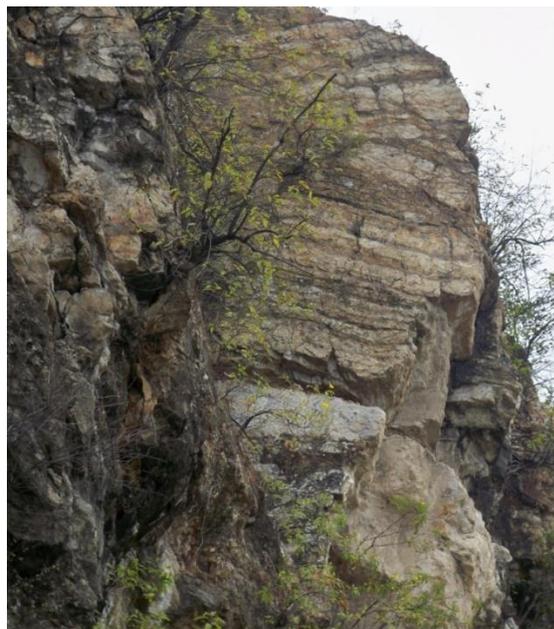


Foto 2 Estratos de la Formación Guayaquil Chert.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

En el lado Norte del Cerro donde también existe un Cementerio, se observa de igual manera la Formación Guayaquil Chert en un espesor de

20 a 25m, debajo de la cual se constata la Formación Cayo SS. (Fotos 3, 4 y 5)



Foto 3 Estratos de la formación Guayaquil Chert en el lado Norte del Cerro El Carmen.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis



Foto 4 Estratos plegados de la formación Guayaquil Chert en el lado Norte del Cerro El Carmen.

Fuente: propiedad del autor de l esta tesis



Foto 5 Estratos de la formación Guayaquil Chert en la parte alta, en la parte inferior se tiene el contacto con la Formación Cayo SS, en el lado Norte del Cerro El Carmen.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Geología de Cerro Azul.- Este cerro fluctúa entre 200-300m. En la parte más alta dotada de mucha vegetación se tiene la Formación Guayaquil Chert que está bastante meteorizada. Bajo aquella Formación se tiene Cayo SS, conformada por aglomerados, areniscas, limonitas y lutitas en estratos de variado espesor y sin seguir secuencias [53].

Entre la cota 60 y 20 se tiene un depósito coluvial producto de la erosión y posiblemente de deslizamientos antiguos. La vía Perimetral fue emplazada en este depósito coluvial. El deslizamiento que ocurrió en abril de 1998 fue desde la parte alta sobre la vía Perimetral. (Fotos 6, 7 y 8).



Foto 6 Deslizamiento del cerro Azul
Fuente: propiedad del autor de l esta tesis



Foto 7 Deslizamiento del cerro Azul en 1998. Afectación a la vía Perimetral [31]



Foto 8 Deslizamiento al pie de la vía Perimetral que está construida sobre el depósito aluvial.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Geología de Colinas de Bastión Popular.- Son un grupo de elevaciones que son las más bajas de la cordillera Chongón – Colonche, donde se encuentra exclusivamente la Formación Cayo SS en donde se tienen areniscas de grano grueso, areniscas de grano fino, limolitas y lutitas, bastante meteorizadas. En las partes naturales se aprecian hasta 2m de espesor de suelos residuales en lo cual existen capas de arcillas superficiales de hasta 30 cm de espesor. En las partes bajas de esas colinas se tienen también depósitos coluviales de diferentes dimensiones [53].

Se trata de varias elevaciones separadas por ondulaciones y pequeñas quebradas las cuales han sido rellenadas con la finalidad de conseguir áreas planas y construir urbanizaciones precarias.

En este sector se han reportado varios deslizamientos y procesos erosivos que han ocurrido durante el último fenómeno de El Niño (1998-1999) [47].

Geología de Colinas de la Ferroviaria.- Se trata de un lugar en donde se tiene el afloramiento más especial de la Formación Guayaquil Chert con estratos silíceos, bien definidos, que tienen un fuerte buzamiento, incluyendo pequeños pliegues [53].

Se observa que las fracturas tectónicas existentes (Fotos 9, 10 y 11) generan una evidente condición de inestabilidad que se ha acentuado gravemente por acciones antrópicas.



Foto 9 Estratos rocosos de Chert en la Ferroviaria.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis



Foto 10 Estratos rocosos de Chert en la Ferroviaria, nótase la proximidad de las viviendas.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

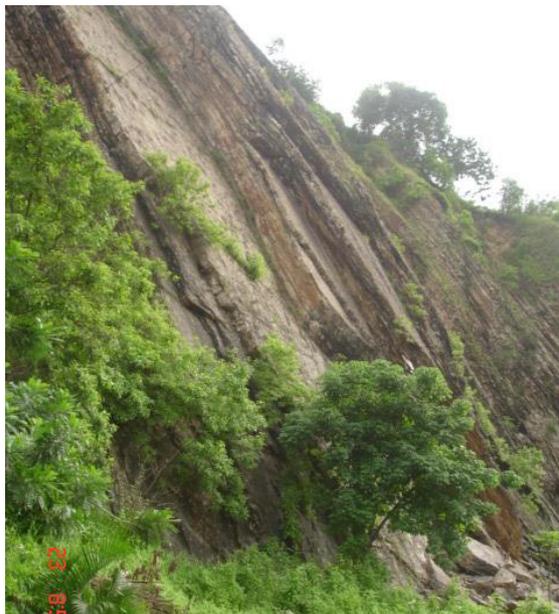
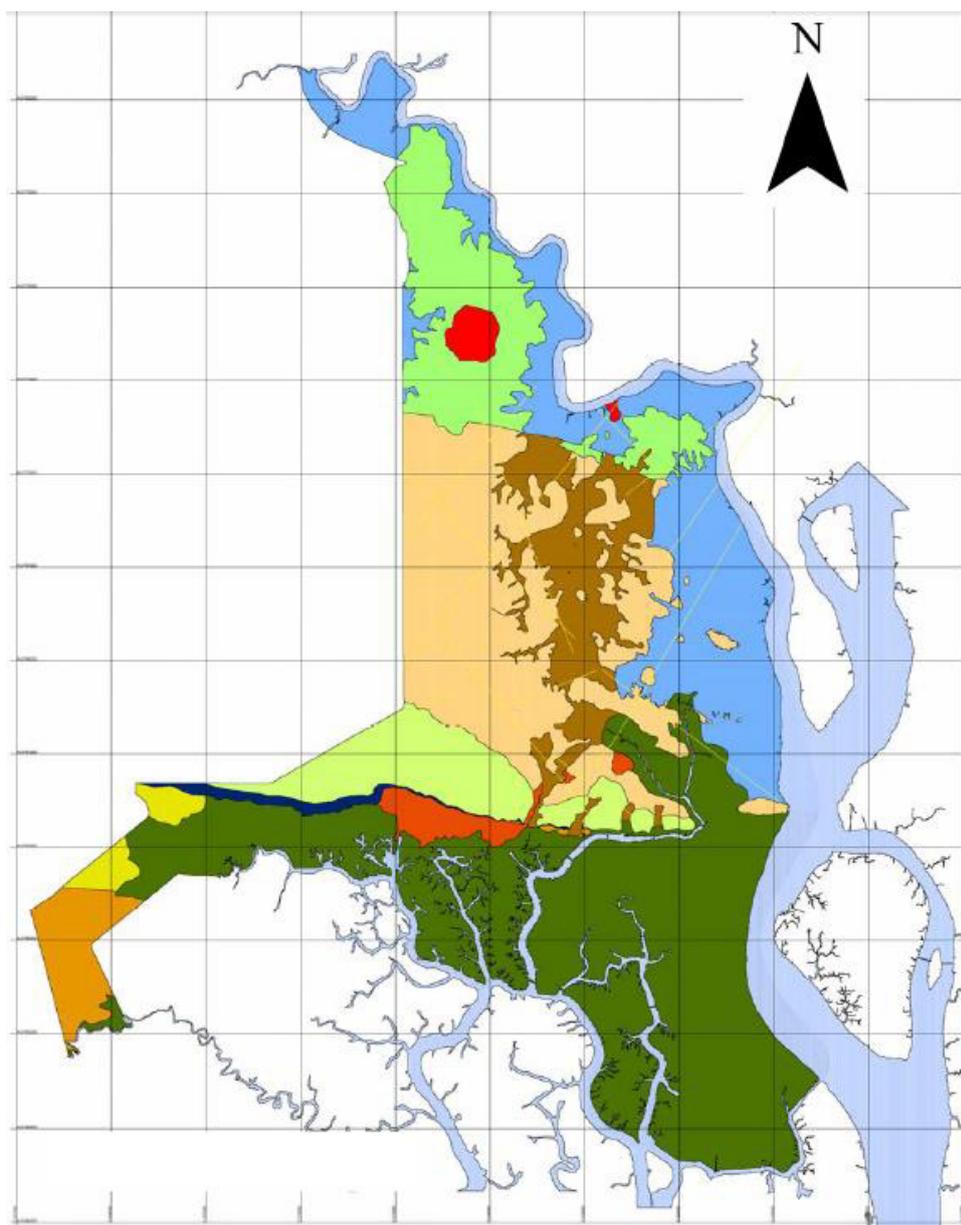


Foto 11 Deslizamientos planos en los estratos rocosos, sector la Ferroviaria.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis



Mapa I Mapa de Formaciones geológicas en la ciudad de Guayaquil. [10]

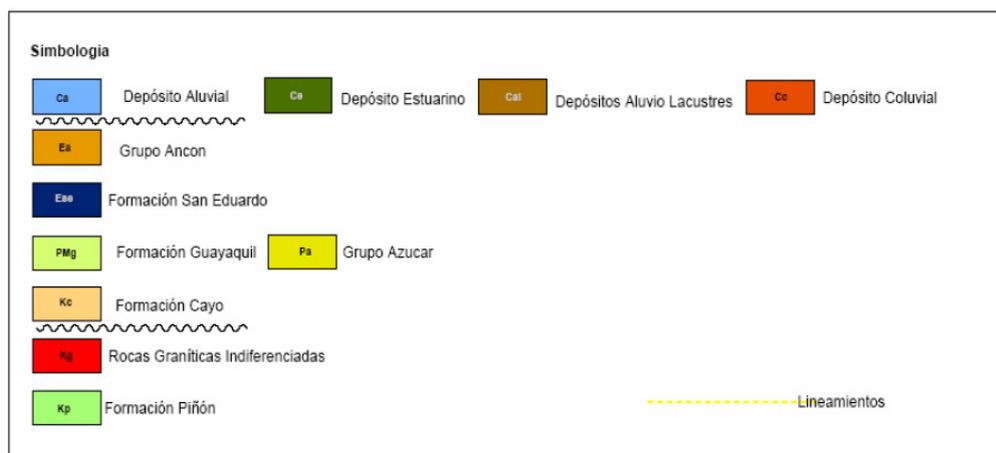


Figura 2.15 Simbología del Mapa de Formaciones geológicas en la ciudad de Guayaquil. [10]

Los eventos sísmicos se originan en la actividad constante de las placas tectónicas. Como se conoce, la Placa Nazca se introduce bajo la Placa Continental y entre otras acciones genera la sismicidad y el vulcanismo. Los sismos tienen una gran incidencia en los procesos de inestabilidad de laderas y taludes [28].

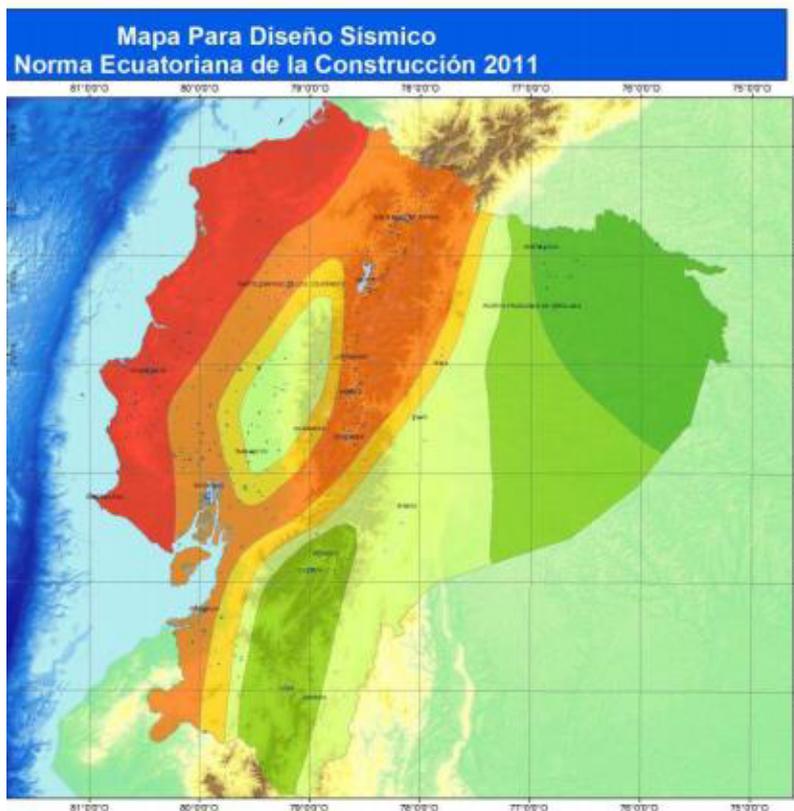
Dentro de los parámetros que se determinan, el más importante para efectos de los estudios de estabilidad son las aceleraciones sísmicas.

Se han realizado varias zonificaciones sísmicas [68], la última que incluye la norma ecuatoriana de la construcción actualmente vigente (NEC2011). En el caso de Guayaquil, como consecuencia del último estudio se han adoptado nuevos valores de aceleración sísmica máxima probable que

se tendría en los macizos rocosos. Ese valor es expresado en fracciones de la aceleración de la gravedad.

Según las conclusiones a las que llega dicho estudio para la ciudad de Guayaquil se ha deducido una aceleración sísmica de 0.4g, considerada como alta, valor que está por debajo de las aceleraciones sísmicas de 0.5g que corresponden a la condición de muy alta sismicidad [61]

Como parte de la norma sísmica se ha elaborado el mapa donde están especificadas las aceleraciones sísmicas con diferentes valores en forma zonificada. (Mapa II).



| Zona sísmica | I | II | III | IV | V | VI |
|---------------------------------------|------------|------|------|------|------|-------------|
| Valor del factor Z | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | ≥ 0.50 |
| Caracterización de la amenaza sísmica | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy Alta |

Mapa II Mapa de la zonificación sísmica del Ecuador. [68]

2.3.Hidrología

Los estudios meteorológicos tienen, en general, gran importancia en las investigaciones que tienen ver con la acción del agua en los procesos de desestabilización, en especial los registros y procesamiento de las precipitaciones, que en el caso de Guayaquil, tienen más de 50 años. La estación Meteorológica del aeropuerto de la ciudad es la que ha

registrado dichas informaciones, las mismas que han sido procesadas por el organismo estatal INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología) [19].

Se ha determinado que el promedio multianual de las precipitaciones en la ciudad de Guayaquil es de 1250 mm, siendo los meses de las mayores precipitaciones enero, marzo y abril. Dichos valores promediados no constituyen las condiciones más críticas que se han revelado cuando han ocurrido los fenómenos de El Niño, ya que los valores anuales y mensuales de las precipitaciones son de un rango mucho mayor, así las precipitaciones anuales registradas han estado comprendidas entre 4000 y 5000 milímetros [19].

Las precipitaciones mensuales en un Niño, en los meses más lluviosos superan 450mm, mientras que un promedio mensual no pasan de los 250mm. Un dato muy importante que coincide con la ocurrencia de deslizamientos, constituyen las precipitaciones diarias registradas en los días más lluviosos, que superan los 180mm [47] [4]. El deslizamiento del Cerro Azul ocurrió cuando el día 19 de abril del 1998, precipitaron 187mm. Según investigaciones realizadas no solo en Ecuador, pero a lo largo de Sudamérica se estableció que el fenómeno de El Niño se ha presentado con una periodicidad muy irregular, ya sea de forma grave o leve. En base a datos obtenidos en más de 30 años, se estableció que un Fenómeno

de El Niño leve se daba para tiempos de retorno aproximados de entre 3 a 6 años. Los fenómenos graves o de gran magnitud se dieron en cambio en un tiempo de retorno de 15 a 20 años. [67]

Para efecto de valorar las magnitudes de las precipitaciones se adjuntó en los anexos, los registros de los dos últimos años, (2013-2014) del instituto Oceanográfico de la Armada (INOCAR). Se han tomado mediciones de los meses de las más intensas precipitaciones de los últimos 2 años representadas como 11 graficas de precipitación diaria presentando los respectivos picos y la frecuencia de estas lluvias presentes en los meses más lluviosos registrados en la ciudad de Guayaquil.

2.4.Geohidrología

La Geohidrología constituye el estudio de las aguas subterráneas que se pueden tener en los macizos rocosos y en los depósitos de suelos en donde existe porosidad efectiva, es decir una capacidad de almacenamiento de las aguas lluvias. Los depósitos de agua subterránea se denominan acuíferos y estos existen cuando hay una área de recarga o de infiltración a partir de la cual las aguas se acumulan en suelos y rocas porosos, teniendo una base impermeable o semi impermeable que

favorece el almacenamiento o retención del agua, en estos casos el agua es un valioso recurso natural [1].

Los acuíferos en terrenos planos, donde se tienen depósitos aluviales, pueden tener paquetes de sedimentos con agua (mantos acuíferos) a diferentes profundidades e inclusive intercalados con capas impermeables. Las capas que reciben la alimentación de agua pueden tener inclusive carga o potencial cuando el agua desciende desde las partes más altas por estratos o capas permeables que actúan como un conducto [1].

La situación antes descrita determina que se tengan acuíferos artesianos, los mismos que se conoce que existen en el sector de Milagro y Yaguachi. Respecto a esto, el INAMHI ha realizado un mapa de Zonificación hidrogeológica del Ecuador [40].

En los cerros de Guayaquil, esto es en las laderas rocosas, no se han detectado acuíferos. En los estudios efectuados por la ESPOL para el Relleno Sanitario de La Iguanas en 1990 se hace constar que no existen acumulaciones acuíferas en las rocas de la Formación Cayo por existir una inter estratificación frecuente de lutitas y limolitas que son impermeables, se habla de que pueden existir acuicludos que son

acumulaciones de agua, de poca importancia, que tienden a dirigirse hacia el interior del macizo rocoso [26].

Debido a que los estratos de las formaciones rocosas están inclinados al Sur con un ángulo que varía entre 14 y 17 grados y que pueden ser rocas porosas y permeables como los micro conglomerados es posible que se produzcan acumulaciones de agua (acuíferos) al pie de las laderas. Unos de los casos más conocidos son las aguas subterráneas que existen en la Planta de Coca Cola, junto a la avenida Juan Tanca Marengo y al pie de las colinas de la Prosperina, en donde debe ocurrir la infiltración de aguas lluvias. También se ha reportado la existencia de aguas subterráneas en sectores comprendidos entre la vía Perimetral y la Vía Daule, siempre al pie de las laderas [26].

En las partes bajas del terreno del Campus Politécnico Gustavo Galindo, también es posible encontrar aguas subterráneas en los depósitos de suelos, ya que se puede producir la recarga en las partes altas [21 y 24].

Se considera que las acumulaciones acuíferas pueden tener un efecto negativo en los cuerpos coluviales como los que se tienen al pie del Cerro Azul, razón, por la cual, en diferentes tramos de la vía perimetral han ocurrido deslizamientos, en periodos lluviosos durante por los menos los 15 últimos años. Esto implica que el agua fluye con capacidad erosiva y

en otros casos genera altas presiones intersticiales, debajo del pavimento.

Las colinas de la Prosperina también presentan esa misma situación, afectando en esos casos a viviendas.

2.5. Geotecnia

La Geotecnia es una de las más importantes especialidades de la Ingeniería Civil ya que participa, en forma decisiva en todos los proyectos, en estudios, diseños, construcción y fiscalización de obras [1].

En lo concerniente al tema de la presente tesis es necesario involucrar varios aspectos que son parte del conocimiento que se adquiere de las ciencias o materias denominadas como: Topografía, Geología y Sismología, Hidrología y Geohidrología, la Mecánica de Suelos, Mecánica de Rocas, estas dos últimas con algunos análisis bien especializados, llegando a la formulación de recomendaciones y a proponer soluciones geotécnicas.

Mecánica de Suelos.- Es la materia que estudia las características y propiedades de los diferentes tipos de suelo asumiendo que se trata de un medio homogéneo y en muchos análisis considerándolo como un

medio isotrópico. Es el conocimiento de mayor antigüedad en las ciencias geotécnicas, por lo que existen muchos autores que ha impulsado su desarrollo [2 y 3].

Además del análisis efectuado en lo referente al flujo del agua, tienen gran importancia la determinación de las propiedades índice o características físicas (en especial la densidad y el índice de plasticidad) y las propiedades geomecánicas, especialmente en lo que tiene que ver con la resistencia al corte mediante los ensayos triaxiales y los de corte directo, con lo que se definen los fundamentales parámetros denominados cohesión y el ángulo de fricción [3].

Si bien los ensayos de corte directo son los más utilizados siendo además los menos costosos, los ensayos triaxiales UU (no consolidados y no drenados) son también utilizados, debiéndose tener en cuenta que se obtienen los parámetros de ángulo de fricción y de resistencia al cortante no drenada SU, de suelos arcillosos. Todos los mencionados se denominan parámetros del esfuerzo cortante [48].

Es importante destacar que existen dos grupos de parámetros del esfuerzo cortante, a conocer por su gran importancia [2]:

- a. Esfuerzo cortante pico que involucra el ángulo de fricción y la cohesión, lo que ocurre cuando se produce una ruptura por primera vez.
- b. Esfuerzo cortante residual que se define únicamente por el ángulo de fricción residual, este último caso se aplica únicamente cuando ya existe previamente una superficie de deslizamiento.

Los parámetros que se estudian en Mecánica de Suelos se aplican especialmente para los deslizamientos que ocurren en depósitos de materiales sueltos acumulados y muy específicamente en los suelos coluviales [3]. Otro campo de aplicación de la Mecánica de Suelos constituye los rellenos de todo tipo y los terraplenes.

Es importante señalar que la mayoría de deslizamientos que ocurren en los desarrollos urbanos informales de Guayaquil, ocurren en sitios en los cuales se han rellenado quebradas u hondonadas donde la presencia del agua que desciende de sub cuencas de drenaje natural, es definitivamente el factor más desequilibrante [28].

La acción del agua producto de grandes precipitaciones (aspecto relacionado a la presente investigación) y la actividad sísmica, son parámetros detonantes para la inestabilidad de los depósitos de suelos que se encuentran en las laderas y de modo frecuente cuando se realizan

acciones antrópicas, sin el debido análisis que conduzca a las soluciones de ingeniería, que son necesarias [20].

Mecánica de Rocas.- Como se conoce, es una materia homologa a la Mecánica de Suelos con la diferencia notable que trata de estudio de los macizos rocosos que son medios heterogéneos y discontinuos. Se considera que los macizos rocosos están integrados por una matriz rocosa separada por discontinuidades, como se indicó anteriormente, estas últimas constituyen la estratificación en las rocas sedimentarias, la foliación y el bandeamiento en rocas metamórficas y las fracturas tectónicas que afectan a todo tipo de roca, en consecuencia también a las rocas ígneas [1].

Se puede notar que la totalidad de los macizos rocosos presentan cierto grado de meteorización que los debilita. El agua y los movimientos sísmicos actúan como elementos desestabilizante cuando los macizos rocosos son intervenidos mediante acciones antrópicas, siendo las más importantes la deforestación y las obras que se construyen [1,2 y 3].

Se considera que los suelos arcillosos residuales, son la última capa protectora de los macizos rocosos, por lo que cuando se produce la erosión debido a la deforestación, las superficies expuestas se vuelven

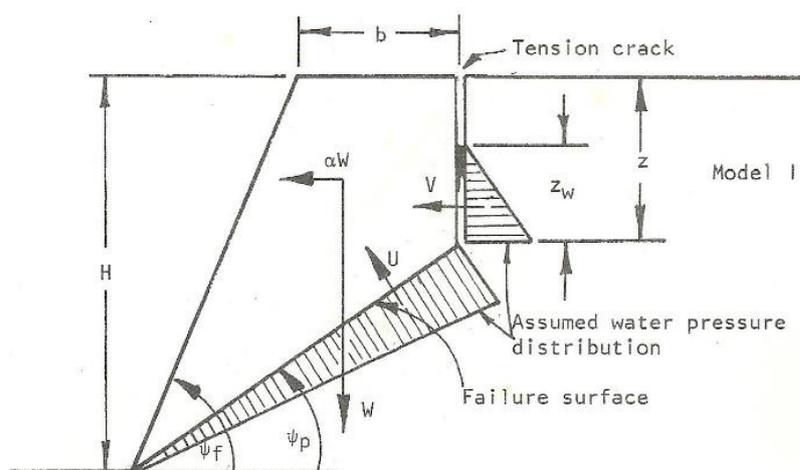
más permeables, el agua se infiltra anómalamente y es así como se generan procesos de inestabilidad [1 y 2].

La Mecánica de Rocas ha tenido un desarrollo muy importante en el último medio siglo, en especial en aplicaciones para los proyectos de Ingeniería Civil, para efectos de la presente tesis sólo se describen los aspectos más directamente vinculados el tema desarrollado, que son los siguientes [2]:

- a. Análisis de la interacción de las discontinuidades en relación a laderas o taludes, lo cual se logra mediante el uso de la red estereográfica.
- b. Determinación de los parámetros de resistencia al corte pico y residual, que tienen iguales criterios de definición y aplicación que en la Mecánica de Suelos.
- c. Determinación de los tipos de superficies de ruptura, controladas por las discontinuidades y que puede resumirse en cuatro posibilidades que son: deslizamientos planos, caída de cuñas, volcamiento y procesos inestables mixtos
- d. Acción desestabilizadora del agua en las discontinuidades y la superficie que se desliza en función de la altura del nivel freático [1 y 2].

- e. Acción de la sismicidad, que se aplica mediante el parámetro aceleración sísmica, que se transforma en una fuerza equivalente a un porcentaje del peso del cuerpo que se desliza [20].

Dentro del análisis de estabilidad de deslizamientos planos, uno de los procedimientos más interesantes para demostrar la acción del agua y la acción de la sismicidad mediante la aceleración sísmica horizontal “ α ”, es el propuesto por Hoek y Bray que se resumen así (Figura 2.16):



$$F = \frac{cA + (W(\cos\psi_p - \alpha\sin\psi_p) - U - V\sin\psi_p)\tan\phi}{W(\sin\psi_p + \alpha\cos\psi_p) + V\cos\psi_p}$$

Where

$$z = H(1 - \sqrt{\cot\psi_f \cdot \tan\psi_p})$$

$$A = (H - z) \operatorname{cosec}\psi_p$$

$$W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left\{ (1 - (z/H)^2) \cot\psi_p - \cot\psi_f \right\}$$

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w \cdot z_w \cdot A$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w \cdot z_w^2$$

Figura 2.16 Modelo I propuesto por Hoek y Bray. [37]

Otro modelo propuesto por Hoek y Bray denominado II, donde la grieta se forma en la ladera, es el que muestra a continuación. (Figura 2.17)

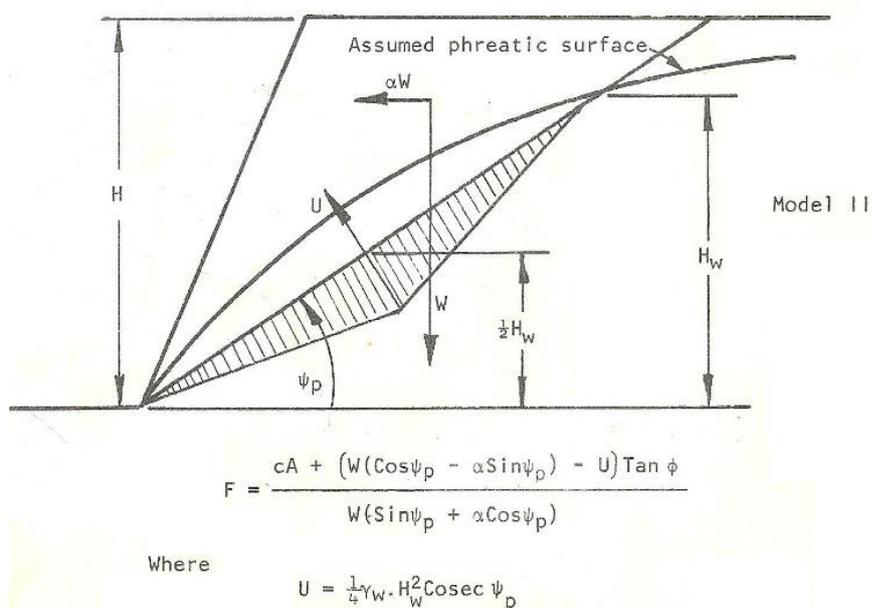


Figura 2.17 Modelo II propuesto por Hoek y Bray. [37]

Para el caso del deslizamiento y caída de cuñas, los mismos autores antes mencionados propusieron varios procedimientos de análisis de entre los cuales interesa más aquel que involucra la presencia del agua en los procesos de inestabilidad.

Para el desarrollo de dicho procedimiento es fundamental el uso de la red estereográfica la cual permite visualizar y trabajar con las discontinuidades en tres dimensiones, teniendo en cuenta además la presencia del talud o ladera que se analiza y también del agua [2 y 3].

Conceptos geológicos, hidrológicos y geotécnicos aplicados al análisis [1,2 y 3]

Unidad geológica.- Por lo general se denomina formación geológica y está relacionada principalmente a la existencia de rocas sedimentarias que pueden poseer variaciones de tipos de roca, lo que se denomina cambios litológicos. [6].

Otro tipo de unidad geológica constituyen los Depósitos de suelos y en particular aquellos que se encuentran en las laderas, denominados por lo general como suelos coluviales. [1]

Sistema de drenaje.- Es un área física en donde caen las precipitaciones naturales, las cuales se recogen y acumulan llegando a los caminos o rutas naturalmente formados, que son las hondonadas, quebradas, esteros, riachuelos y ríos. Las cuencas de drenaje están equilibradas tanto en el flujo o escorrentía superficial y en la escorrentía subterránea. [1]

El mejor equilibrador de la escorrentía superficial es la vegetación y lo que más afecta a los dos tipos de escorrentía son las acciones antrópicas, sin tener en cuenta análisis técnicos previos. [1]

Macizo rocoso.- Es una elevación rocosa, una colina, un cerro, etc., en donde se pueden construir obras de ingeniería. Está constituido necesariamente por una estructura interna rocosa, que incluye generalmente fracturas, que en forma natural está ya equilibrada debido a los suelos que existen superficialmente, posee vegetación. Cuando se realizan excavaciones o rellenos sin considerar el sistema de drenaje natural, el macizo rocoso se desestabiliza. [20]

Falla geológica.- Es una gran fractura o ruptura de la corteza terrestre que implica la separación de dos grandes bloques de corteza, los cuales pueden desplazarse en diversos sentidos, lo cual depende de la dirección de las grandes fuerzas tectónicas que generan las denominadas placas tectónicas. No deben confundirse las fallas geológicas con los deslizamientos. [1]

Discontinuidades en el macizo rocoso.- Se consideran discontinuidades a las fracturas tectónicas, a la estratificación y al bandeamiento o foliación. Se miden en rumbo y buzamiento o más frecuentemente en dirección de buzamiento y buzamiento. Esto último se aplica en el presente trabajo para determinar el emplazamiento de las discontinuidades aplicando la técnica de la red estereográfica [3] (Figura 2.18). Las líneas rectas perpendiculares a los planos son las direcciones del buzamiento en los colores correspondientes.

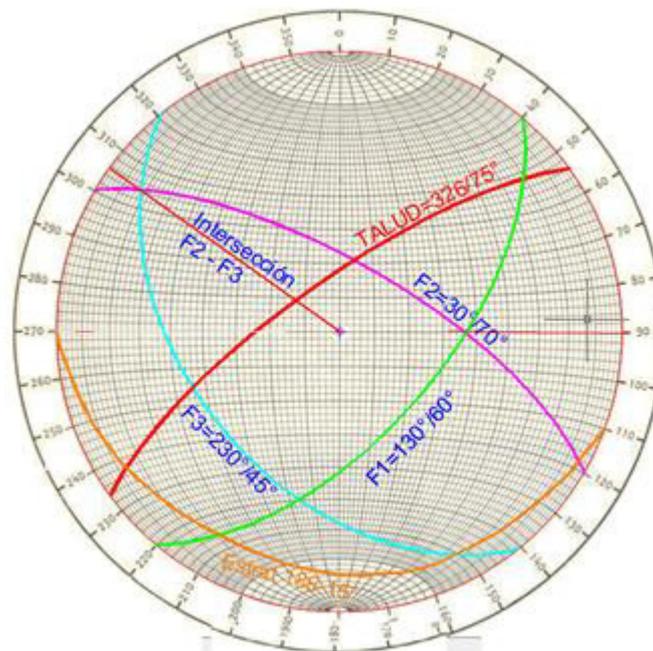


Figura 2.18 Red estereográfica en donde se han graficado tres planos (líneas curvas que señalan el buzamiento) correspondientes a tres discontinuidades.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Las fracturas tectónicas se presentan en grupos con orientaciones y buzamientos, similares por lo que se denominan familias. En un macizo rocoso se puede tener normalmente hasta 3 familias de fracturas. [3]

Para la elaboración de la presente, se eligen valores promedios o representativos de las discontinuidades, por lo que se identifican las familias de fracturas así: familia 1= F1, familia 2 = F2, familia 3 = F3. Las discontinuidades de estratificación se denominan con este mismo nombre.

Para el estudio de las discontinuidades se ha formulado diversos procedimientos uno de los cuales, propuesto por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas es el siguiente: (Tabla I) [41].

| 1- Espaciamiento de las Discontinuidades | | | | | |
|--|---|-----------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|
| Descripción | | Espaciado | | Designación de la Masa Rocosa | |
| Muy espaciadas | | >2.00m | | Sólida | |
| Espaciadas | | 0.60m 2.00m | | Masiva | |
| Moderadamente espaciadas | | 0.20m 0.60m | | Bloques | |
| Cercanas | | 0.06m a 0.20m | | Fracturada | |
| Muy cercanas | | <0.06m | | Triturada | |
| 2- Condición de las Discontinuidades | | | | | |
| Aspereza | | | Apertura | | Espesor de Relleno |
| Rugosa | Ondulada | Plana | Muy cerradas | Sin separación | Limpias, sin relleno |
| a. Escalonada | a. Rugosa | a. Rugosa | Cerradas | <1 mm | Película muy delgada |
| b. Lisa | b. Lisa | b. Lisa | Moderadamente abierta | 1 a 3 mm | Película moderadamente fina |
| c. Especular | c. Especular | c. Especular | Abierta | 3 a 10 mm | Película delgada |
| | | | Muy abierta | 10 a 30 mm | Espesor moderado |
| | | | | > 30 mm | Espeso |
| 3- RQD, Designación de la Calidad de la Roca | | | | | |
| Descripción cualitativa | | | | RQD % | |
| Excelente | | | | 90 – 100 | |
| Buena | | | | 75 – 90 | |
| Regular | | | | 50 – 75 | |
| Pobre | | | | 25 – 50 | |
| Muy Pobre | | | | < 25 | |
| $RQD = \frac{\sum \text{longitud de núcleo} > 100 \text{ mm}}{\text{longitud del intervalo de perforación}}$ | | | | | |
| 4- Persistencia de la Discontinuidad | | | 5- Orientación | | |
| Discontinua | | < 1 m | En afloramientos: mida dirección y buzamiento con brújula Silva | | |
| Apenas continua | | 1 a 3 m | En núcleos no orientados: (mídase a partir del eje vertical) | | |
| Moderadamente continua | | 3 a 10 m | Las juntas buzán en diferentes ángulos | | |
| Muy continua | | 10 a 30 m | La mayoría de las juntas son paralelas a la estratificación | | |
| Altamente continua | | > 30 m | Algunas juntas son verticales | | |
| 6- Materiales de Relleno más comunes | | | | | |
| Óxidos | | Cuarzo | Las juntas son verticales y horizontales | | |
| Manganeso | | Zeolita | En núcleos orientados: dirección y buzamiento de las fracturas | | |
| Clorita | | Pirita | | | |
| Calcita | | Arcilla, limo y otros | | | |
| 7- Presencia de agua en las Discontinuidades | | | | | |
| FD | Fractura seca, sellada, o el relleno es denso o su composición impide el flujo del agua. La circulación de flujo parece poco posible. | | | | |
| FDP | La fractura está seca y no presenta evidencia de circulación de flujos, pero parece posible. | | | | |
| DW | La fractura está seca pero muestra evidencia de circulación de flujos, tales como manchas, lixiviación y vegetación. | | | | |
| FW | El relleno está húmedo, pero no se observa la presencia del fluido. | | | | |
| FP | La fractura muestra precolación. Está húmeda con gotas de agua ocasionales. | | | | |
| FF | La fractura emite flujo continuo a baja presión. El material de relleno presenta signos de lixiviación o socavación. | | | | |
| FFC | La fractura emite un flujo continuo a presiones moderadas a altas. El material de relleno puede haberse lavado. | | | | |

Tabla I Parámetros para estudiar las discontinuidades. [41]

Meteorización.- Es el proceso natural mediante el cual las rocas han sufrido la acción ambiental, en millones de años y en diferentes grados de afectaciones de los macizos rocosos, desde su superficie hacia el interior. La fracturaciones intensas, las rocas poco litificadas y el metamorfismo de alto grado, han favorecido la meteorización. El grado máximo de meteorización constituyen los suelos denominados residuales los cuales cubren, en espesores generalmente de menos de 1m, los macizos rocosos. Bajo dichos suelos existen rocas fragmentadas, desde tamaños finos hasta gruesos y en espesores métricos. Se debe considerar que en un macizo rocoso natural existe un perfil máximo de meteorización en la base del cual se tiene la roca [1 y 28].

Según Goodman [34] la meteorización en laderas se esquematiza en tres zonas siendo la primera el suelo residual, la segunda una mezcla de suelos con fragmentos de roca y la tercera, la roca intensamente fracturada, así: (Figura 2.19).

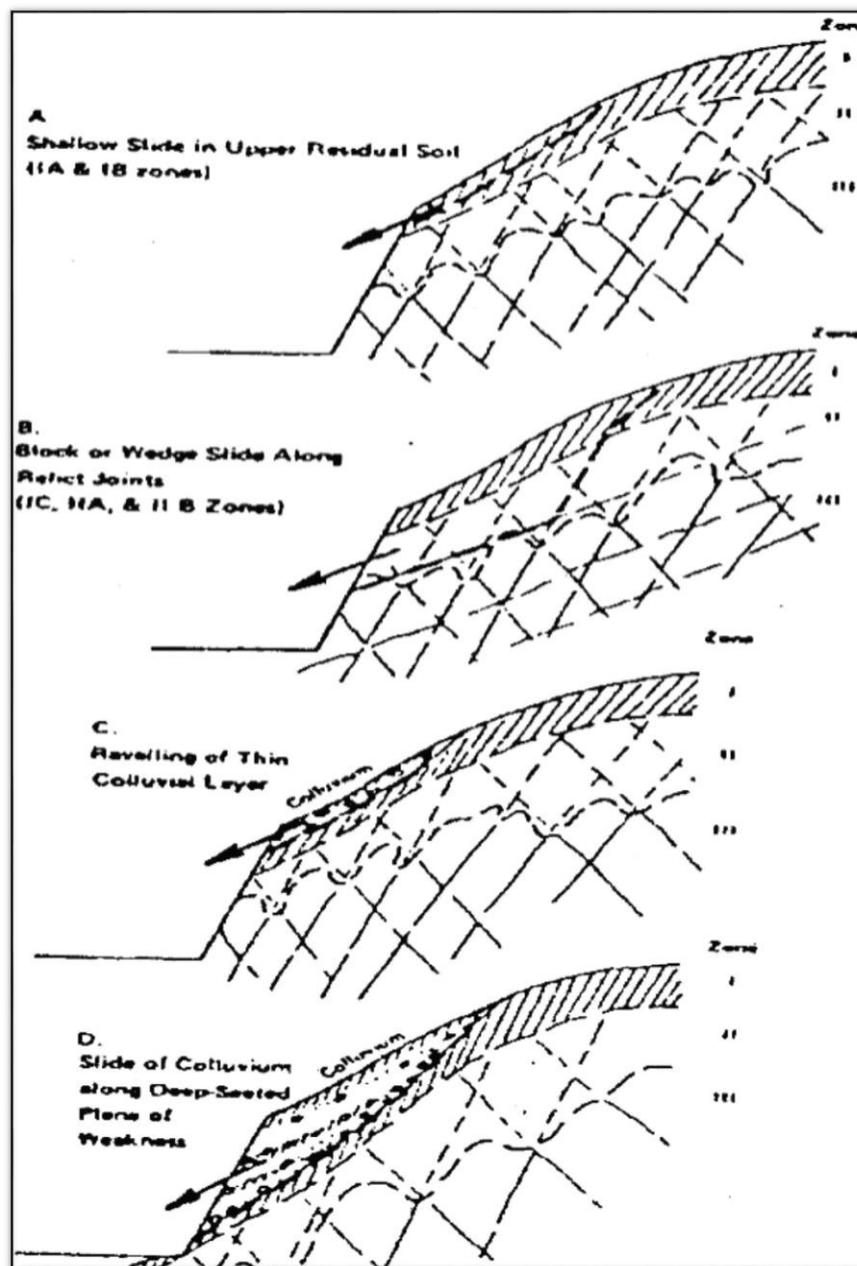


Figura 2.19 Zonas de meteorización en una ladera según Goodman. [34]

En el caso del área estudiada, la zona I tiene un espesor variable de entre 0.30 a 0.60m, la zona II de 0.40 a 1.00m, luego aparece la zona III.

La Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas propuso la siguiente clasificación: (Tabla II)

| Grado de meteorización | Término descriptivo | Descripción |
|------------------------|---------------------------|---|
| VI | Suelo residual | Todo el material se ha convertido en suelo cambiar de emplazamiento. Se ha perdido la estructura y la textura. Cambio de volumen apreciable. |
| V | Completamente meteorizado | El material está completamente meteorizado, pero mantiene intacta la estructura original de la roca |
| IV | Fuertemente meteorizado | Se ha meteorizado más del 50 por 100 del material. La roca, que puede estar sana o decolorada, está en fragmentos discontinuos. |
| III | Moderadamente meteorizado | Se ha meteorizado menos del 50 por 100 del material. La roca puede estar sana o decolorada, presentándose en grandes fragmentos. |
| II | Ligeramente meteorizado | El material presenta un aspecto decolorado u oxidado tanto en las discontinuidades como en la propia roca. La resistencia de la roca es algo menor que la de la roca sana |
| I | Sano | No se aprecia ningún signo visible de meteorización. Puede admitirse una ligera decoloración. |

Tabla II Escala de grados de meteorización. [41]

Deterioro o alterabilidad.- Afectación que sufren los frentes excavados de suelos y rocas en tiempos relativamente cortos, que van desde semanas a décadas, de tal forma que dichos materiales pierden resistencia, lo que se refleja en la disminución de los valores de las propiedades geomecánicas. A mayor grado de meteorización y a mayor rapidez ocurre el deterioro, generándose los procesos de inestabilidad en un frente excavado. [1, 20, 51].

Este es un aspecto de gran importancia y trascendencia ya que es una de las principales causas de la desestabilización que sufren varios frentes rocosos intervenidos en la ciudad de Guayaquil.

Una de los parámetros que más causan deterioro es la presencia del agua. Cuando existen largos períodos de sequía y ocurren lluvias se tienen los peores efectos. [20]

Nivel freático.- Constituye el nivel de máxima saturación que presenta cualquier tipo de terreno debido a la infiltración de las precipitaciones. El nivel freático es bajo cuando no se tienen lluvias y sube con la presencia de lluvias en períodos largos [1]. En perfiles transversales perpendiculares a la dirección de una ladera, el nivel freático se representa como queda indicado en la Figura 2.20. Es evidente que a mayores precipitaciones se tiene una mayor vegetación y el nivel freático es elevado. Debido a que se producen diferencias de cargas, en el caso de laderas el nivel freático se denomina también nivel piezométrico [20].

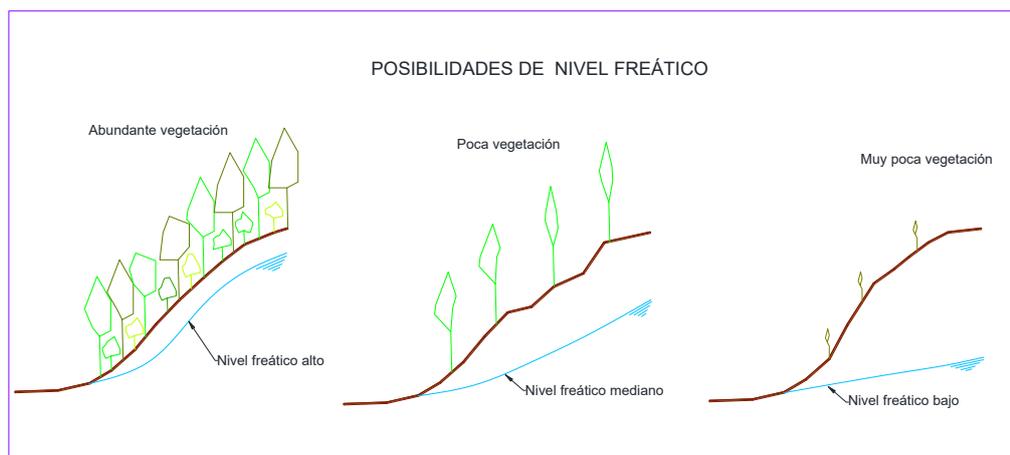


Figura 2.20 Variaciones del nivel freático en función de la cantidad de lluvias.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Parámetros geomecánicos.- Son los que se obtienen de la ejecución de los ensayos in situ y en el laboratorio, tanto para suelos como para las rocas [56].

Presión Intersticial.- Este fenómeno ocurre cuando los suelos arcillosos están completamente saturados, por lo que las pequeñas partículas de esos suelos son afectadas por la presión de agua a nivel de la infinidad de poros que las rodean. Bajo el nivel freático se tiene presión intersticial [3].

Para la realización de la presente tesis se ha obtenido abundante información existente en los proyectos realizados en los cerros de la ciudad de Guayaquil, varios de ellos ejecutados por las ESPOL y de otras Instituciones Públicas, como la Alcaldía de Guayaquil, la Gobernación de

la Provincia del Guayas, el Ministerio de Transportes y Obras Públicas, entre otros.

Pese a que se han presentado numerosos problemas de estabilidad en el sector Norte de Guayaquil y se podrían considerar situaciones o casos típicos, existe muy poca información y es difícil su obtención debido a que se trata, en su gran mayoría de asentamientos urbanísticos irregulares, tal es el caso del sector Bastión Popular.

Los parámetros geotécnicos que se han obtenido se muestran a continuación: (Tablas III, IV y V) [56]

| Estudios y Diseños de Túnel en el Cerro Del Carmen, ESPOL | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------------|--------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| Ubicación: Cerro de El Carmen, lado Sur | | | | | | | |
| DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO | | | | | | | |
| MUESTRA | DESCRIPCION | PESO MUESTRA | Altura | Diam.Recipiente | Volumen | Peso Vol. sec | Peso Vol. sat |
| # | Tipo de roca | gramos | cm | cm | cm ³ | Ton/m ³ | Ton/m ³ |
| CCS5 | Limolita algo silicificada | 1.121,17 | 4,45 | 12,77 | 569,93 | 1,97 | 2,16 |
| CCS6 | Arenisca de grano fino | 987,30 | 4,21 | 12,77 | 539,19 | 1,83 | 2,11 |
| CCS7 | Lutita silicificada | 1.122,14 | 3,96 | 12,77 | 507,17 | 2,21 | 2,26 |
| CCS8 | Limolita algo silicificada | 1.278,00 | 5,11 | 12,77 | 654,45 | 1,95 | 2,15 |
| CCS9 | Limolita algo silicificada | 1.009,50 | 4,11 | 12,77 | 526,38 | 1,92 | 2,15 |
| CCS10 | Arenisca de grano fino | 1.198,50 | 4,42 | 12,77 | 566,08 | 2,12 | 2,56 |
| Peso Vol. sec= peso volumétrico seco | | | | | | | |
| Peso Vol. sat= peso volumétricosaturado | | | | | | | |
| Estudios y Diseños de Túnel en el Cerro Del Carmen, ESPOL | | | | | | | |
| Ubicación: Cerro de El Carmen, lado Norte | | | | | | | |
| DETERMINACIÓN DEL PESO VOLUMÉTRICO | | | | | | | |
| MUESTRA | DESCRIPCION | PESO MUESTRA | Altura | Diam.Recipiente | Volumen | Peso Vol. sec | |
| # | Tipo de roca | gramos | cm | cm | cm ³ | Ton/m ³ | |
| CCS11 | Limolita | 1.321,11 | 5,21 | 12,77 | 667,26 | 1,98 | |
| CCS12 | Arenisca de grano medio | 1.121,32 | 4,24 | 12,77 | 543,03 | 2,06 | |
| CCS13 | Arenisca de grano medio | 1.222,12 | 4,41 | 12,77 | 564,80 | 2,16 | |
| CCS14 | Arenisca de grano grueso | 1.315,21 | 5,11 | 12,77 | 654,45 | 2,01 | |
| CCS15 | Limolita | 1.109,81 | 4,11 | 12,77 | 526,38 | 2,11 | |
| CCS16 | Limolita | 1.135,50 | 4,42 | 12,77 | 566,08 | 2,01 | |

Tabla III Determinación de los pesos volumétricos de las rocas del Cerro Del Carmen.

[56]

| ANÁLISIS DEL DETERIORO DE TALUDES EN EL AREA URBANA DE GUAYAQUIL | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|-------|-------|----------|----------------|---------------|---------------|----------|
| Estudios y Diseños de Túnel en el Cerro Del Carmen, ESPOL | | | | | | | | |
| Ubicación: Cerro de El Carmen, lados Sur y Norte | | | | | | | | |
| ENSAYOS DE EVALUACION DE RESISTENCIA | | | | | | | | |
| MUESTRA | DESCRIPCION | D | L | P | Trac. Indirect | Correcc.forma | σ_{ib} | R_t |
| # | Visual | cm | cm | Kg | Kg/cm^2 | valor num. | M_{pa} | M_{pa} |
| CCS6 | Arenisca de grano fino, lado Sur | 10,35 | 12,34 | 8.234,50 | 41,05 | 3,11 | 3,79 | 2,35 |
| CCS7 | Lutita silicificada, lado Sur | 8,75 | 10,50 | 6.790,00 | 47,05 | 2,88 | 4,42 | 2,73 |
| CCS8 | Limolita algo silicificada, lado Sur | 6,34 | 9,20 | 3.775,50 | 41,21 | 2,46 | 3,88 | 2,40 |
| CCS9 | Limolita algo silicificada, lado Sur | 8,15 | 11,30 | 2.930,00 | 20,25 | 2,24 | 1,80 | 1,12 |
| CCS11 | Limolita, lado Norte | 12,45 | 15,36 | 2.734,00 | 9,10 | 2,21 | 0,69 | 0,43 |
| CCS12 | Arenisca de grano medio, lado Norte | 7,75 | 9,25 | 3.456,00 | 30,69 | 2,24 | 2,85 | 1,76 |
| CCS13 | Arenisca de grano medio, lado Norte | 9,21 | 9,25 | 3.456,00 | 25,83 | 2,24 | 2,36 | 1,46 |
| CCS14 | Arenisca de grano grueso, lado Norte | 9,51 | 9,25 | 3.456,00 | 25,01 | 2,24 | 2,28 | 1,41 |
| SIGNIFICADO DE ABREVIATURAS: | | | | | | | | |
| D= Diámetro de la muestra | | | | | | | | |
| L= Longitud de la muestra | | | | | | | | |
| P= Carga hasta el punto de ruptura | | | | | | | | |
| Trac. Indirect= Resistencia a la tracción diametral | | | | | | | | |
| Correcc.forma= Corrección por la forma | | | | | | | | |
| σ_{ib} = Resistencia a la tracción indirecta | | | | | | | | |
| R_t = Resistencia a la tracción directa | | | | | | | | |

Tabla IV Determinación de las propiedades geomecánicas de rocas del Cerro Del Carmen. [56]

| Estudios y Diseños de Túnel en el Cerro Del Carmen, ESPOL | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------------------|------------------------|---------|--------------|---------|------------------|----------------------|
| Ubicación: Cerro de El Carmen, lado Sur | | | | | | | | |
| Observ. | Tipo de roca | Descripción | Discontinuidad(s) | Espesor | Persistencia | Relleno | Direc. Buz./Buz. | Angulo $r(^{\circ})$ |
| CCS1 | Lutita silicificada | Estratos de e=20cm | Estratificación | 0,0025 | 20m | No | 187/16 | 38 |
| CCS2 | Limolita algo silicificada | Estratos de e=30cm | Estratificación | 0,0045 | 25m | No | 185/15 | 35 |
| CCS3 | Lutita silicificada | Estratos de e=18cm | Estratificación ondul. | 0,002 | 20m | No | 181/variable | >50 |
| CCS3B | Lutita silicificada | Estratos de e=20cm | Estratificación ondul. | 0,002 | 20m | No | 182/variable | >50 |
| CCS4 | Arenisca de grano fino | Estratos de e=40cm | Estratificación | 0,0025 | 20m | No | 189/16 | >40 |
| CCS5 | Limolita algo silicificada | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 5m | No | 176/29 | 31 |
| CCS6 | Arenisca de grano fino | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 3m | No | 151/22 | 33 |
| CCS7 | Lutita silicificada | Bloque* | Fracturas | 0,0015 | 6m | No | 159/28 | 29 |
| CCS8 | Limolita algo silicificada | Bloque* | Fracturas | 0,0009 | 4m | No | 200/27 | 31 |
| CCS9 | Limolita algo silicificada | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 5m | No | 139/21 | 32 |
| CCS10 | Arenisca de grano fino | Bloque* | Fracturas | 0,0015 | 8m | No | 178/30 | 34 |
| ondul.= micropliegues que presentan las lutitas silicificadas o chert | | | | | | | | |
| Bloque* =volumen de roca cortado por discontinuidades de fractura | | | | | | | | |
| Direc. Buz./Buz.= Dirección de buzamiento / Buzamiento, in situ, del plano deslizante | | | | | | | | |
| Angulo $r(^{\circ})$ = es aproximadamente equivalente al ángulo de fricción interna con un esfuerzo normal bajo | | | | | | | | |
| Estudios y Diseños de Túnel en el Cerro Del Carmen, ESPOL | | | | | | | | |
| Ubicación: Cerro de El Carmen, lado Norte | | | | | | | | |
| Observ. | Tipo de roca | Descripción | Discontinuidad(s) | Espesor | Persistencia | Relleno | Direc. Buz./Buz. | Angulo $r(^{\circ})$ |
| CCS11 | Limolita | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 5m | No | 166/86 | 31 |
| CCS12 | Arenisca de grano medio | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 3m | No | 210/60 | >50 |
| CCS13 | Arenisca de grano medio | Bloque* | Fracturas | 0,0015 | 6m | No | 192/65 | 29 |
| CCS14 | Arenisca de grano grueso | Bloque* | Fracturas | 0,0009 | 4m | No | 166/45 | >46 |
| CCS15 | Limolita | Bloque* | Fracturas | 0,001 | 5m | No | 200/35 | 37 |
| CCS16 | Limolita | Bloque* | Fracturas | 0,0015 | 8m | No | 168/83 | 34 |
| Bloque* =volumen de roca cortado por discontinuidades de fractura | | | | | | | | |
| Direc. Buz./Buz.= Dirección de buzamiento / Buzamiento, in situ, del plano deslizante | | | | | | | | |
| Angulo $r(^{\circ})$ = es aproximadamente equivalente al ángulo de fricción interna con un esfuerzo normal bajo | | | | | | | | |

Tabla V Determinación de las características de las discontinuidades del macizo rocoso del Cerro Del Carmen. [56]

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS TEÓRICO DEL FLUJO EN MEDIOS POROSOS Y FRACTURADOS APLICADO A LADERAS Y TALUDES.

3.1. Hidráulica de Suelos

La relación fundamental del flujo en medios porosos es la ecuación de Darcy que la dedujo a partir de un experimento formulado por él mismo. Su trabajo consistió en simular una condición de carga de agua similar a la que se tiene en una ladera natural en la que se tiene el nivel freático. Para esto se consideran dos posiciones de la “tabla de agua”, a diferente altura, con la finalidad de establecer la diferencia de carga hidrostática, que se denomina simplemente carga. En la Figura 3.1 se tienen dos tubos verticales que tienen cargas H_2 y H_1 , respectivamente

y que por estar conectados por otro conducto lleno de arena inclinado (para simular el flujo en suelo), presentan una diferencia de carga cuando el flujo atraviesa dicho conducto. El agua se traslada a través del suelo por los vacíos existentes en dicho medio poroso entre los puntos A y B, los cuales son parte de un conducto lleno de arena. El tipo de suelo y tamaño de partícula afecta directamente a la permeabilidad, los suelos arcillosos tienen menores espacios de vacíos y por ende menor capacidad de dejar pasar el flujo [48].

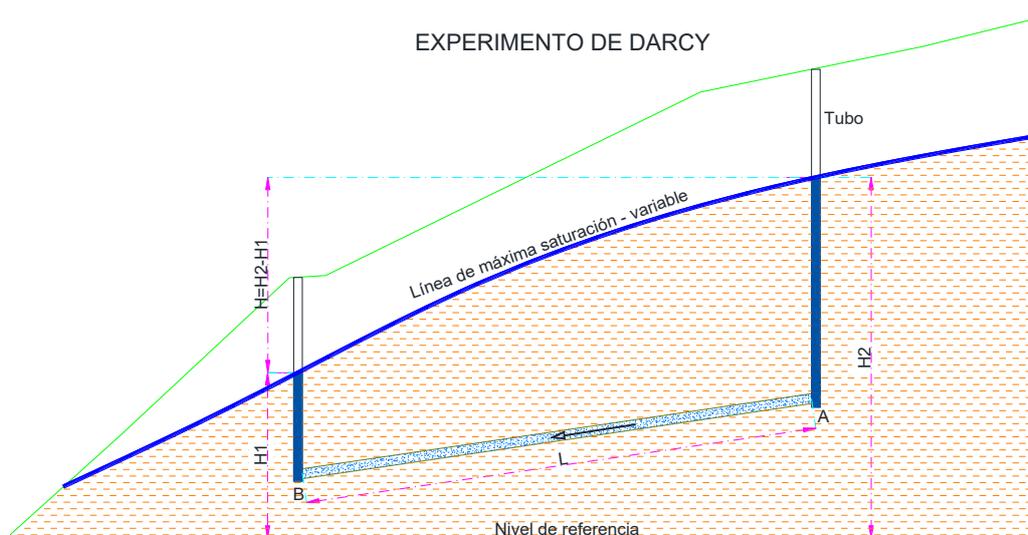


Figura 3.1 Experimento que muestra el flujo que ocurre en el conducto de arena, de A hasta B, debido a la diferencia de carga que poseen.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Redes de flujo en medios porosos.- Las redes de flujo constituyen una disposición bidimensional en la cual las líneas de flujo representan los caminos que siguen las partículas de agua cuando fluyen desde el nivel

con la máxima carga hasta la carga cero. El flujo va perdiendo su carga en función de las líneas equipotenciales y así se tienen las redes de flujo. Las equipotenciales son líneas perpendiculares a las líneas de flujo.

De esta manera, la primera equipotencial tiene la máxima carga, en tanto que en la última, cuando se produce la surgencia, se tiene la carga cero. Para realizar la red de flujo se aplicó el principio de las “figuras cuadradas”, formulado por varios autores entre ellos Cedergreen [59]. (Figura 3.2)

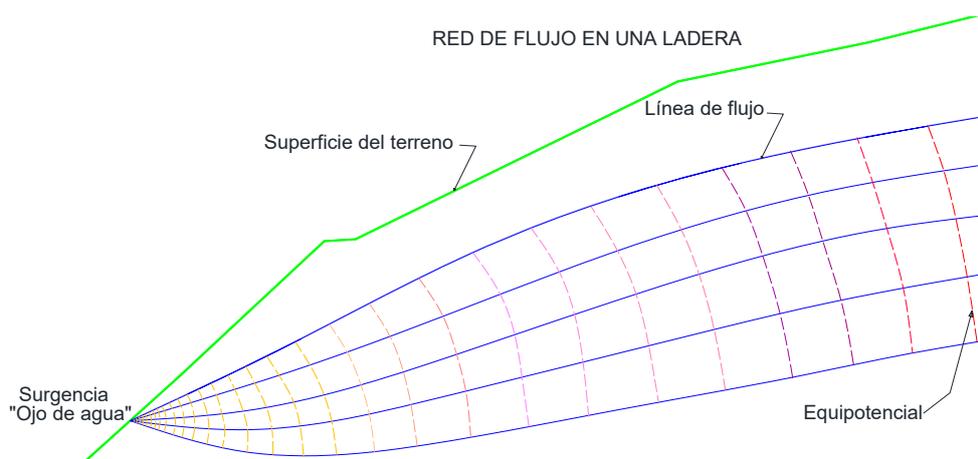


Figura 3.2 Líneas de corriente o de flujo y líneas equipotenciales formando una red de flujo en una ladera. La primera línea de flujo es la de máxima saturación.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Dentro de un análisis bidimensional para el flujo de un fluido a lo largo de material granular, se aplica también la ecuación de Laplace. Si se asumen

las permeabilidades en las direcciones X y Z, se tiene la siguiente relación que aparece en varios libros donde se analiza redes de flujo (48]:

$$K_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Siendo H la energía total comprendida y las constantes K, la permeabilidad. La ecuación de Laplace asume que la ley de Darcy es válida y además que el flujo irrotacional es despreciable.

Es importante puntualizar que existen relaciones entre el experimento de Darcy, las redes de flujo y el nivel freático, siendo este último lo que se constata en un talud o ladera cuando se efectúan calicatas o perforaciones.

Cuando se tiene el nivel freático en una ladera natural, el flujo ocurre debido a la diferencia de cargas. Así mismo cuando el agua aflora en el terreno (surgencia) la presión es cero. Si por razones antrópicas se obstruye esa salida de flujo, las cargas se incrementan, se eleva el nivel de máxima saturación, la ladera pierde su equilibrio natural y se vuelve inestable ya que las cargas son artificialmente mayores.

Al analizar el flujo en el sub suelo, en medios porosos, se ha determinado un parámetro de gran importancia que es el gradiente hidráulico, que se

define como la pérdida de carga dividida para el camino recorrido, se expresa así:

$$i = \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo la anterior, una sencilla relación que permite efectuar una primera valoración de la energía que tiene un flujo. Un gradiente de 1 o mayor permite determinar condiciones críticas de debido a que es capaz de generar erosión interna [48].

Mediante su experimento Darcy determinó su conocida Ley, para lo cual determinó que existe una relación proporcional entre el gradiente hidráulico, el área A de un conducto de flujo y el coeficiente de permeabilidad, siendo este último la velocidad v con la que ocurre el flujo dividida para el gradiente hidráulico, es decir:

$$k = \frac{v}{i} . \quad (\text{Ecuación 3})$$

La Ley de Darcy se expresó así:

$$Q = kiA \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para el caso de obras construidas en donde intervenga el flujo en medios porosos, se ha determinado el gradiente de Lane que es una relación

inversa al gradiente hidráulico i . La fórmula de Lane considera que la permeabilidad cambia del sentido vertical al horizontal en una relación de 3:1, de la siguiente forma [3] [48]:

Si se denomina D_h y D_v a las distancias horizontales y verticales que pueden recorrer una partícula de flujo, H la diferencia de carga, el número de Lane se determina así:

$$NL = \frac{1/3 \sum D_h + \sum D_v}{H} \quad (\text{Ecuación 5})$$

El autor de esta fórmula propuso que en materiales granulares el coeficiente mínimo de recorrido que determina la aplicación de la misma y para que no se produzca erosión interna, deben ser los siguientes: (Tabla VI)

| Descripción del suelo | Valor del NL |
|------------------------------|--------------|
| Arena muy fina o limo | 8.5 |
| Arena fina | 7.0 |
| Grava media | 3.5 |
| Cantos rodados con guijarros | 2.5 |

Tabla VI Coeficiente de recorrido en diferentes tipos de suelo. [48]

Otro parámetro deducido ha sido denominado como la fuerza de filtración, que es el producto del gradiente hidráulico i por el peso volumétrico del agua γ_w . Dado en unidades MKS, la densidad del agua es 1, el gradiente

hidráulico equivale indudablemente a la fuerza de filtración o fuerza por unidad de volumen, que actúa en dirección del flujo [3].

Cuando se produce el flujo en una masa de suelo que ha sido saturada, (la masa de suelo bajo el nivel freático), está sometida a dos fuerzas, una de ellas es la fuerza de filtración y otra es el empuje de Arquímedes que es una fuerza equivalente al volumen de suelo por la densidad del agua. Esta información es la que se considera para los análisis de estabilidad que se presentan posteriormente [3].

Un aspecto particularmente importante del análisis del flujo en suelos es la afectación que pueden sufrir las masas de suelo acumuladas artificialmente, en especial las construidas sin la aplicación de normas técnicas. Se trata de procesos de erosión interna de dichas masas que pueden incrementarse progresivamente. Hay dos fenómenos muy conocidos denominados tubificación y sifonamiento, este segundo constituye la condición más agravada de la tubificación. Una erosión interna muy intensa puede determinar, en ciertos casos, deslizamientos [26].

Para cuantificar una condición de erosión interna como las antes mencionadas, es importante comparar el gradiente hidráulico con el gradiente crítico, siendo este un parámetro que depende del tipo de suelo.

El gradiente hidráulico crítico i_c es la relación entre el peso sumergido γ' y el peso específico del agua γ_w y para el análisis de los efectos del flujo en medios porosos, debe ser comparado con el gradiente hidráulico. [26]

Finalmente, dado el análisis se presenta que para flujo laminar debe cumplirse el criterio adoptado en hidráulica, en el cual es que el número de Reynolds sea menor que 2100, de lo contrario se torna en turbulento afectando más la masa de suelos por los efectos erosivos [48].

3.2.Hidráulica de Rocas

Como ya se señaló en 1974, Claude Louis, luego de realizar su tesis Doctoral (1967) en la Universidad de Karlsruhe, Alemania, publicó en una revista de la Ecole des Ponts et Chaussez, de París Francia, después de hacer aplicaciones en varios proyectos de ingeniería, lo que denominó Hidráulica de Rocas [15].

Este análisis especializado considera que el flujo en los terrenos naturales, no sólo ocurre en medios porosos en los cuales se aplica la Ley de Darcy en suelos y rocas porosas, lo que implica flujo laminar, sino también en las discontinuidades siempre presentes en los macizos rocosos, de modo especial ocurre en las fracturas tectónicas y también en ciertas juntas de estratificación.

De acuerdo a la formulación de C. Louis el flujo total en una masa de roca, es la sumatoria del flujo en la matriz rocosa (en el caso de rocas porosas) más el flujo en las discontinuidades.

El análisis de la hidráulica de rocas se inicia con la consideración de si el flujo es en un medio continuo o discontinuo (C. Louis). El flujo en un medio poroso es un típico flujo en un medio continuo. Según el mencionado autor cuando una masa rocosa tiene una gran densidad de fracturación, en donde estas discontinuidades están muy próximas (a centímetros o decímetros de distancia), el flujo puede ser aun considerado como continuo. Esta última apreciación es particularmente interesante para el presente estudio ya que ciertos estratos rocosos de poco espesor están muy fracturados, por lo que, para analizar el flujo, también se puede aplicar la Ley de Darcy, teniendo en cuenta un camino de recorrido que sigue un plano, en función de la dirección de buzamiento y buzamiento de los estratos, además las cotas de ingreso y de salida del flujo, donde podría actuar el poder erosivo de un gradiente hidráulico alto.

Cuando las discontinuidades y en especial las fracturas tectónicas están espaciadas en distancias de más de 1m, el flujo debe ser considerado necesariamente en un medio discontinuo y de esta forma el flujo debe ser analizado en cada fractura y en las familias a las que se pertenecen.

Por otra parte, para efectuar el análisis en las fracturas, debe tenerse en cuenta que los conductos que se forman porque separan dos partes de la masa rocosa quedando una superficie que se puede aproximar como rectangular o paralela, que constituye el conducto que forma la fractura. En una vista de perfil y a dos dimensiones, se presentan las secciones de flujo en algunas posibilidades. (Figura 3.3)

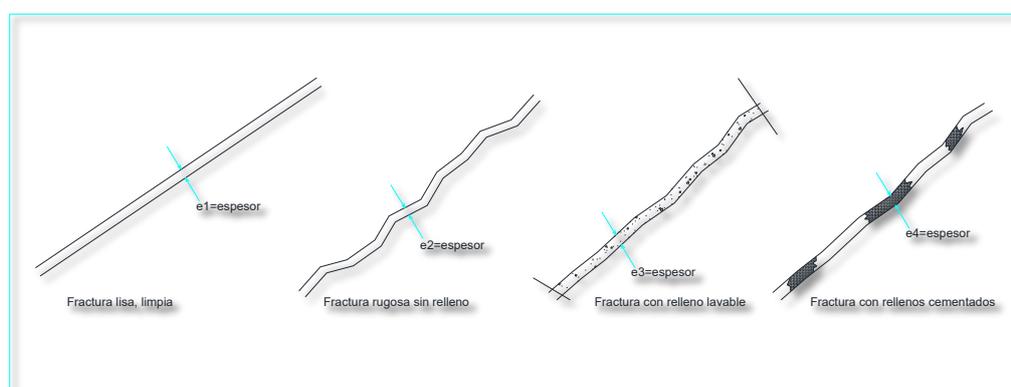


Figura 3.3 Posibilidades de fracturas abiertas de superficies lisas y rugosas, en ciertos casos con relleno. Se destaca como parámetro el espesor de las fracturas. [2]

El flujo que se produzca en una fractura lisa y limpia puede ser considerado idealmente como laminar, en un conducto de sección rectangular. Las fracturas por lo general son rugosas y en numerosos casos incluyen rellenos, que pueden lavarse. En otros casos cuando los rellenos son cementados, el flujo se dificulta o no ocurre, y así el flujo puede ser más bien turbulento.

Otra situación es la continuidad o persistencia de una fractura ya que en ciertos casos las superficies abiertas son intermitentes y son separados por matriz rocosa que no ha sido visiblemente cortada (Figura 3.4). Esto puede haber ocurrido en la naturaleza, cuando las superficies de los lados de una fractura no han sido totalmente separadas o cortadas como respuesta a los esfuerzos cortantes [3].

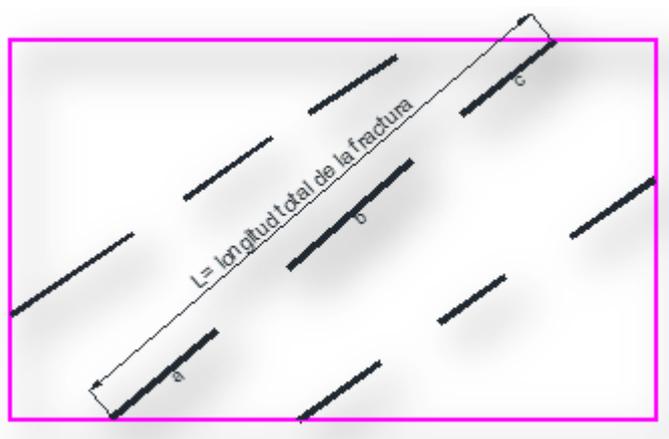


Figura 3.4 Familia de fracturas no continuas, de espesor variable, que se encuentran incluidas en la matriz rocosa delimitada por la línea violácea. [2]

La fractura que tiene una longitud total L , tiene tres tramos abiertos cuya suma de distancias es: $a+b+c$, siendo este valor menor que L . La persistencia es el cociente de la suma de los tramos abiertos dividido para la longitud total de la fractura. [2]

$$P = \frac{a+b+c}{L} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Consecuentemente, cuando ocurre el flujo en los macizos rocosos el agua puede circular por los poros de las rocas y por las fracturas abiertas; es posible deducir que la cantidad de flujo es mayor en las fracturas, cuando la matriz rocosa es poco permeable, este es el caso observado en las lutitas y limolitas del área de estudio.

En la figura 3.5 se presenta un diagrama de bloque formulado para explicar el flujo en macizos rocosos.

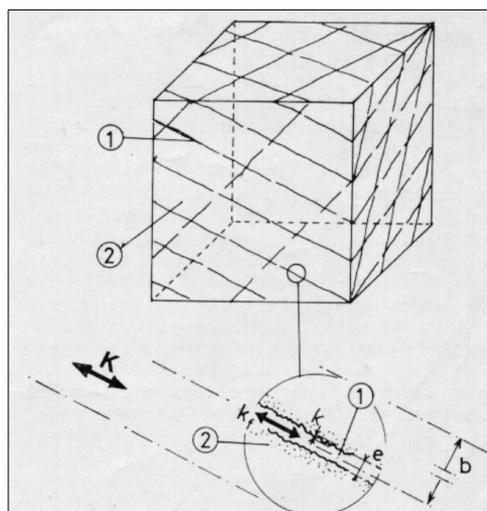


Figura 3.5 Parámetros hidráulicos de un macizo rocoso, fractura de una familia K_f , K_f Conductividad hidráulica de una fractura, K Conductividad hidráulica de una familia de fracturas. [13]

Conductividad hidráulica en una fractura.- Louis propuso determinar la conductividad hidráulica, término homólogo al coeficiente de permeabilidad (en los suelos y en general en medios porosos), teniendo en cuenta las características del flujo que se pueda tener. Para la

aplicación de las relaciones correspondientes se propone definir previamente, bajo qué criterios o análisis se considera que el flujo en una fractura sea laminar o turbulento. [15]

Louis propuso una relación experimental denominada rugosidad relativa en función de la altura de las asperezas o rugosidades de uno de los labios de la fractura sobre el diámetro hidráulico, que es el doble de abertura de la fractura. La rugosidad relativa se expresa así: [15]

$$K_r = \frac{k}{D_h} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\text{Donde } D_h = 2e \quad (\text{Ecuación 8})$$

Experimentalmente se determinó que el valor límite de la rugosidad para cambiar de flujo laminar a turbulento es 0.033, teniendo este valor el mismo efecto que el número de Reynolds en medios porosos.

De esta forma, al aplicar las relaciones de cálculo, se determina que para un valor de rugosidad relativa ≤ 0.033 , las ecuaciones a aplicar deben ser las correspondientes al flujo laminar, en tanto que para valores de rugosidad relativa > 0.033 , el flujo debe ser considerado turbulento y debe aplicarse las relaciones para ese tipo de flujo. [15]

Flujo laminar en fracturas.- C. Louis propuso las siguientes relaciones:

Además de las definiciones que se plantean en la figura 6, se tiene que la distancia entre fracturas es “b”, el espesor promedio de una fractura “e”, k el espesor de asperezas en el labio (superior o inferior) de la fractura, lo cual fue definido anteriormente. [15]

La rugosidad relativa antes mencionada debe ser calculada para cada fractura y así determinar si el flujo es laminar o turbulento, por lo que se aplican las siguientes relaciones:

En flujo laminar, la conductividad hidráulica la definió el autor así:

$$K_f = \frac{(k^e)g e^2}{12\nu C} \quad (\text{Ecuación 9})$$

De donde se tiene que:

g: gravedad

e: espesor o abertura promedio de la fractura

u: viscosidad cinemática.

La viscosidad cinemática “v” es la relación entre la viscosidad dinámica y la masa específica del fluido. En el agua la viscosidad cinemática decrece linealmente cuando decrece la temperatura.

Para definir el parámetro C de la anterior ecuación, se utiliza:

$$C = 1 + 8.8 \left(\frac{k}{Dh} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$k^{\circ} = \frac{\text{Superficie abierta}}{\text{superficie total}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

La relación anterior se denomina también persistencia, lo cual fue previamente definido; además en una fractura totalmente abierta el grado de separación es 1. Nótese que en la relación original de Louis, k° es igual a k. [15]

A un valor de 10° C $v=1.3 \times 10^{-6}$ m²/s a 20° C $v=1.0 \times 10^{-6}$ m²/s. Del gráfico obtenido de estos dos valores es posible calcular para cualquier temperatura. En el caso de la presente investigación se calcula la viscosidad cinemática a una temperatura del agua de 25°C.

Flujo turbulento en fracturas.-Para aplicar las siguientes ecuaciones, el autor plantea verifica previamente que la rugosidad relativa es mayor que 0.033: [15]

La conductividad hidráulica se define por:

$$Kf' = 4k^{\circ} \sqrt{ge} \log \frac{d}{K/Dh} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

$d=1.9$, valor del parámetro determinado experimentalmente por Louis.

Tal como en el caso del flujo laminar “g” y “e” son la gravedad y la abertura promedio de la fractura.

Conductividad Hidráulica Global.- Se determina considerando tanto el flujo en fracturas (Kf y kf') como el flujo en la matriz rocosa (Km), tanto para flujo laminar como para turbulento.

$$K = \frac{e}{b} Kf + Km \quad (\text{Flujo laminar}) \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$K' = \frac{e}{b} Kf' + Km \quad (\text{Flujo turbulento}) \quad (\text{Ecuación 14})$$

Velocidad de Flujo.- Es un parámetro que se determina tanto para flujo laminar como para flujo turbulento, en cada familia de fracturas, por lo que se tiene lo siguiente (15):

$$\text{En régimen laminar: } v=K Jf \quad (\text{Ecuación 15})$$

En régimen turbulento: $v' = K' J_f'$ (Ecuación 16)

Donde k_f y K_f' , las conductividades hidráulicas para flujo laminar y turbulento respectivamente; J_f y J_f' son los gradientes hidráulicos direccionales aplicables para los flujos laminar y turbulento.

La importancia que tienen los parámetros antes mencionados es que permiten valorar las posibilidades de erosión violenta que pueden ocurrir en las discontinuidades con relleno, debido a gradientes hidráulicos elevados y al tipo del flujo, esto puede ocurrir cuando se hacen cortes de talud.

Contrariamente, también se pueden evaluar las posibilidades de drenaje del agua acumulada internamente, que constituye un factor estabilizador ya que se alivian las presiones internas por la acumulación de agua en el macizo rocoso.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE DESESTABILIZACIÓN RELACIONADOS AL AGUA.

4.1.Deslizamientos

Son fenómenos geodinámicos de movimientos de masas de suelos, roca bien meteorizada y deteriorada, pueden tener diferentes características y ocurren por diferentes causas, siendo las más importante y frecuente la acción de las aguas lluvia, ya que se ha determinado que los fenómenos de El Niño son los que más generan deslizamientos [54]. Evidentemente los sismos también constituyen un detonante importante de los movimientos de masas [20].

En la actualidad se ha concordado en denominar deslizamiento a todo tipo de movimientos de masas que involucre deslizamientos propiamente dichos, caída de masas (que involucra un deslizamiento previo), flujos, derrumbes, avalanchas, volcamientos y hundimientos [2].

Cuando los deslizamientos ocurren en materiales sueltos, pueden ser lentos como las reptaciones y violentos como los aludes. La acción del agua es la que produce la velocidad en los aludes y estos se denominan flujos de lodo cuando arrastran suelos finos, clastos y guijarros e inclusive bloques de rocas, a gran velocidad y como mucha energía destructiva [63 y 64].

Detalles previos a la ocurrencia de un deslizamiento.- Se observan grandes grietas y protuberancias ligadas (escarpas), fisuras en las construcciones adyacentes y en muros de contención, los árboles y postes empiezan a inclinarse. Las laderas empiezan a deformarse formando montículos y barrigas [20].

Las vertientes de agua pre existentes desaparecen de su sitio natural y aparecen en otros.

Los flujos, frecuentemente presente en áreas tropicales, tienen diferentes connotaciones, entre ellas: flujo de derrubios, flujo de bloques, flujo de arena colada, colada de barro, colada rápida de tierra

Varnes [64] propuso, que los flujos pueden tener las siguientes velocidades de movimiento y determinó también una escala para su clasificación, lo que se muestra en las figura 4.1 y la tabla VII.

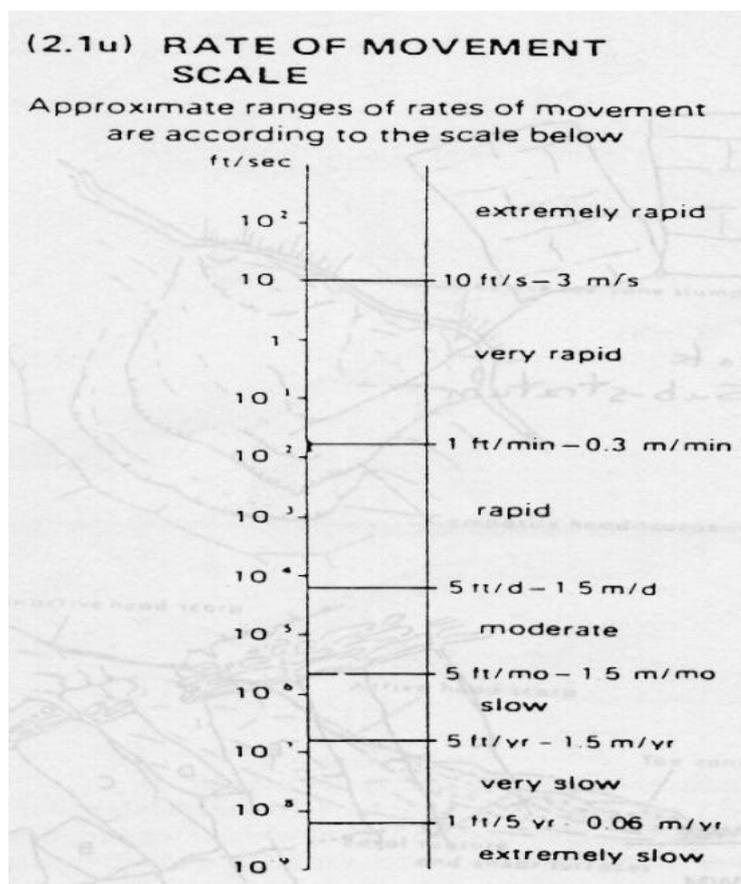


Figura 4.1 Escala de velocidad de movimientos en masa. [64]

| Class | Description | Example | mm/sec |
|----------|-----------------|------------|----------------------|
| 7 xxx | Extremely rapid | 1-7 | |
| | | 5 m/sec | 5×10^3 |
| 6 | Very rapid | 8 | |
| | 100 | 3 m/min | 50 |
| 5 | Rapid | 9 | |
| | 100 | 1.8 m/hour | 0.5 |
| 4 | Moderate | 10 | |
| | 100 | 13 m/month | 5×10^{-3} |
| 3 | Slow | 11,12 | |
| | 100 | 1.6 m/year | 50×10^{-6} |
| 2 | Very Slow | 13-16 | |
| | 100 | 16mm/year | 0.5×10^{-6} |
| 1 | Extremely Slow | | |

Tabla VII Clasificación de los movimientos en masa en función de la velocidad del movimiento. [64]

Los flujos de derrubios son de dos tipos:

- a. Movimiento muy rápido: mecanismo catastrófico, reducción de la fricción interna en pendientes fuertes y disminución de la resistencia al deslizamiento de los materiales sobre el sustrato rocoso. Al llegar a una superficie menos inclinada, horizontal o en contrapendiente, hay un aumento repentino de la fricción interna y disipación rápida de la energía cinética y en consecuencias una acumulación de la masa al pie de la ladera.

- b. Movimiento lento: El movimiento se origina debido a la caída de rocas y las masas de derrubios se desplazan lentamente.

Varnes [64] realizó la siguiente explicación gráfica. (Figura 4.2)

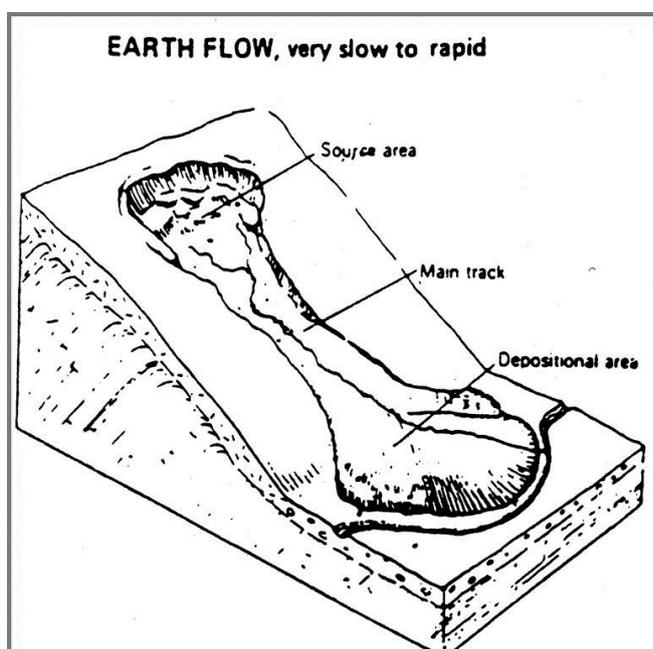


Figura 4.2 Deslizamiento tipo flujo. [64]

Los flujos tipo colada tiene las siguientes características [64]: Este movimiento de masas se debe a la saturación del agua de las altas y frecuentes precipitaciones, que incluyen carga, generando una disminución del ángulo de fricción interna y el aumento de la presión intersticial.

Debido a las fuertes pendientes y topografía abrupta, una masa heterogénea puede desarrollar grandes velocidades y por tanto una alta energía cinética. En ocasiones se considera que ocurre solifluxión.

Los suelos y rocas muy meteorizadas que tienen alta relación de vacíos son susceptibles de entrar en este movimiento. La masa está compuesta por finos mezclados con guijarros y bloques. Cuando el movimiento violento ocurre, deja una gran huella en el fondo y los costados.

En el caso de los deslizamientos propiamente dichos.- La superficie de ruptura sigue una dirección preferencial, se producen grietas de tracción en la corona del talud o ladera, el movimiento incluye masas de suelo roca y fragmentos, al pié se observan deformaciones en donde la superficie puede ser plana o semi circular, además el movimiento puede ser lento o violento. En la figura 4.3 se presenta un esquema de deslizamiento propuesto por Varnes.

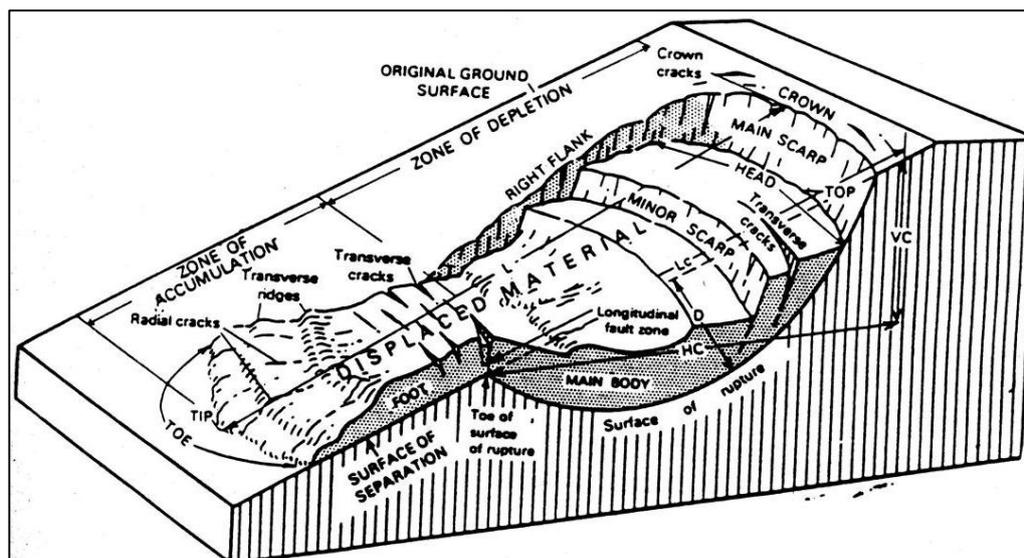


Figura 4.3 Elementos y partes de un deslizamiento. [64]

Se considera que además de la acción evidente del agua, los elementos detonantes de los deslizamientos pueden ser los siguientes:

- a. Rotura de tuberías.
- b. Derretimiento de nieve y hielo (no existentes en el área de estudio).
- c. Disminución de la fricción.
- d. Aumento de sobrecarga en la cresta de los taludes.
- e. Vibración por sismos, voladuras, etc.
- f. Cortes al pie de los taludes y laderas

4.2.Erosión

La erosión es un fenómeno bastante generalizado y que se debe especialmente por las acciones antrópicas como: deforestación, desbroces y limpieas (eliminación de la vegetación y suelos arcillosos), excavaciones, cortes y rellenos sin control técnico.

La erosión se inicia con el impacto de las gotas de lluvia, las corrientes de agua se acumulan progresivamente y adquieren mayor poder erosivo. El cambio de la dirección del drenaje natural cuando se han realizados movimientos de tierra (excavación, desalojo y rellenos), es otra de las causas del desarrollo de los procesos erosivos. A continuación se presenta la figura 4.4 [20].

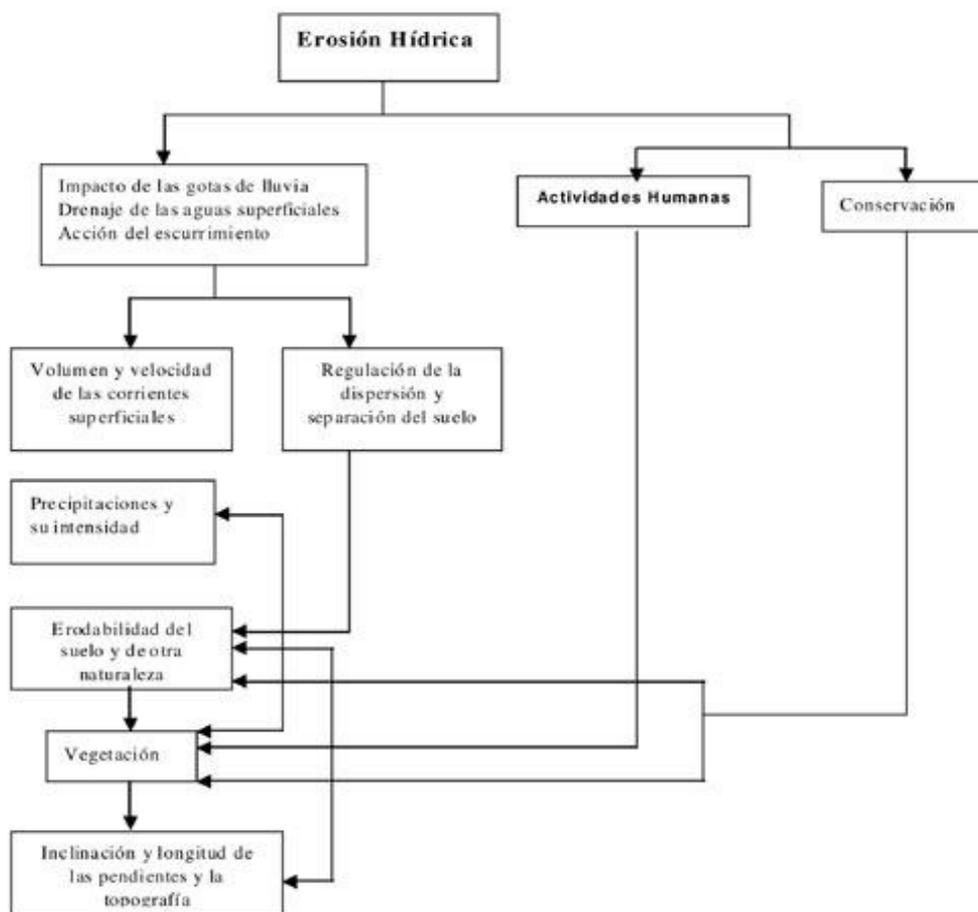


Figura 4.4 Explicación esquemática de los procesos erosivos debidos a la acción del agua. [20]

Valoración de la erosión (Wischmeier y Smith, 1978)

Los aspectos que determinan la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE) pueden mostrarse como: [69]

Riesgo de erosión del suelo = f (Factores socioeconómicos, Factores físicos)

Factores socioeconómicos, dependen del manejo de la tierra tales como: prácticas de conservación y manejo de los cultivos.

Factores físicos, dependen de los procesos naturales tales como: intensidad de las precipitaciones, erodabilidad del suelo, pendiente del terreno. A continuación se presenta la ecuación USLE (Wischmeier y Smith, 1978):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Los términos de esta relación se describen así:

A: la media anual de las pérdidas de suelo (ton/ha/año)

R: factor de la erosividad de las precipitaciones (MJ/ha/mm/año)

K: factor de la erodabilidad del suelo (ton/MJ/mm)

L: factor de la longitud de la pendiente

S: factor del gradiente de la pendiente

C: factor del tipo de manejo de los cultivos

Cuando se trata de la erosión en un área considerada como unidad de superficie la hectárea, se ha realizado la siguiente caracterización por el riesgo de erosión en toneladas por hectárea por año y su equivalencia en milímetros por año. (Tabla VIII)

| Riesgos de erosión | Pérdidas (t/ha/y) | Pérdidas (mm/ha) |
|--------------------|-------------------|------------------|
| Muy bajo | 0-2 | 0-0.15 |
| Bajo | 2-5 | 0.15-0.38 |
| Tolerable | 5-10 | 0.38-0.77 |
| Alto | 10-20 | 0.77-1.54 |
| Muy alto | >20 | > 1.54 |

Tabla VIII Valoración de la erosión. [69]

4.3. Procesos de desestabilización mixtos

Se trata del caso en el cual la desestabilización se inicia con los procesos erosivos externos e internos, que generalmente ocurren en las masas de suelo, como paso previo a la ocurrencia de deslizamientos.

De las observaciones efectuadas se deduce que la erosión superficial o externa puede llegar a generar zanjas profundas y cárcavas, por lo que las paredes de dichas socavaciones colapsan progresivamente, removiendo cada vez más materiales. (Figura 4.5)

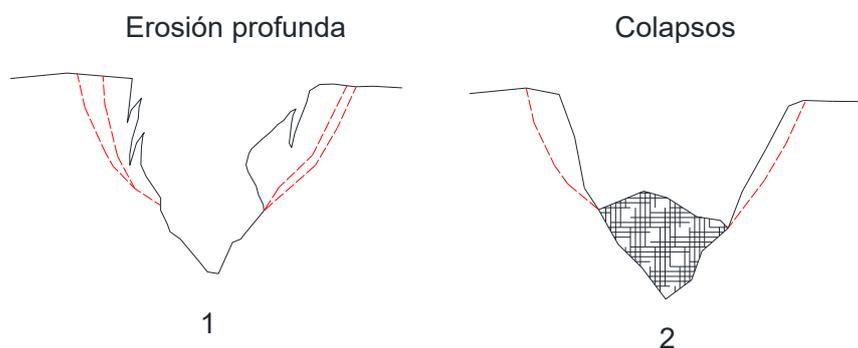


Figura 4.5 Secciones típicas del proceso de erosión superficial profunda, con pendiente abajo, colapsos laterales, acumulación de materiales y posterior alud.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Cuando estos materiales sueltos se acumulan y se saturan con el agua pueden generar aludes de lodos que tienen gran energía y hasta pueden afectar viviendas, calles e inclusive las denominadas obras básicas.

La erosión hídrica interna, antes descrita, al generar espacios vacíos de todas las dimensiones, puede ocasionar colapsos y al mismo tiempo retener grandes volúmenes de agua, que con la presión que alcanzan pueden movilizar deslizamientos violentos, que como en el caso anterior se clasifican como aludes.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD E INCIDENCIA DEL AGUA EN EL FACTOR DE SEGURIDAD

5.1. Rocas fracturadas

Quando las rocas están fracturadas se tienen las siguientes posibilidades de deslizamientos [57]:

- a. En superficies planas
- b. En Cuña
- c. Hundimiento de masas
- d. Caída de paquetes rocosos
- e. Caída de grandes bloques

- f. Movimiento rotacional
- g. Deslizamiento de derrubios
- h. Dislocación de estratos

Cuando se trata de rupturas planas, se tiene lo siguiente, en términos generales:

- a. El rumbo de la discontinuidad es paralelo al rumbo del talud.
- b. La discontinuidad buza con un ángulo menor a la pendiente del talud.
- c. El ángulo de fricción interna es menor que el buzamiento de la discontinuidad

Se esquematiza el deslizamiento plano así: (Figuras 5.1 y 5.2)

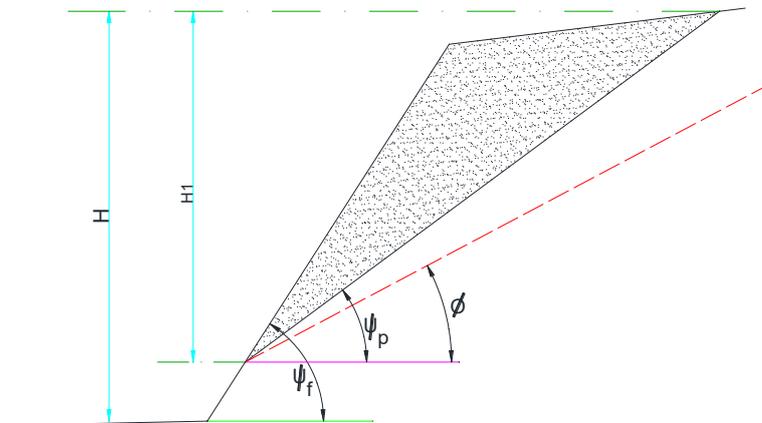


Figura 5.1 El deslizamiento ocurre en estas condiciones: $\psi_f > \psi_p > \phi$ [3]

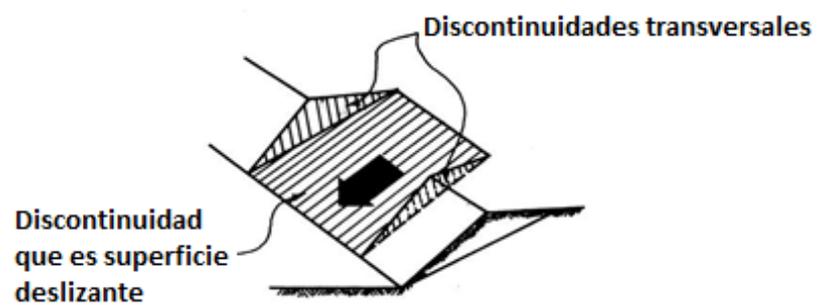


Figura 5.2 Discontinuidades que intervienen en un deslizamiento plano. [3] [57]

Los deslizamientos por cuñas ocurren, en general, cuando las discontinuidades se intersectan según una línea, la cual se inclina en la misma dirección que la pendiente del talud.

El ángulo de inclinación de esta línea, es menor que la pendiente del talud en esa dirección. El ángulo de fricción en las discontinuidades es menor que la inclinación de la línea de intersección.

En la figura 5.3 se presentan dos casos de deslizamientos por cuña.

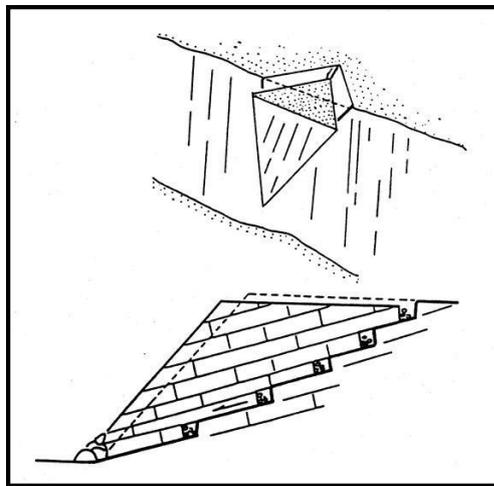


Figura 5.3 Deslizamiento por cuñas. [57]

Deslizamiento de paquetes de roca [64] ocurren como lo que se muestra en la figura 5.4. Las causas principales son:

- a. Los planos de deslizamientos están constituidos por uno o varios estratos cuyo buzamiento es ligeramente menor a la pendiente del talud.
- b. El agua de lluvia lubrica el contacto.

- c. La masa desarrolla grandes niveles de energía y velocidad, fluye como un torrente de derrubios.
- d. Los fragmentos se remontan sobre la ladera opuesta donde se depositan.
- e. Hay un aumento de la fricción debido a la disminución de la velocidad

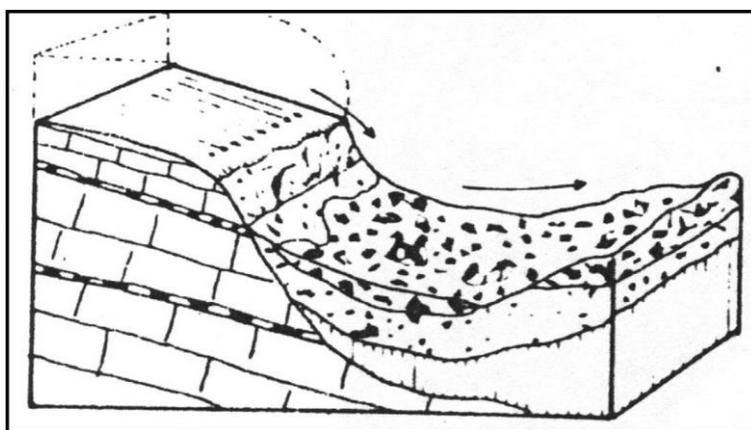


Figura 5.4 Deslizamiento de paquetes de estratos. [64]

Otro caso es el deslizamiento por bloques que ocurre por lo siguiente [64]:

- a. Deslizamiento lento de grandes bloques, compactos, sin perturbación de la pendiente original sobre planos poco inclinados.
- b. Es posible una fragmentación en elementos más pequeños según planos de deslizamientos secundarios.

- c. El deslizamiento de los fragmentos es menor que el de los bloques principales.
- d. En el pié ocurre una dislocación en forma de colada de derrubio que se desplaza lentamente.
- e. Está limitado lateralmente y detrás por grietas y fracturas tectónicas.
- f. Se desarrolla siguiendo la dirección de la foliación y/o estratificación.
- g. Entre las causas principales está la absorción de agua proveniente de lluvia, rotura de tuberías, etc.

En la figura 5.5, se muestra un caso típico de deslizamiento de grandes bloques de roca.

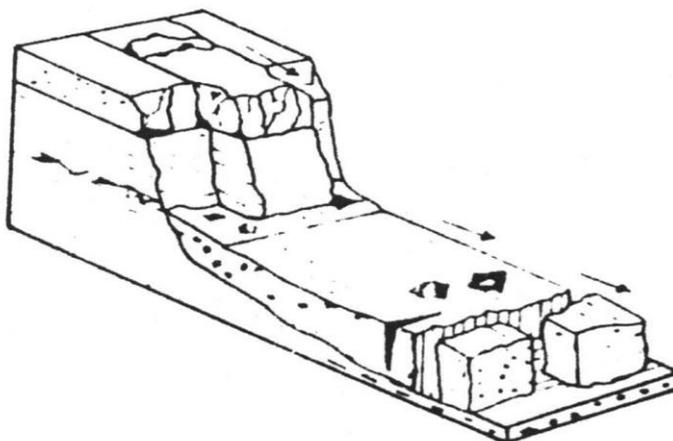


Figura 5.5 Deslizamiento en bloques del macizo rocoso. [64]

Deslizamientos rotacionales.- En estos casos La parte superior de la ladera colapsa según una superficie curva con la convexidad hacia adentro.

El desequilibrio provocado por el primer deslizamiento origina otros movimientos sucesivos hacia arriba. [64]

En la parte inferior, la lengua del desplazamiento toma la forma de una colada de derrubio, debido a la presencia del agua en todo el deslizamiento.

En la figura 5.6, se presenta la explicación de Varnes sobre los deslizamientos rotacionales.

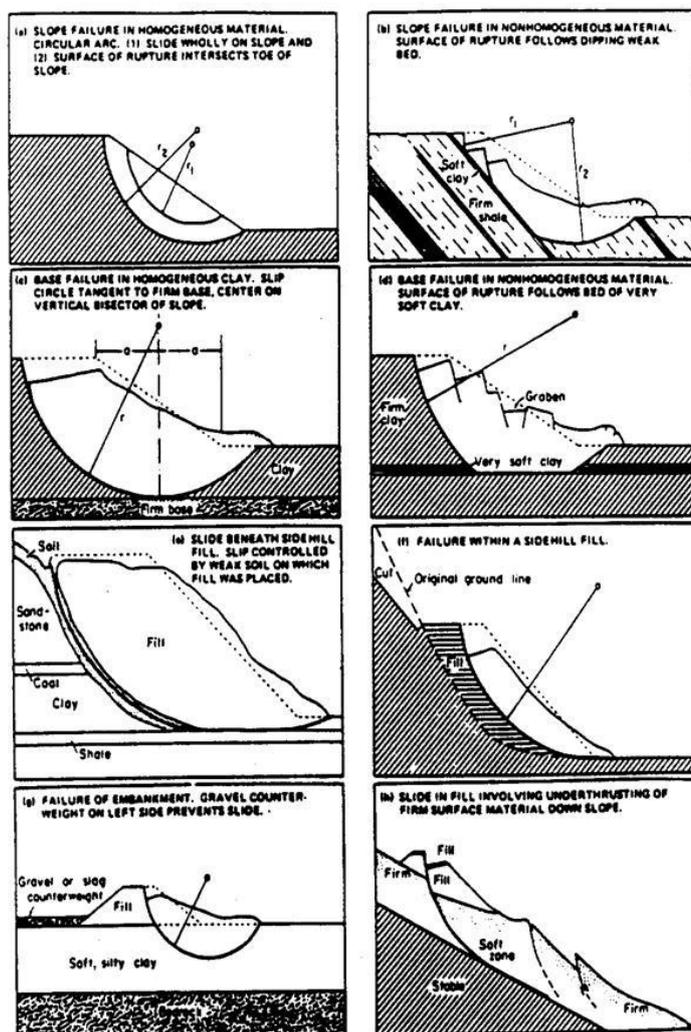


Figura 5.6 Deslizamientos rotacionales en diferentes condiciones. (64)

Derrumbes.- Es el desplazamiento súbito de masas, mediante caída libre o deslizamiento a gran velocidad. La masa en movimiento se dispersa completamente por el impacto y no se origina una superficie de deslizamiento definida. La superficie de falla no sigue una dirección preferencial.

Se producen caídas de bloques a gran velocidad los cuales giran sobre sí mismos y rebotan con proyección y poco rozamiento entre ellos. Hay nubes de polvo y se escuchan ruidos estruendosos. Por el impacto se generan corrientes de aire turbulento y destructivo. (Figura 5.7)

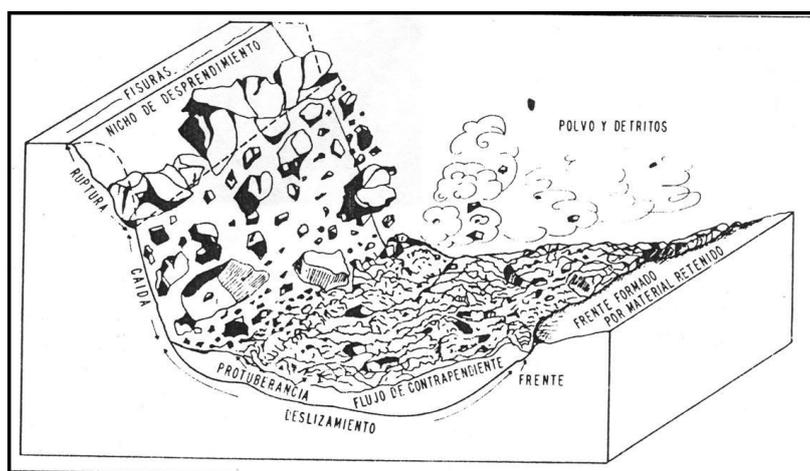


Figura 5.7 Caída de bloques de roca. [64]

5.2. Rocas meteorizadas

Debido a que ha ocurrido pérdida de la cobertura de suelos, en vertientes donde la pendiente es ligeramente superior al ángulo de fricción del suelo que existe sobre la roca meteorizada. [20]

Los productos de la meteorización son arrastrados aguas abajo en forma de coladas.

Las velocidades de flujo pueden ser elevadas y el espesor de la masa en movimiento también puede ser considerable. La humedad natural de los materiales finos, debido a la saturación, sobrepasa el límite líquido con lo que cambian su estado de consistencia. [20]

La masa puede transportar bloques grandes en suspensión sin redondearlos, la roca queda descubierta al perder su cobertura. En la Foto 12 se presenta un deslizamiento ocurrido en roca meteorizada.



Foto 12 Deslizamiento de la capa meteorizada ocurrida en el sector Bastión Popular.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

5.3.Suelos residuales y coluviales

En el sub capítulo 3.2 se presenta una explicación detallada de los tipos de deslizamiento que pueden ocurrir en los cuerpos de suelos coluviales

que incluyen también los suelos residuales que se han erosionado y acumulado en las partes bajas, por efectos de la erosión y transporte.

Dado que se conoce que los cuerpos coluviales pueden tener grandes volúmenes y son bastante heterogéneos [1].

Es importante destacar que los cuerpos coluviales determinan una topografía característica y cuando son excavados se desestabilizan afectando a las obras que se construyen. (Figura 5.8)

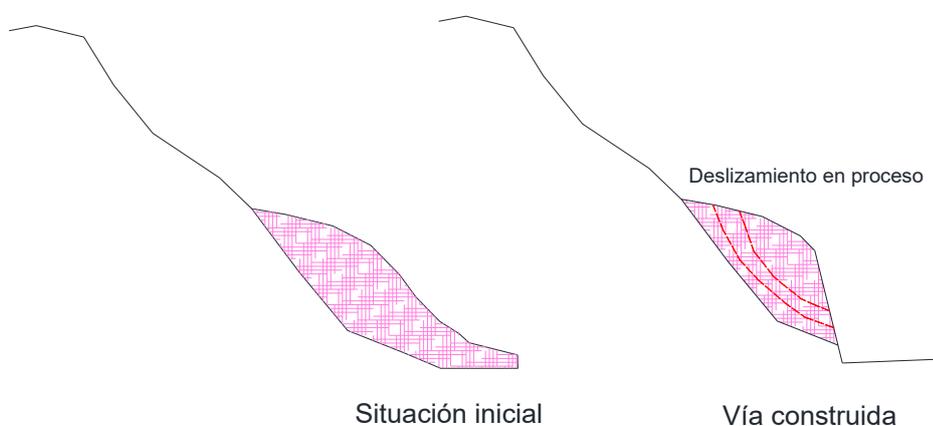


Figura 5.8 Cuerpo de suelos coluviales y su desestabilización mediante un corte para construir una vía.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

CAPÍTULO 6

6. SOLUCIONES GEOTÉCNICAS PARA CONTROLAR LOS EFECTOS DEL AGUA

6.1. Soluciones de drenaje superficial

Debido a que la escorrentía superficial provoca erosión y altera el equilibrio de las laderas, el manejo y control del flujo de las aguas lluvia es fundamental para lograr la estabilidad de las pendientes o laderas [20].

El concepto de partida es devolver a la naturaleza su requerimiento de drenaje, mediante obras que reemplacen a los cauces naturales, quebradas u hondonadas, y que conduzcan el agua a sitios donde ésta no altere el equilibrio, en especial de las masas de suelo.

Además de controlar la erosión, se debe evitar la infiltración al interior de las masas de suelo, para evitar el incremento de presiones intersticiales.

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, la construcción de canales interceptores del drenaje natural, revestidos con hormigón, suelo cemento o geomembrana, esto es, que no permitan la infiltración, constituye una buena solución. Es importante tener en cuenta que las soluciones denominadas cunetas de coronación deben cumplir el objetivo de captar el drenaje de las partes más altas, en caso contrario no tienen ningún sentido su construcción.

En la Figura 6.1 se presenta una solución de desvío de drenaje.



Figura 6.1 Solución de desvío de drenaje que ingresa a un área afectada.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Otra solución se presenta en la Foto 13 para controlar la erosión de finos que pueden acceder a una calzada. Es importante valorar la efectividad de esa solución en función del área que se está erosionando.



Foto 13 Control de la erosión de materiales finos sobre una calzada.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Para el caso en el cual se deba drenar y conducir flujos, controlando la energía de los caudales, se han formulado dos interesantes soluciones denominadas escalinata canal y canal escalinata [22] (Figura 6.2)

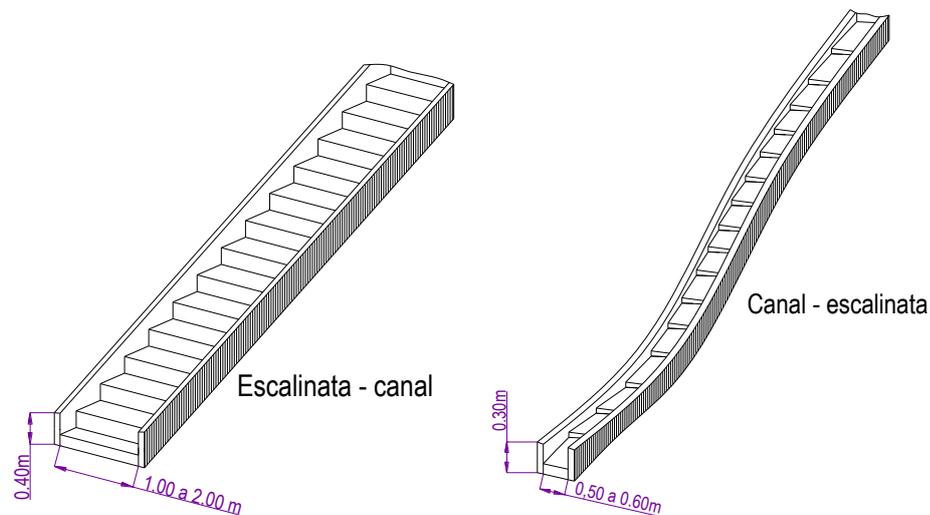


Figura 6.2 Solución para conducir el agua en laderas reduciendo la energía y por tanto sin generar erosión. [22]

La erosión interna y externa también puede generar la caída de bloques, dependiendo de las dimensiones y peso de estos se pueden optar por diversas soluciones.

En el caso en el cual los bloques de roca o cuñas que se desprenden, pesan algunas toneladas y que amenazan a vidas humanas, una de las mejores soluciones es construir bulones, ligarlos a mallas electro soldadas y lanzar una capa protectora de hormigón proyectado. De ser necesario también se deben construir drenes para aliviar presiones de agua. (Fotos 14 y 15)

Cuando los bloques de roca son de pequeñas dimensiones, prácticamente como guijarros, se pueden utilizar los geomantos, los mismos que son capaces de retener esos materiales. (Foto 16)

Otra posibilidad de solución de caída de bloques de pocas dimensiones y que no exista demasiada energía liberada, consiste en construir franjas de seguridad dotadas de una trinchera de suelos arcillosos para que amortigüen la caída de dichos bloques y no se dirijan a los costados. En la figura 6.3 se muestra las características generales de la solución que se propone.



Foto 14 Estabilización de un talud donde se habían caído grandes bloques de roca.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis



Foto 15 Corte de un talud de 80° y estabilización mediante bulones anclados, malla electro soldada, drenes filtro y una capa de hormigón proyectado.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis



Foto 16 Geomanto para controlar la caída de fragmentos de roca meteorizada.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

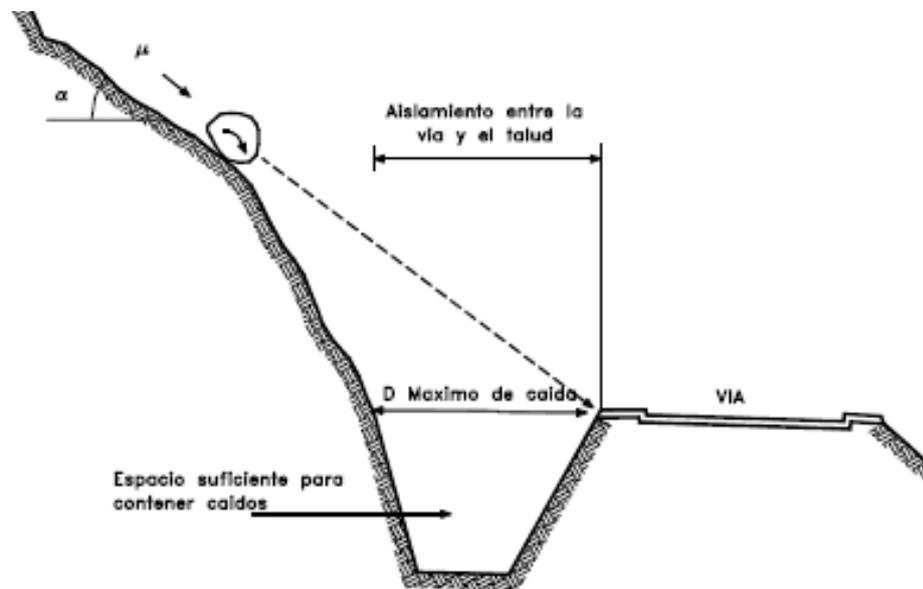


Figura 6.3 Solución para caída de bloques. La trinchera también puede incluir arcilla en el fondo para amortiguar la energía que traen los bloques. [50]

6.2.Soluciones de drenaje sub superficial y subterráneo

Se conoce que el flujo sub superficial y subterráneo generara problemas de estabilidad ya que además de generar erosión interna puede ocasionar incrementos peligrosos de cargas de agua, que pueden inclusive producir movimientos de masas. [3]

La finalidad de las soluciones debe ser evitar la erosión interna generada por los gradientes hidráulicos moderadamente elevados [20].

Es importante puntualizar que antes de construir otra solución estabilizadora es necesario efectuar el control del drenaje superficial [20].

Para el control del drenaje sub superficial se deben construir drenes en forma de zanjas o trincheras alargadas. Para que los drenes trabajen debidamente es necesario que dispongan de filtro para evitar la erosión de finos. En la actualidad los geotextiles funcionan bastante bien como filtros. (Figura 6.4)

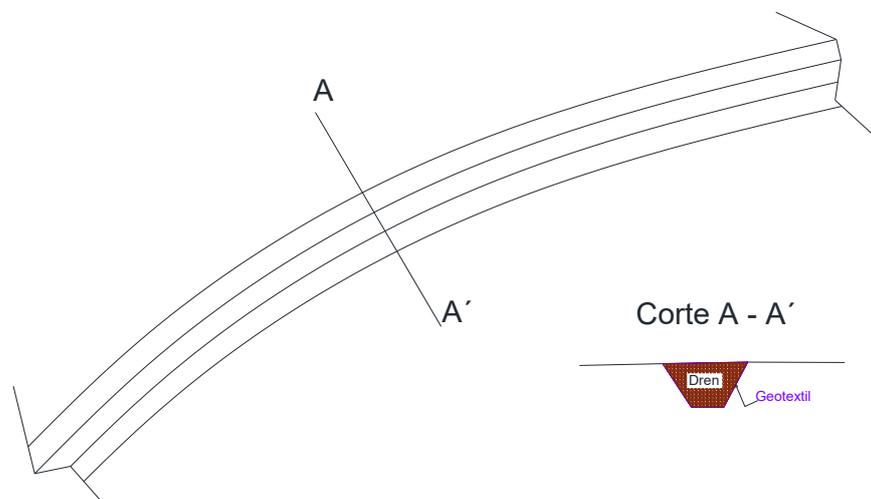


Figura 6.4 Dren de zanja dotado de geotextil como filtro.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Para reducir la energía del agua con sedimentos en los canales de drenaje se utiliza con cierta frecuencia el sistema que se presenta en la Foto 17, que es una estructura transversal de hormigón. Cuando hay pocos sedimentos y más agua que drenar, puede ser utilizada la geomembrana HDPE de 1 mm o más, con la finalidad de construir canales con escalones para reducir la energía.



Foto 17 Canal con sistema de retención del agua sedimentos y reducción de la energía.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Otra solución que permite el drenaje sub superficial y profundo son los sub drenes horizontales o inclinados que consisten en una perforación de máximo 40 mm de diámetro, dotada de un tubo y un sistema de dren filtro, para interceptar las líneas de flujo y drenar el agua acumulada.

Para el drenaje profundo también se pueden construir galerías drenantes y en estas sub drenes colocados radialmente.

6.3.Soluciones de mitigación en infraestructura construida

Es bastante difícil determinar soluciones en áreas inestables que incluyen infraestructura sobre un terreno dudosamente habilitado o adecuado para fines urbanísticos, en asentamientos irregulares.

El problema principal es que es muy difícil conocer las condiciones iniciales que fueron modificadas para construir las obras. Además no se conoce o no existen reportes técnicos de las “adecuaciones” efectuadas, ya que en muchos casos son excavaciones y rellenos sin control técnico.

La acción del agua superficial y profunda, que incluye el incremento de presiones intersticiales en los suelos arcillosos, en esos tipos de situaciones es prácticamente incontrolable y además no valorable, por lo que lo único que resta es realizar una evaluación de los daños ocurridos a través del tiempo y debido a la ocurrencia de precipitaciones.

Las observaciones de campo pueden determinar sitios de hundimiento o colapsos, inclusive inicios de deslizamientos, cuando se tienen escarpas, esto es grietas con sus caras a diferente altura. La geofísica puede ser un método geotécnico para detectar las irregularidades en el sub suelo.

(Figura 6.5)

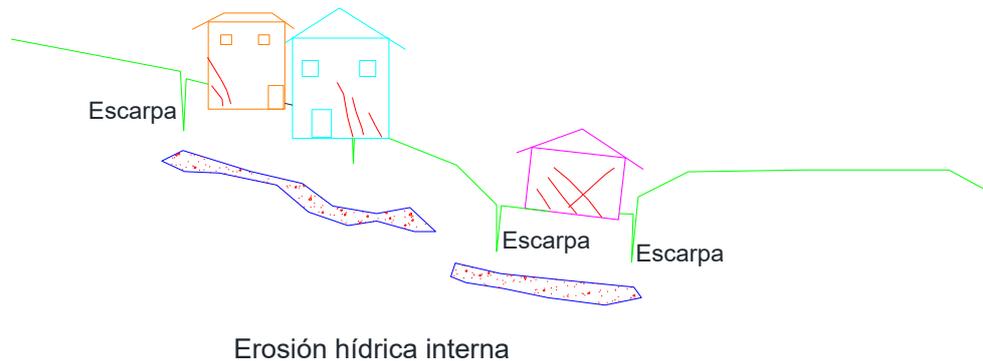


Figura 6.5 Acción del agua en un relleno sin compactar y efecto en la infraestructura.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Luego de que se determine la situación existente, la primera solución debe ser bloquear o controlar el flujo de aguas superficiales y subterráneas, que evidentemente son las causantes de los problemas de erosión interna, incremento de las presiones intersticiales en los suelos arcillosos y en general el desequilibrio.

Una segunda medida debe ser reparar las tuberías, cunetas, canales dañados eliminar los pozos sépticos si estos existieran. Además se debe impermeabilizar las grietas utilizando suelo cemento (material que admite pequeñas deformaciones).

En cuanto a soluciones es importante construir un control de infiltraciones, el cual se aplica definiendo previamente el área de máxima infiltración, que generalmente es un área muy erosionada o que ha sido afectada por excavaciones, que han eliminado los suelos arcillosos impermeables [20].

Entonces se establece que existiendo una recarga anómala, sube el NF, a tal punto de generar condiciones de inestabilidad, la solución que se requiere es la impermeabilización total o parcial, lo que está en función del grado de afectación sufrido por las masas transformadas en inestables y la importancia que tienen respecto a la presencia humana con sus intereses comunitarios.

Pueden darse en este primer tipo de solución, el empleo de geosintéticos como la geomembrana, combinando con la utilización de suelo cemento, para disminuir costos. Esta solución debe estar en concordancia directa con las soluciones de drenaje, de tal manera de no generar concentraciones de caudales que provoquen erosión profunda [20].

El bloqueo progresivo del flujo es posible realizar mediante la construcción de pantallas de intersección de flujo que son trincheras excavadas, dotadas de una cortina impermeable que puede estar integrada por una lámina de geomembrana impermeable y por el mismo suelo de excavación que debe ser re compactado [20].

Esta solución requiere de una solución de drenaje en el sentido del desarrollo de la trinchera, para que eventualmente exista una descarga lateral, controlada, del flujo. (Figura 6.6)

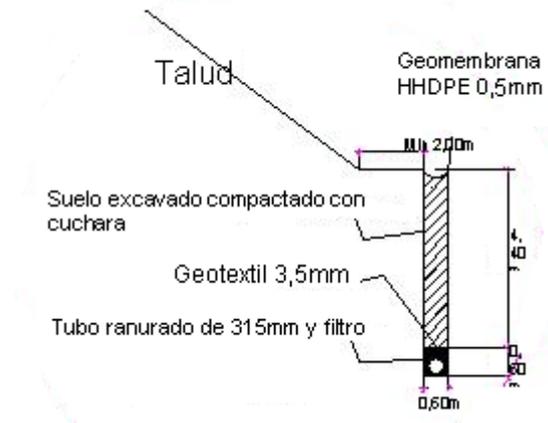


Figura 6.6 Diseño de una pantalla de intersección de flujo.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Finalmente, es recomendable no construir estructuras pesadas, demoler y desalojar las viviendas que han sido afectadas.

CAPÍTULO 7

7. ESTUDIOS DE CASOS.

7.1.Deslizamientos en suelos y rocas muy meteorizadas

Deslizamiento del Cerro Azul.- Es un gran deslizamiento ocurrido en los bordes del área urbana de la ciudad de Guayaquil durante el fenómeno de El Niño de 1998. El deslizamiento generó una gran desplazamiento de escarpa cuya altura es de 47.50 m. Se ha estimado que este movimiento de masas generó un volumen de aproximadamente 350.000.00 m³ de materiales llegando y afectando a la vía Perimetral. La ESPOL mediante su Facultad FICT [31] efectuó los estudios y diseños de estabilización para lo cual se efectuaron sondajes geofísicos y también prospección geomecánica que incluyó el muestreo de los materiales (suelos y rocas) que intervinieron en dicho fenómeno geodinámico.

Para efectos de demostrar la incidencia del agua, en la presente tesis se efectúa un análisis similar al realizado para ese informe técnico. Se parte del enfoque de que las discontinuidades del macizo rocoso que son la estratificación y las fracturas tectónicas, fueron las que realizaron un control estructural del deslizamiento mediante la acción del agua.

El agua a través de la presencia del nivel freático, muy elevado, por la ocurrencia del Fenómeno de El Niño, generó presiones hidrostáticas que se constituyeron en el factor detonante [20] para la movilización de la masa deslizante. Para describir con mayores detalles la situación ocurrida, se ha elaborado el análisis que se muestra a continuación.

Condiciones previas al deslizamiento.- Según se deduce de interpretación de la topografía del Cerro Azul, antes de construirse la vía Perimetral, existían condiciones naturales de estabilidad ya que se aprecia una pendiente bastante constante. Dichas condiciones fueron afectadas por acciones de deforestación y en forma más directa con la excavación de los taludes, justamente al pie de la ladera [31].

Se incluye en el informe de referencia que los taludes de corte habían sido excavados en el depósito coluvial que existe al pie de la ladera. Esta acción pudo haber generado los primeros desplazamientos de las masas de suelos y guijarros presentes en el coluvial. Según se conoce previo al

gran deslizamientos se habían ya producido, en años pasados, varios hundimientos y deslizamientos en el pavimento de la vía Perimetral en abscisas muy cercanas a las del deslizamiento.

Para enfocar el problema se hace constar el levantamiento topográfico efectuado en los citados estudios, en 1998 (Figura 7.1), en donde se observa la planta topográfica del cerro afectado y la ubicación de los perfiles en el sentido longitudinal del deslizamiento. Las líneas rojas son demarcaciones de los últimos descensos de los materiales deslizados.

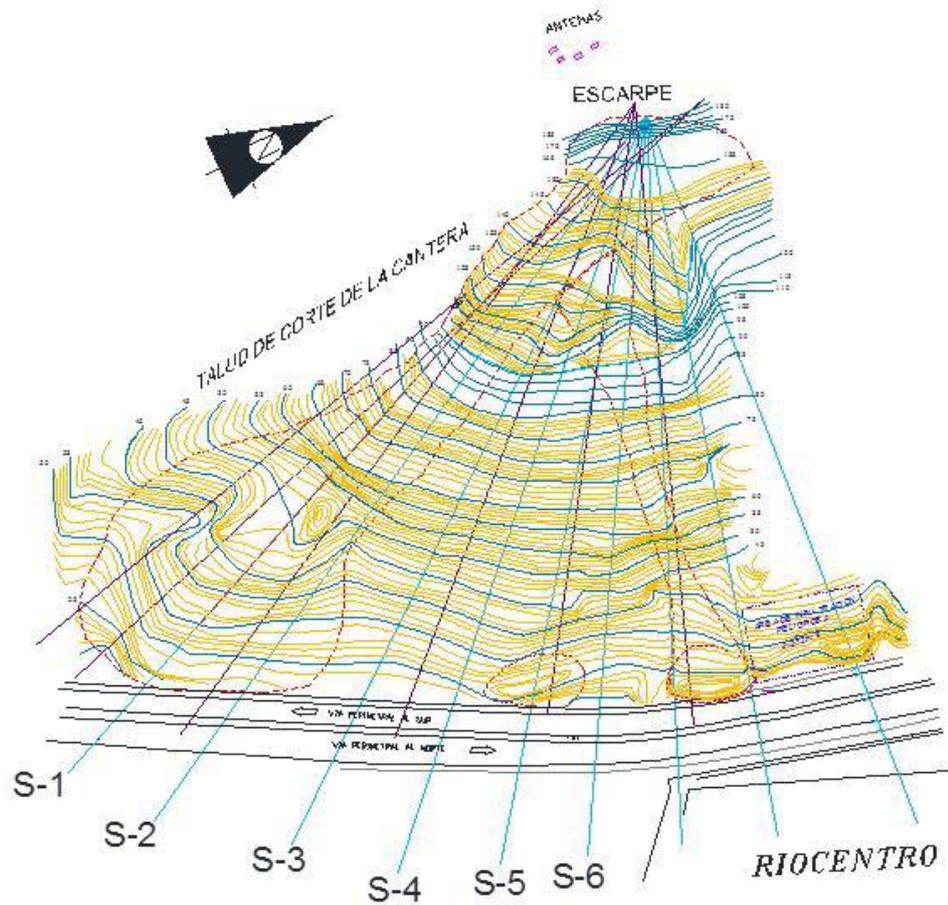


Figura 7.1 Planta topográfica con la ubicación de varios perfiles en el sentido del deslizamiento. [31]

Para efectuar los análisis se hizo énfasis el perfil S-6 debido a que presenta variaciones importantes en el perfil del terreno, después de que ocurrió el deslizamiento. Adicionalmente partiendo de la topografía existente antes de que ocurriera el deslizamiento ubicando las coordenadas del mismo perfil S-6, fue posible obtener el perfil del terreno natural antes del deslizamiento.

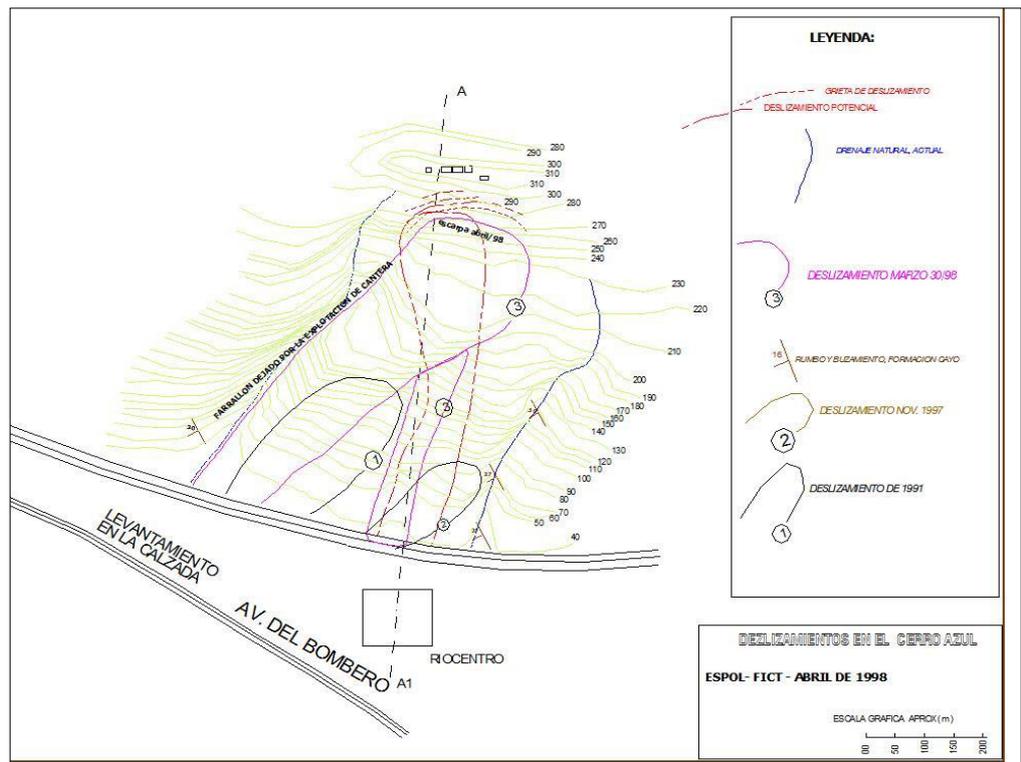


Figura 7.3 Información geológica y geotécnica del Cerro Azul. [31]

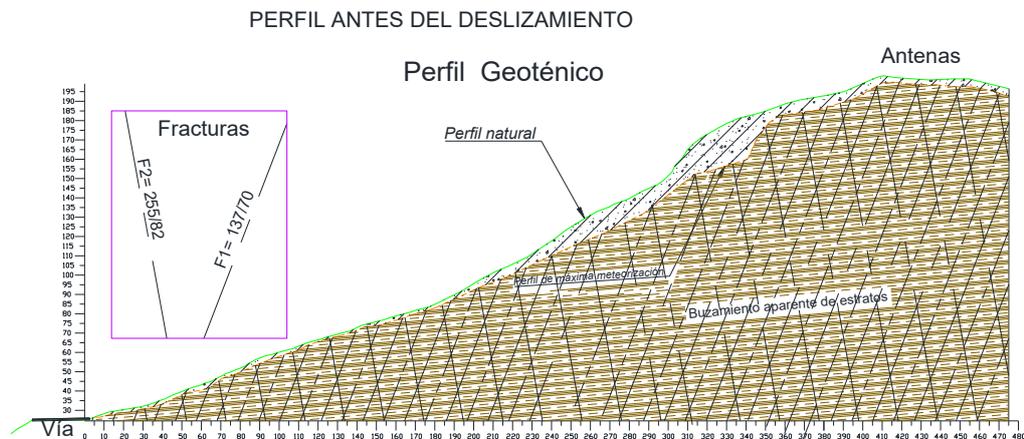


Figura 7.4 Perfil geotécnico que incluye el perfil natural del terreno, el perfil de meteorización, la estratificación de la Formación Cayo y la ubicación de las fracturas tectónicas.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Para elaborar la Figura 7.4, se utilizó la técnica de la red estereográfica, utilizando el software Autocad, siendo esta una contribución de la presente tesis. Se tuvo las fracturas F2, cada 15 a 20 m y F1, cada 7 a 10 m, con las orientaciones indicadas (Figura 7.4) en dirección de buzamiento y buzamiento.

Para graficar la dirección de los planos, se gira una línea acimutalmente con el valor del ángulo de la dirección del buzamiento. Para determinar el ángulo de buzamiento se efectúa una relación, se ingresa el ángulo de buzamiento sabiendo que 90° corresponde a la mitad del eje medido, tiene un valor de 87.13° y si el buzamiento es de 82° , la longitud que debe tener desde el borde del círculo hasta el punto donde va el arco es de 79.39° , de esta forma se grafica la discontinuidad F2, de la misma

forma se grafica F1 y el plano de estratificación, con una mayor precisión que con las divisiones de la red estereográfica.

Otro aspecto importante de este procedimiento derivado de la red estereográfica es medir los segmentos resultantes de la intersección de los planos con el eje que tiene la orientación de perfil topográfico, de esta forma se mide el ángulo de inclinación aparente de los planos respecto a dicho perfil con lo cual se logró la Figura 7.4, por ejemplo el ángulo aparente de la fractura F1 es 68.79° , siendo el buzamiento verdadero 70° . Con el procedimiento se han graficado las inclinaciones de todos los planos en el perfil. (Figura 7.5)

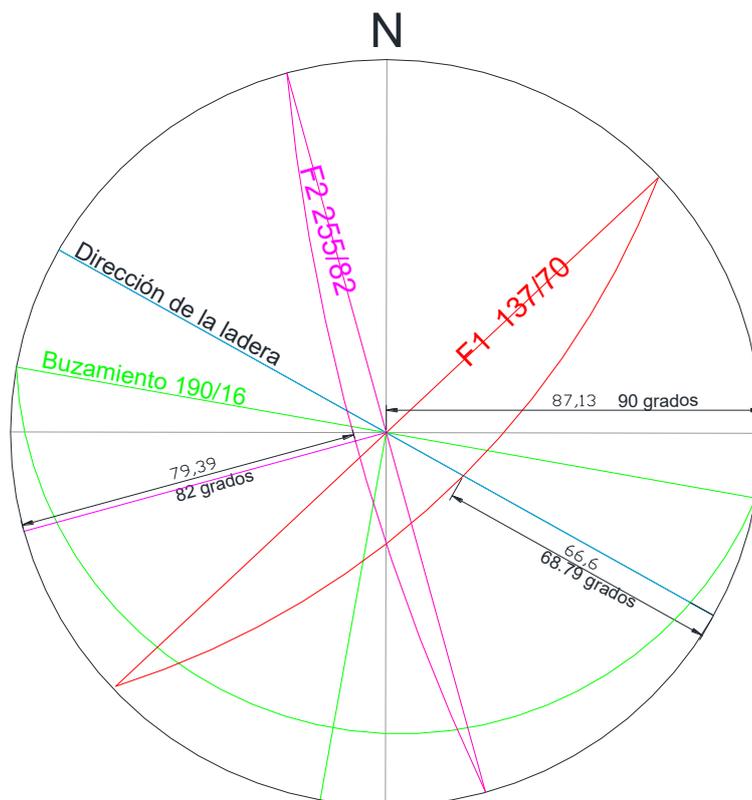


Figura 7.5 Procedimiento seguido para graficar los planos de discontinuidades, respecto a la orientación del perfil topográfico de la ladera.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

El próximo paso para el análisis consiste en la determinación de la probable superficie de ruptura, la cual, debido a las grandes dimensiones del deslizamiento debió estar estructuralmente controlada por las discontinuidades. En este caso intervienen la estratificación en los niveles donde los estratos son menos espesos o más finos, las fracturas de la familia F1, que son transversales (a los estratos), las más frecuentes y que están inclinadas en el mismo sentido que la pendiente del terreno. (Figura 7.6)

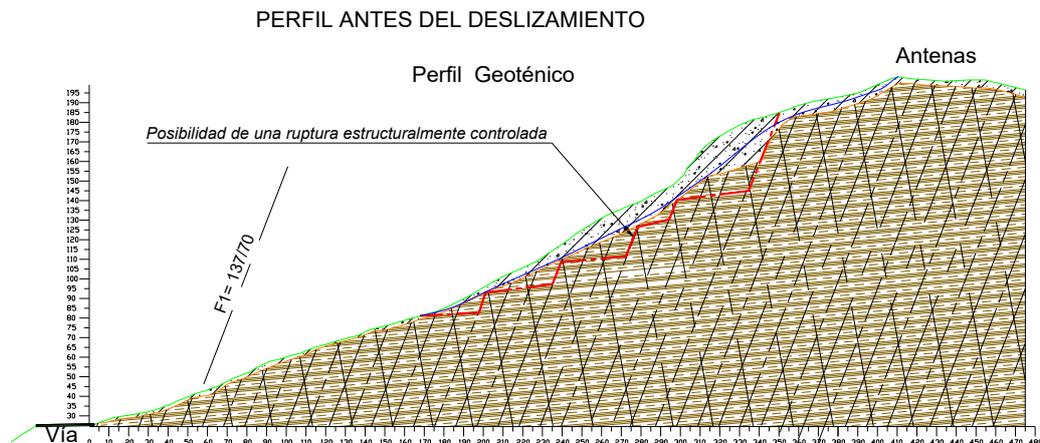


Figura 7.6 Determinación de la probable superficie de ruptura (trazos rojos) entre la estratificación y las fracturas de la familia F1 (NF son trazos azules).

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

A continuación se puede determinar la acción del agua la misma que actúa en función de nivel freático y la forma de la superficie de ruptura. Para este análisis se utiliza el modelo de Hoek y Brown de la distribución triangular de las cargas hidrostáticas, asumiendo que entre las fracturas F1 que forman escarpas (los mencionados autores denominan grieta) y la estratificación existe un conducto de agua intercomunicado.

En el presente trabajo se considera que en la primera escarpa de ruptura se tiene la mayor carga que se trasmite a la segunda escarpa con una pérdida debido a las fuerzas friccionantes y así se continua con las otras escarpas hasta llegar a la carga 0, en el punto en que el agua sale.

Al construir los triángulos de presión se tiene que en la posición del nivel freático la carga es cero y que en la base, exceptuando en la primera escarpa, la carga hidrostática se suma con la carga que viene de las partes más altas. Se puede notar que la carga se pierde desde el punto A hacia el punto E. (Figura 7.7)

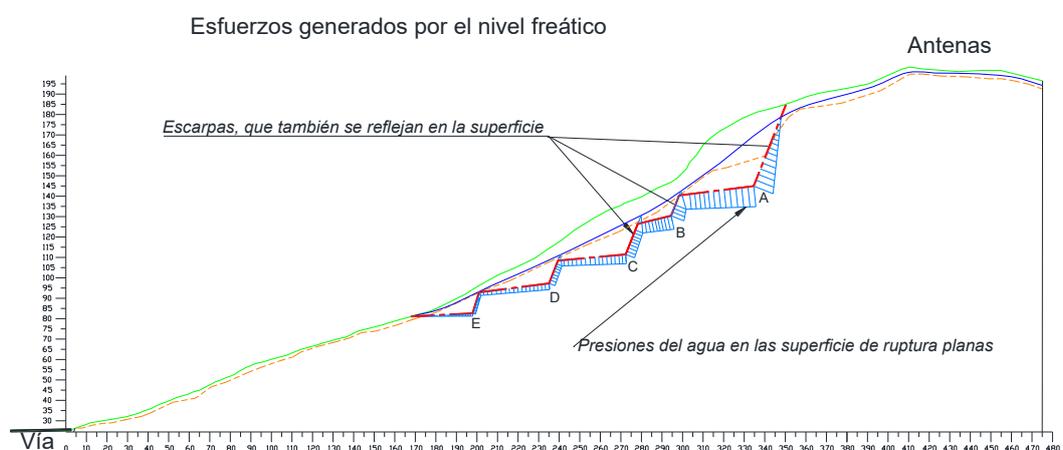


Figura 7.7 Determinación de las cargas hidrostáticas referidas a la posición del nivel freático y al camino recorrido.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Parámetros geotécnicos.- En los estudios efectuados por la ESPOL en 1999, se determinó que los parámetros geotécnicos de los materiales rocosos involucrados en el deslizamiento son los siguientes: (Tabla IX)

| Tipo de Material | Densidad natural KN/m3 | Cohesión KN/m2 | Angulo de fricción ° | Observaciones |
|--------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
| Suelo coluvial | 16 | 3 | 13 | - |
| Junta de estratos | - | 5 | 28 | - |
| Fractura tectónica | - | - | 30 | Abierta |
| Fractura meteorizada | - | - | 26 | - |
| Estrato fino de limolita | 16.5 | 8 | 23 | Estrato de 5cm |
| Lutita silicificada | 20.5 | - | - | Paquete de estratos |

Tabla IX Parámetros geotécnicos de cerro Azul.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Cálculos:

Para efectos de demostrar la incidencia del agua en el proceso de desestabilización ocurrido se aplica los criterios de cálculo sugeridos por Hoek y Bray aplicados para este caso en particular. Las relaciones de cálculo utilizadas son las siguientes: (Ecuación 18 y Tabla X)

$$F = \frac{cA + [W(\cos(\psi p) - \alpha \sin(\psi p)) - U - V \sin(\psi p)] \tan \phi}{W(\sin(\psi p) + \alpha \cos(\psi p)) + V \sin(\psi p)} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde se tiene que:

A: área del corte

W: peso del cuerpo deslizando

U: empuje en base de talud por acción del agua

α : aceleración sísmica

c: cohesión

φ : ángulo de fricción interna

V: empuje en grieta por acción del agua

Φ : inclinación del plano de ruptura

CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| PROYECTO | : Tesis de Grado |
| LOCALIZACIÓN | : Deslizamiento Cerro Azul |
| SOLICITADO POR: | |
| REALIZADO | : Miguel Angel Chávez Abril |
| FECHA | : enero 2015 |
| | Corrida 1 |

| DATOS GEOMETRICOS : | | DATOS GEOMECÁNICOS Y SÍSMICOS: | |
|------------------------------|---------|--------------------------------|-------------------------|
| Altura de talud considerada | 44,83 m | G roc = | 17,00 KN/m ³ |
| | | G agua = | 10,00 KN/m ³ |
| | | C = | 3,00 KN/m ² |
| | | φ = | 24,00 ° |
| | | Acel. sísmica = | 0,00 |
| | | Sup.Ruptura = | 8,20 ° |
| Inclinación Promedio talud : | 39,00 ° | | |

| | | | | |
|-------------------------|---|----------------------------|-----------------------|-------|
| Altura de la grieta | = | 38,45 m | Altura del agua (m) = | 33,00 |
| Sup. Total de deslizam. | = | 44,73 m ² | | |
| Peso de cuerpo | = | 28.938,93 KN | | |
| P.Hidr. en base | = | 7.380,43 KN/m ² | | |
| P.Hidr. Lateral | = | 5.445,00 KN/m ² | | |

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

| | | |
|---------------------------|---|-----------|
| Fuerzas estabilizantes | = | 9.255,155 |
| Fuerzas desestabilizantes | = | 9.516,861 |

$$F_s = \boxed{0,9725}$$

Tabla X Corrida #1 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Nótese que si la altura total de la grieta es de 38.45m y si la altura de agua en la misma es de 33m, el factor de seguridad que se obtiene en la corrida #1 (Tabla X), es 0.9725, lo que implica la falla del talud.

Si se realiza otra corrida en la cual se baja la altura de agua en la grieta a un valor de 30m, el factor de seguridad que se obtiene es de 1.1203, que significa que existe un cierto grado de estabilidad, lo que se puede constatar en la corrida #2 (Tabla XI). Con lo que se demuestra claramente la incidencia del agua, es decir, que cuando las lluvias no son tan intensas, como en el fenómeno El Niño, se tiene resultados del análisis estabilidad tales que:

CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| PROYECTO | : Tesis de Grado |
| LOCALIZACIÓN | : Deslizamiento Cerro Azul |
| SOLICITADO POR: | |
| REALIZADO | : Miguel Angel Chávez Abril |
| FECHA | : enero 2015 |
| | Corrida 2 |

| DATOS GEOMETRICOS : | | DATOS GEOMECÁNICOS Y SÍSMICOS: | |
|------------------------------|---------|--------------------------------|-------------------------|
| Altura de talud considerada | 44,83 m | G roc = | 17,00 KN/m ³ |
| | | G agua = | 10,00 KN/m ³ |
| | | C = | 3,00 KN/m ² |
| | | φ = | 24,00 ° |
| | | Acel. sísmica = | 0,00 |
| | | Sup.Ruptura = | 8,20 ° |
| | 82,00 | | |
| Inclinación Promedio talud : | 39,00 ° | | |

| | | | | |
|-------------------------|---|----------------------------|-----------------------|-------|
| Altura de la grieta | = | 38,45 m | Altura del agua (m) = | 30,00 |
| Sup. Total de deslizam. | = | 44,73 m ² | | |
| Peso de cuerpo | = | 28.938,93 KN | | |
| P.Hidr. en base | = | 6.709,48 KN/m ² | | |
| P.Hidr. Lateral | = | 4.500,00 KN/m ² | | |

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

| | | |
|---------------------------|---|---------------|
| Fuerzas estabilizantes | = | 9.613,890 |
| Fuerzas desestabilizantes | = | 8.581,522 |
| Fs | = | 1,1203 |

Tabla XI Corrida #2 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Si se realiza nuevas corridas descendiendo aún más el nivel de agua (en un período poco lluvioso), el factor de seguridad es más alto, por tanto hay más estabilidad.

Sin embargo si por existir pocas lluvias, el nivel freático baja aún más y ocurre un sismo que genere una aceleración sísmica horizontal de 0.15g, el deslizamiento se vuelve activo, ya que el factor de seguridad que se

obtiene en la corrida #3 (Tabla XII) , es de 0.9489, lo que señala un alto grado de inestabilidad.

CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS FRACTURADOS

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| PROYECTO | : Tesis de Grado |
| LOCALIZACIÓN | : Deslizamiento Cerro Azul |
| SOLICITADO POR: | |
| REALIZADO | : Miguel Angel Chávez Abril |
| FECHA | : enero 2015 |
| | Corrida 3 |

| DATOS GEOMETRICOS : | | DATOS GEOMECÁNICOS Y SÍSMICOS: | |
|------------------------------|---------|--------------------------------|-------------------------|
| Altura de talud considerada | 44,83 m | G roc = | 17,00 KN/m ³ |
| | | G agua = | 10,00 KN/m ³ |
| | | C = | 3,00 KN/m ² |
| | | φ = | 24,00 ° |
| | | | ° |
| | | Acel. sísmica = | 0,15 g |
| | | Sup.Ruptura = | 8,20 ° |
| Inclinación Promedio talud : | 39,00 ° | | |

| | | | | |
|--------------------------------|---|----------------------------|------------------------------|-------|
| Altura de la grieta | = | 38,45 m | Altura del agua (m) = | 22,00 |
| Sup. Total de deslizam. | = | 44,73 m ² | | |
| Peso de cuerpo | = | 28.938,93 KN | | |
| P.Hidr. en base | = | 4.920,29 KN/m ² | | |
| P.Hidr. Lateral | = | 2.420,00 KN/m ² | | |

DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD

| | | |
|----------------------------------|---|------------|
| Fuerzas estabilizantes | = | 10.266,922 |
| Fuerzas desestabilizantes | = | 10.819,248 |

$$F_s = \boxed{0,9489}$$

Tabla XII Corrida #3 de resultados obtenidos del cálculo de estabilidad por falla plana.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Del primer y segundo análisis (Tablas X y XI) correspondientes a alturas de agua de 33m y 30m respectivamente, se tuvo una diferencia del FS del 15.2%. El factor de seguridad vario en un 15.3% para alturas de agua

respectivas de 30m y 22m. Finalmente se tuvo una diferencia porcentual baja del FS de 2.5% para los estados de altura de agua de 33m y 22 (Tablas X y XII). Este último resultado comentado anteriormente, tuvo como factor clave la incidencia de la aceleración sísmica presente de 0.15g.

Otro enfoque que se puede dar al análisis del deslizamiento en el Cerro Azul es el fuerte incremento de las presiones intersticiales (desarrolladas también por el agua) en las masas de suelo arcillosas que se tenían sobre la estructura rocosa fracturada. Sin embargo, se debe puntualizar que los desplazamientos se iniciaron a nivel de las masas rocosas fracturadas y que la presión intersticial actuó en las masas de suelos contribuyendo a la violencia y a un mayor desplazamiento de ese deslizamiento.

La solución técnica planteada por la ESPOL en 1999 fue la que se presenta en las Figuras 7.8, 7.9 y 7.10.

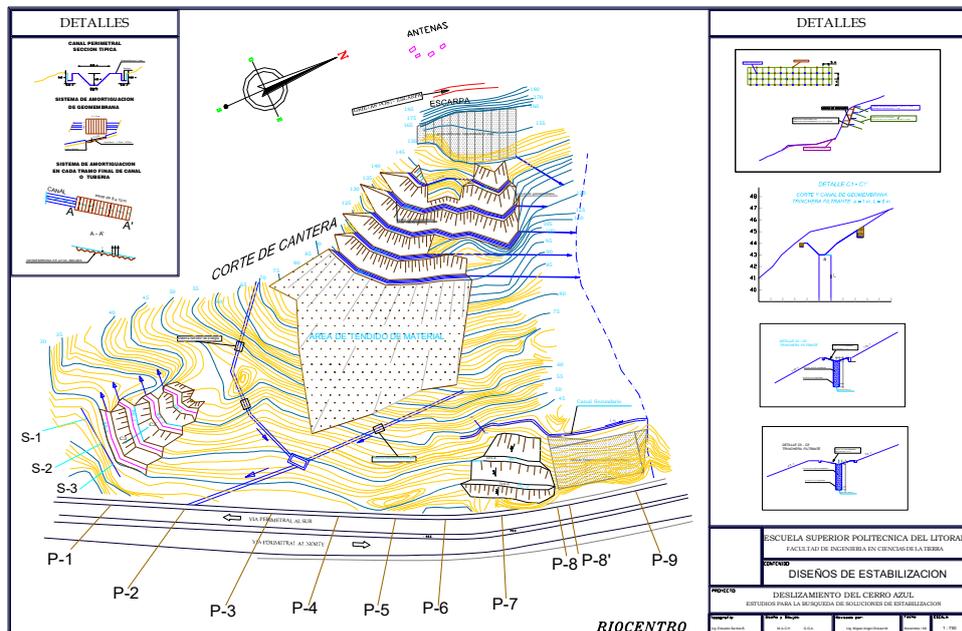


Figura 7.8 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31].

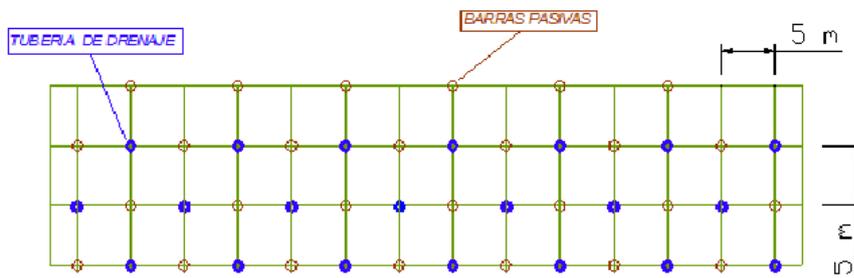


Figura 7.9 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31].

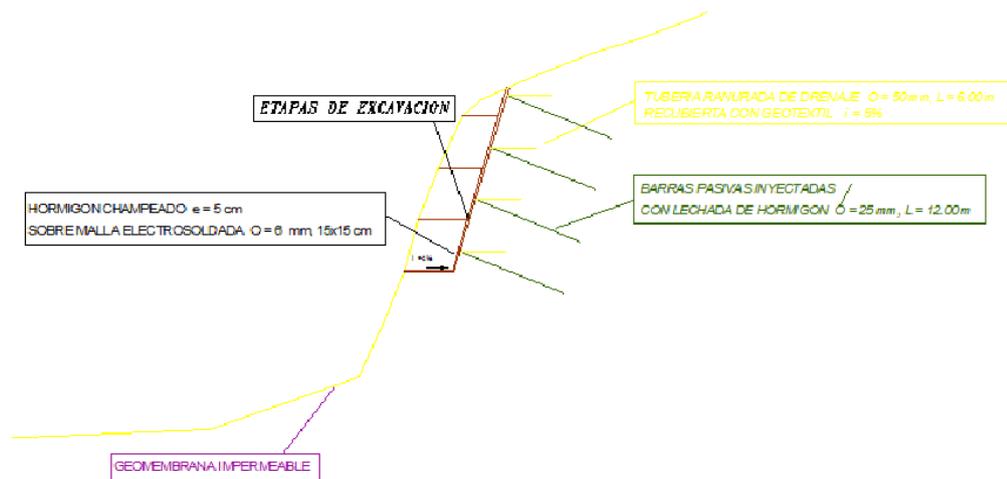


Figura 7.10 Soluciones técnicas propuestas por la ESPOL [31].

7.2. Deslizamientos en taludes con rocas fracturas

Cerro del Carmen.- En este sector de la ciudad existen taludes rocosos producto de la explotación pétreo, tanto en el Suroeste que corresponde al frente del Cementerio General, Calle Julián Coronel y el otro al Noreste, por donde pasa la avenida Pedro J. Meléndez Gilbert.

En los diferentes estudios efectuados, en especial los realizados por la ESPOL [56], se ha determinado que el buzamiento general del paquete de estratos está dirigido al Sur, es decir en el sentido del talud que se dirige en esa dirección (Calle Julián Coronel) y como ya se ha señalado el deslizamiento de estratos y caída de bloques es muy frecuente, inclusive sin la presencia de lluvias, esto es, sin la acción del agua.

Por la razón antes señalada y dado que han ocurrido procesos de desestabilización en el lado Norte del Cerro, en donde la estratificación es en sentido contrario a la pendiente de la ladera, se ha elegido este costado del cerro, para demostrar la incidencia del agua. En la Figura 7.11, se presentan graficadas las discontinuidades y el talud analizado.

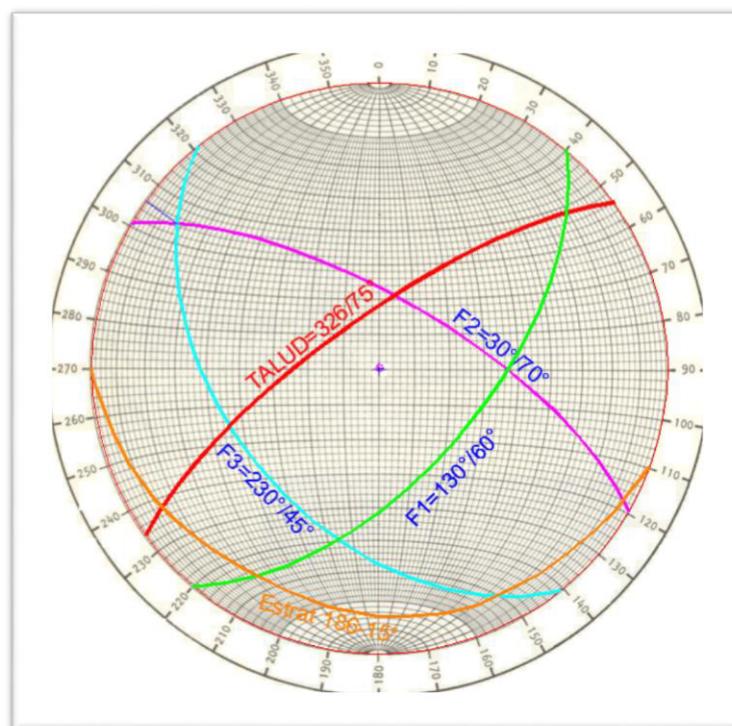


Figura 7.11 Planos de las discontinuidades F1, F2, F3, la estratificación y el talud en análisis.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Para graficar las discontinuidades es necesario encontrar la inclinación de la intersección de las discontinuidades F2 y F3 (Figura 7.12). La inclinación de la intersección es de 14° respecto al talud.

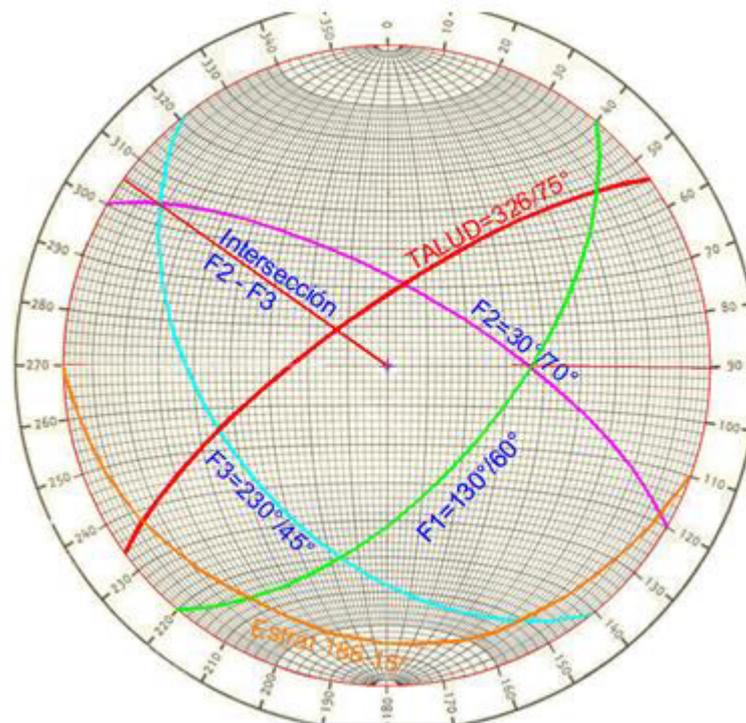


Figura 7.12 Intersección de las discontinuidades F2 y F3.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Graficando las discontinuidades que constan en la red estereográfica en el perfil típico del Cerro Del Carmen, lado Norte, aplicando para ello el mismo procedimiento antes explicado se tiene: (Figura 7.13)

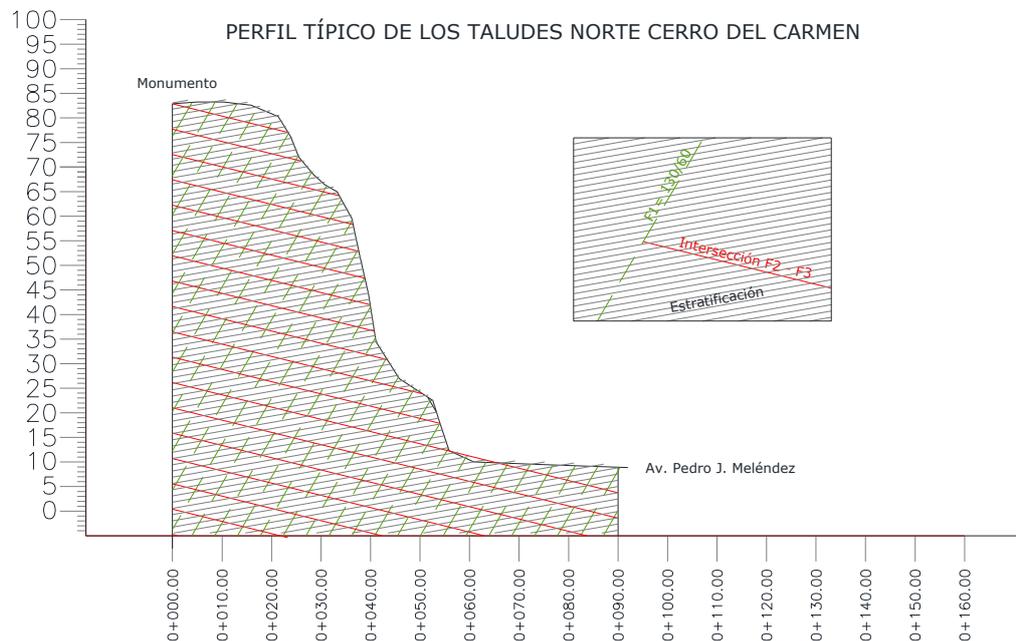


Figura 7.13 Perfil típico del Cerro Del Carmen incluyendo los planos de estratificación y la intersección de las fracturas F2 y F3, además la fractura F1 que corta a aquellas 2.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Para efectos de determinar la formación de cuñas se debe asumir que las fracturas que se intersectan formando esos bloques o cuñas están abiertas o casi abiertas, que están cortadas en la parte posterior, que tienen uno o dos planos por el que se deslizan y que por el frente tienen libertad cinemática para salir, por la existencia del talud.

En la Figura 7.14 se muestran las cuñas más probables de formarse y de ser inestables debido a los empujes hidrostáticos del agua. Cabe recalcar que si no existen lluvias intensas, dichas cuñas se mantienen en sitio, además es evidente que existe la acción del deterioro (antes definido)

que hace que las superficies en contacto, que tienen relleno, se vayan lavando y perdiendo resistencia al corte progresivamente. También ocurre que las cuñas se desplazan, pero no caen (están a punto de caerse) y esto ocurre cuando existen agentes detonantes [20] tales como las vibraciones, vientos fuertes e inclusive la presencia de pocas lluvias.

Es importante destacar que los bloques de cuñas se apoyan sobre los planos F2 y F3, se mantienen en su sitio porque existe fricción y cierta cohesión debida a materiales cementantes.

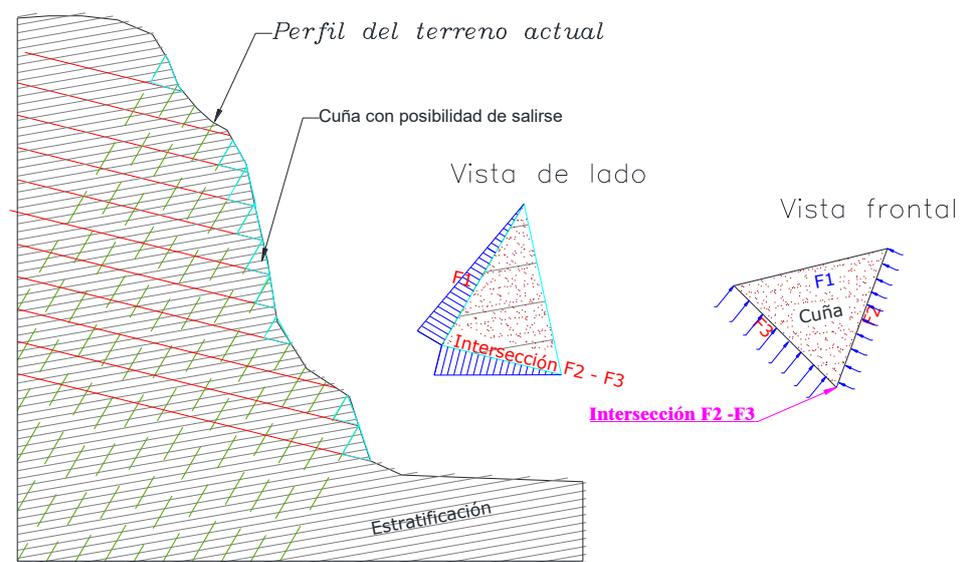


Figura 7.14 Cuñas que se forman debido a la intersección de las fracturas F2 y F3 y las fracturas F1

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

El mecanismo de ruptura que ocurre en el caso en análisis no es el que normalmente se espera en el caso de cuñas (lo descrito en el análisis teórico), ya que puede ser interpretado como una variante de superficie de ruptura plana, en donde la cuña se apoya en dos planos o en uno, el agua puede actuar empujando y levantándola o separándola, entonces se dan las condiciones propicias para que ocurra la salida de dicha cuña.

En el caso concreto analizado la cuña se apoya más en el plano F3, sin embargo la acción del agua puede tenerse en cualquiera de los dos planos desestabilizando la cuña.

Debido a que en el cerro del Carmen ocurre la caída de cuñas de todo tipo de volúmenes, no es práctico considerar análisis individuales. Lo importante es evaluar el tipo de mecanismo que posibilita la caída de cuñas pese a que la estratificación del macizo rocoso está en sentido contrario a la pendiente.

En el lado Sur del cerro se tiene una mayor cantidad de bloques que caen con la presencia de las lluvias, debido a que se tiene la estratificación en el mismo sentido que el talud, por lo que pueden presentarse frecuentes caídas de bloques por fallas planas, ya que las fracturas cortan los volúmenes de roca, las separan y posibilitan su deslizamiento.

7.3.Deslizamiento por causas antrópicas predominantes

Bastión Popular.- Este es el caso típico de deslizamientos que ocurren en rellenos que se realizan en laderas y en particular en hondonadas o quebradas, utilizando suelos mezclados con fragmentos de rocas y residuos de vegetación, productos de excavaciones en las vecindades. El objetivo de esos rellenos ha sido lograr áreas relativamente planas para ser aprovechadas en la construcción de infraestructura de viviendas, incluyendo calles.

Un perfil longitudinal en la parte más profunda del relleno es el que se presenta en la Figuras 7.15 y 7.16, en tanto que uno transversal en la en la Figura 7.17.

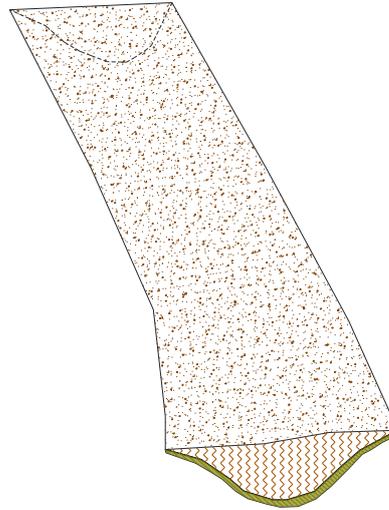


Figura 7.15 Vista esquemática, en tres dimensiones, de un relleno en una ladera
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

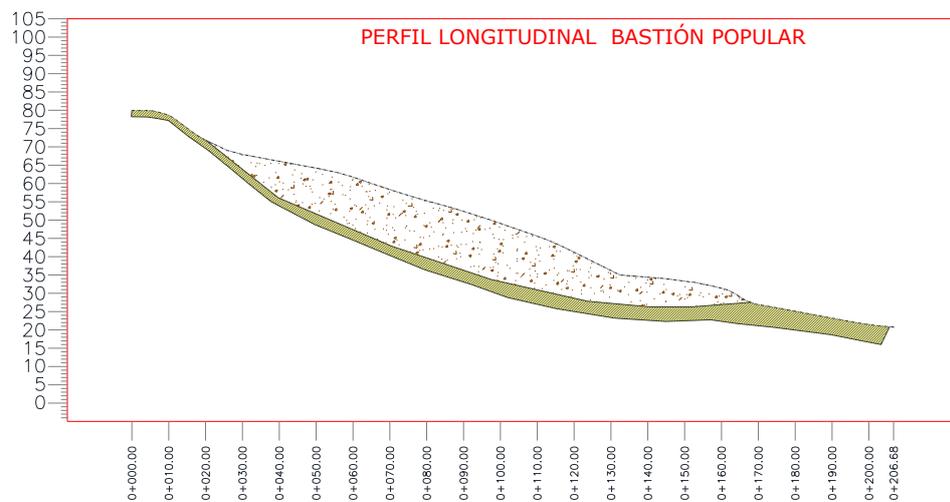


Figura 7.16 Ladera rellena sobre una hondonada natural, en con materiales producto de excavaciones. En la superficie existen numerosas viviendas.
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

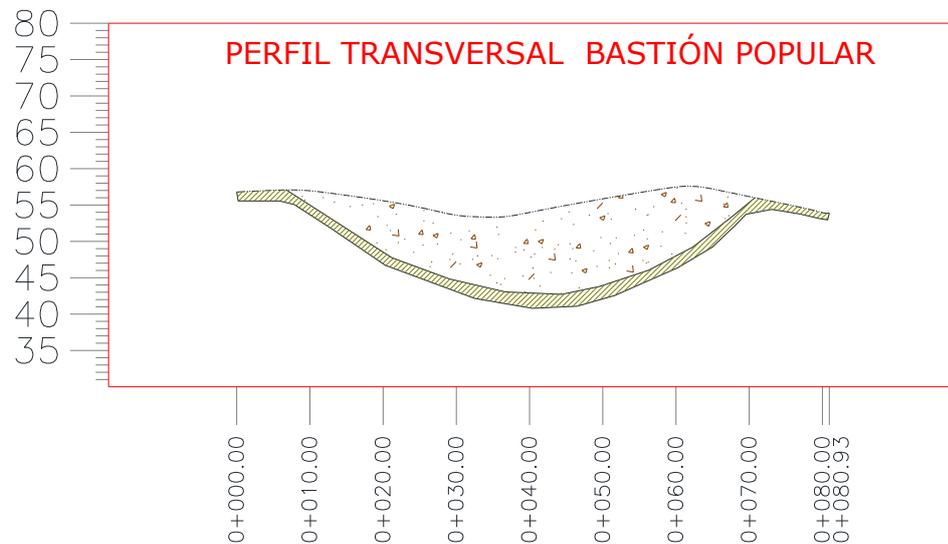


Figura 7.17 Perfil transversal en la hondonada rellena. En la superficie existen numerosas viviendas.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Tal como se ha constatado en otras acciones antrópicas, en las quebradas y hondonadas, antes del relleno se tenía contenido orgánico, suelos arcillosos y roca meteorizada, este conjunto de materiales constituye indudablemente una de las superficies de ruptura más críticas.

Parámetros geotécnicos.- Esta información, que se adjunta en el siguiente cuadro, ha sido obtenida de estudios realizados por la ESPOL, en el Cerro Azul, (El Niño de 1998), en los diseños de Presa, Aprovechamiento Integral del Campus Politécnico, Estudios para la Estabilización del Deslizamiento Ocurrido en las laderas sobre el Hospital de Infectología (El Niño de 1998). De los parámetros que se presentan en el siguiente cuadro, se han elegido los que se estiman representativos

para efectuar los cálculos de estabilidad, siendo el principal objetivo valorar la incidencia del agua. (Tabla XIII)

| PARÁMETROS DE SUELOS Y ROCAS MUY METEORIZADAS EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL (Determinados por la ESPOL) | | | | | | | |
|--|--|--|-------------------------------------|---------|------------------------|--------|----------------------------------|
| | | Parámetros Geotécnicos del Esfuerzo Cortante de los Materiales | | | | | |
| Ubicación de la Muestra | Descripción | γ nat. (KN/m ³) | γ comp. (KN/m ³) | I.P.(%) | C (KN/m ²) | ϕ | Observaciones |
| Cerro Azul | Suelo coluvial Arcillo Limoso y clastos (MP1) | 15.50 | | 18 | 3 | 17 | Material deslizado |
| Cerro Azul | Suelo coluvial Arcillo Limoso y clastos (MP2) | 15.50 | | 21 | 1 | 16 | Material deslizado |
| Cerro Azul | Roca bien meteorizada (PRM5) | 16.50 | | | 21 | 24 | Material in situ |
| Cerro Azul | Roca bien meteorizada (PRM11) | 17.20 | | | 23 | 28 | Material in situ |
| Escalón topográfico al pie del Cerro, Campus G. Galindo | Suelo coluvial Arcillo Limoso y clastos (CGG17) | 16.2 | | 23 | 8 | 18 | Material insitu, a 1m de prof. |
| Prestamos de suelos finos en el Campus G. Galindo | Suelos limo arcillosos (CGG19) | | 15.75 | 17 | 21 | 16 | Material insitu a 0.60m de prof. |
| Prestamos de suelos finos en el Campus G. Galindo | Areniscas y microconglomerados bien meteorizadas (MRE 4) | | 19.22 | 28 | 27 | 16 | Material insitu a 0.50m de prof. |
| Deslizamiento Cerro Del Carmen | Limos arcillosos y fragmentos de roca (DCC3) | 16.10 | | 19 | 4 | 16 | Material deslizado |
| Deslizamiento Cerro Del Carmen | Limos arcillosos y fragmentos de roca (DCC3) | 15.8 | | 16 | 3 | 17 | Material deslizado |
| γ nat. (KN/m ³) = | Densidad o peso volumétrico encontrado in-situ | | | | | | |
| γ comp. (KN/m ³) = | Densidad compactada | | | | | | |
| I.P.(%) = | Indice de plasticidad para caracterización | | | | | | |
| C (KN/m ²) = | Cohesión del material | | | | | | |
| ϕ = | Angulo de fricción del material | | | | | | |

Tabla XIII Parámetros recopilados de suelos y rocas de Guayaquil [31] [56] [29].

Los siguientes cálculos serán con el fin de demostrar la clara incidencia que tiene el agua y en particular la acción del nivel freático o nivel piezómetro en el caso de laderas, donde en consecuencia se generan altas presiones intersticiales. Para este efecto se ha utilizado el Programa Geotécnico Galena, en su última versión, el cual permite ingresar una

gran cantidad de información geotécnica y así lograr obtener un correspondiente factor de seguridad. El software permite utilizar distintos métodos de estabilidad para obtener los resultados deseados y para la presente tesis se hizo uso exclusivamente del método de Sarma.

El método de Sarma es utilizado para analizar la estabilidad de un talud de suelo ante cargas sísmicas aunque también puede ser utilizado para un análisis estático, es decir ante la presencia única del peso propio del sistema en conjunto con el contenido de agua existente en dicho talud. Fue propuesto por Sarada K. Sarma y este adopta criterios simplificados para su uso. El método satisface todas las condiciones de equilibrio, es decir fuerzas horizontales, verticales y momentos de cada corte de sección adoptado. Su uso es bastante amplio para cualquier tipo de forma de secciones o cortes, siendo práctico para superficies de falla no circulares y cortes no verticales. Es asumido que las magnitudes de los componentes de fuerza verticales siguen un determinado patrón, lo cual permite determinar estáticamente una solución sin tener más consideraciones que las ya establecidas. [66]

Dada la naturaleza y la geometría irregular de las laderas de Bastión Popular, el uso del método de Sarma es muy eficaz al evaluar las superficies de falla no circulares de dicho caso de estudio. A continuación se presentan corridas de dicho sitio de estudio en donde se varió la altura

del nivel freático para cada una y también se incluyó una fuerza sísmica para así comparar los impactos generados sobre dicha ladera. (Figuras 7.18, 7.19, 7.20 y 7.21). De la corrida #1 se tuvo un FS de 1.29, lo cual refleja condiciones de estabilidad. De la corrida # 2 se obtuvo un FS de 1.17 lo cual aún sigue mostrando estabilidad. En la corrida #3 se tuvo inestabilidad al darse un FS de 0.98. Cada corrida tuvo una condición distinta de precipitación local.

Se adjuntó en los Anexos, las respectivas memorias de cálculo de cada corrida generada por el software Galena.

LADERAS DE BASTIÓN POPULAR

Análisis de estabilidad cuando el nivel freático está bajo (tiempos de muy escasas lluvias)

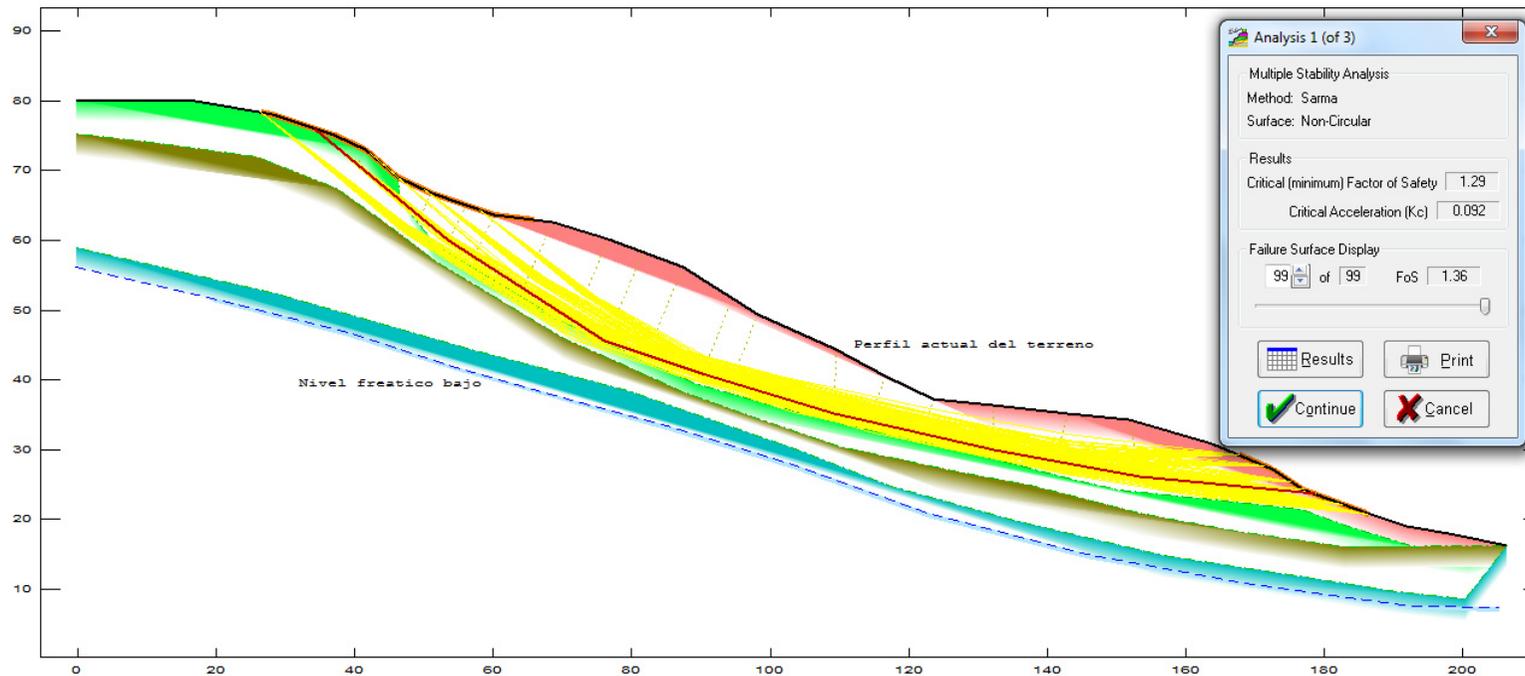


Figura 7.18 Corrida #1 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular".

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Análisis de estabilidad cuando el nivel freático es medio (lluvias moderadas)

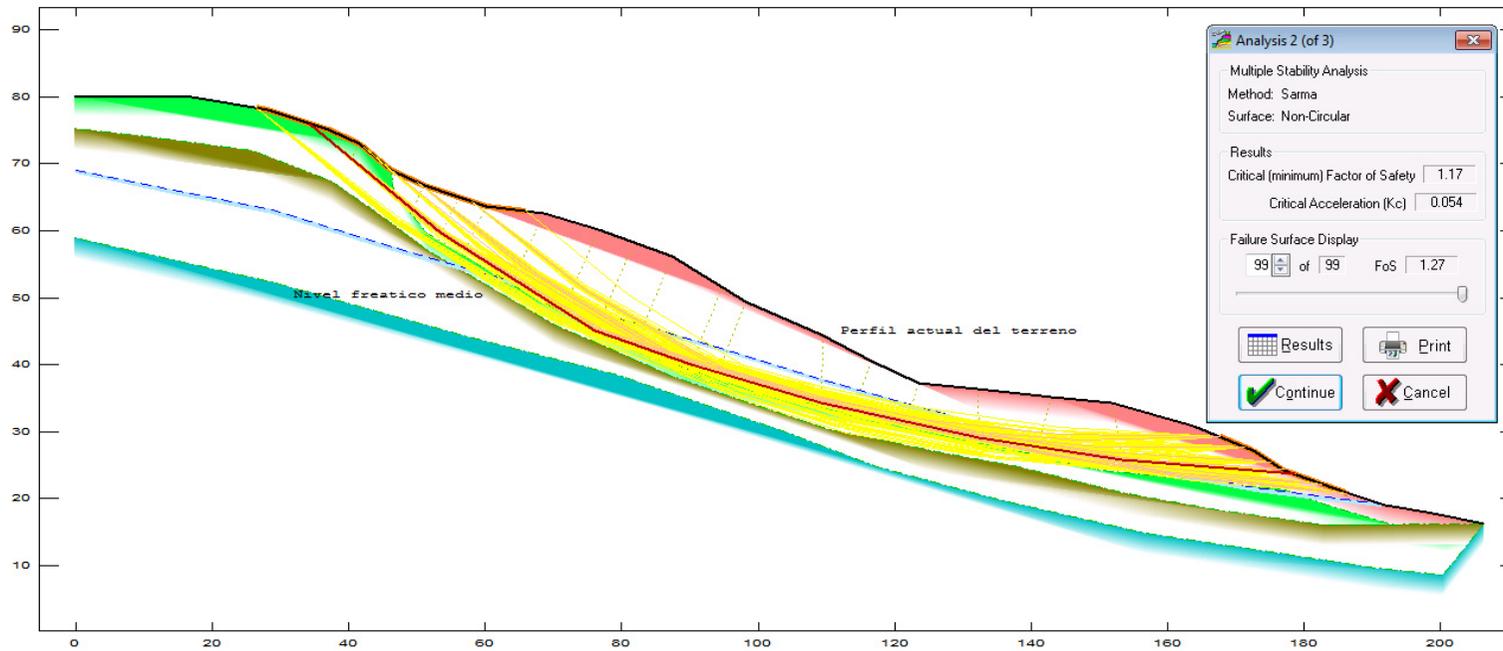


Figura 7.19 Corrida #2 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular".

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Análisis de estabilidad cuando el nivel freático esta alto (lluvias intensas)

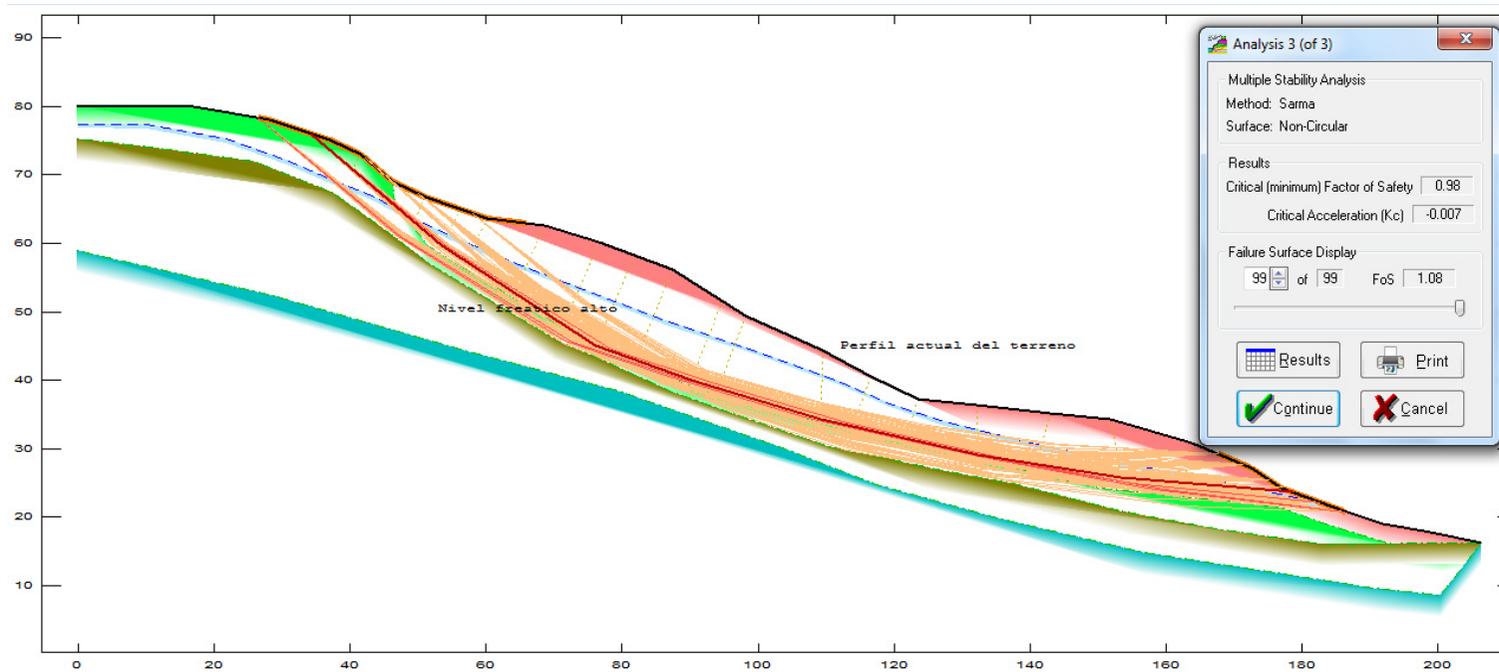


Figura 7.20 Corrida #3 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular".
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Análisis de estabilidad cuando el nivel freático es medio y ocurre un sismo de aceleración de 0.2g

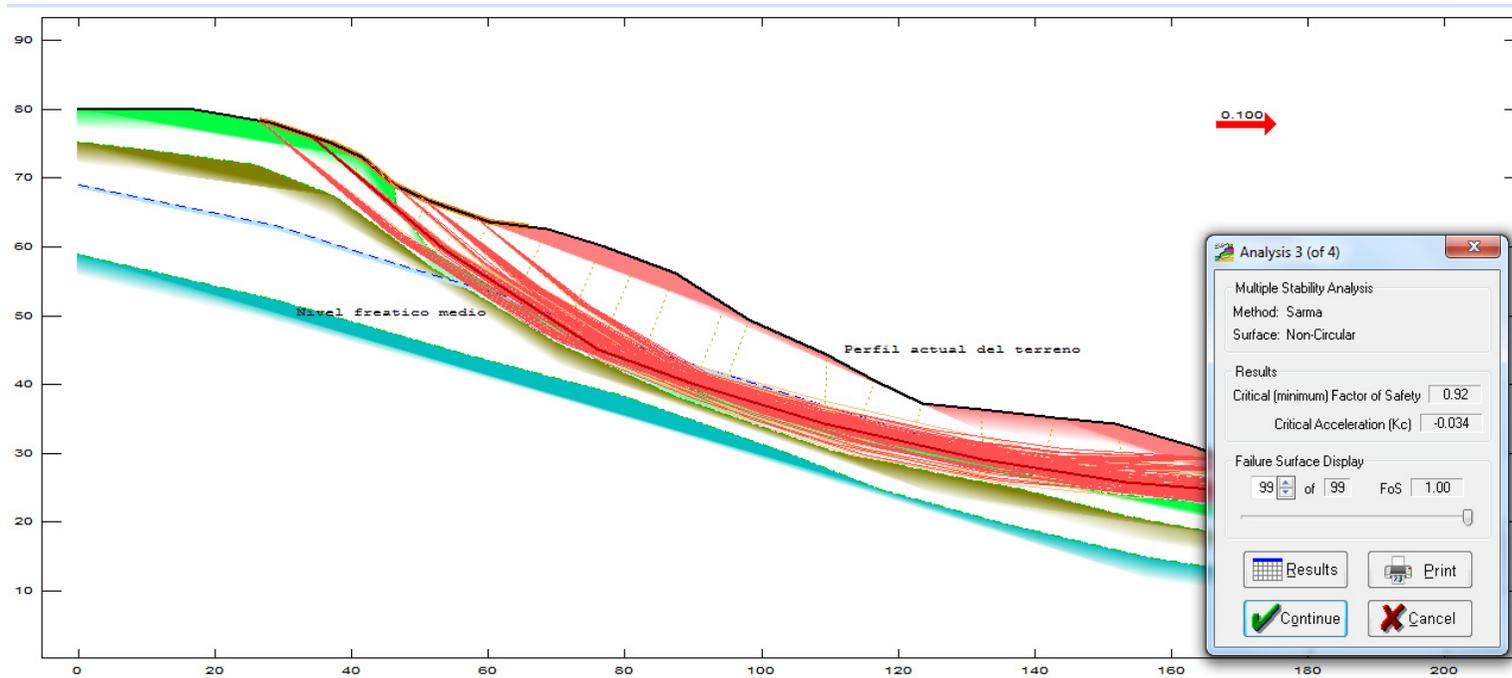


Figura 7.21 Corrida #4 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular."
Fuente: propiedad del autor de esta tesis

Si el nivel freático es intermedio y ocurre un sismo de 0.20g, el factor de seguridad que se obtiene es de 0.92, lo que determina inestabilidad.

Las variaciones porcentuales de los FS de las 3 condiciones de nivel freático (alto, medio y bajo) en comparación al estado de N.F medio afectado por una aceleración sísmica de 0.2g, fueron los siguientes:
(Tabla XIV)

| NF Medio y 0.2g | Variación Porcentual |
|------------------------|-----------------------------|
| NF Bajo | 28.7% |
| NF Medio | 21.4% |
| NF Alto | 6.1% |

Tabla XIV Variación porcentual del factor de seguridad de las 3 primeras corridas en comparación a la corrida #4.

Fuente: propiedad del autor de esta tesis

CAPÍTULO 8

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1.CONCLUSIONES

1. El agua tiene una indudable incidencia en los procesos de desestabilización de los taludes y laderas.
2. Se ha establecido que la incidencia de las precipitaciones es mayor cuando se han realizado acciones antrópicas y en especial obras de ingeniería sin el debido análisis técnico y sin adoptar las soluciones apropiadas para cada situación.
3. Los macizos rocosos en la ciudad de Guayaquil están muy meteorizados y fracturados, lo que da lugar a una acción más incidente de las aguas lluvias, tanto en la escorrentía superficial (por

infiltración) como en el flujo interno en dichos medios naturales. En la presente tesis esto fue corroborado fácilmente por inspecciones visuales a los macizos rocosos, donde ha falta de cubierta vegetal se han tenido diferencias físico-químicas que se pueden apreciar al observarlos.

4. El reconocimiento adecuado de los macizos rocosos, su constitución y características fundamentales en su funcionamiento natural equilibrado, es fundamental para evitar su desestabilización.
5. Para el estudio de Cerro Azul, al haber tenido diferencias de altura de agua de un 9.1%, se tuvo una variación positiva del factor de seguridad en un 15.2%. Este cambio porcentual no lineal se dio tomando en cuenta únicamente al agua presente, mas no a la aceleración sísmica ya que no se la considero para ese análisis.
6. Es de importancia notar que bajo la presencia de una aceleración sísmica de 0.15g y estando ante condiciones más favorables de altura de agua, una disminución de la altura de agua del 33.3%, tuvo una disminución del FS en un 2.5%. Esto establece claramente el impacto sísmico en contraste al del agua sobre el macizo rocoso, a pesar que ambos son de mucha importancia.

7. En los medios rocosos fracturados y meteorizados de la ciudad, tienen particular importancia los procesos de deterioro de los frentes excavados, debido a que decrecen las propiedades de resistencia y con la presencia del agua, se generan diversos tipos de deslizamientos.
8. Los depósitos coluviales que se encuentran al pie de los cerros y colinas constituyen terrenos no aptos para construir, debido a que al ser excavados se genera una acción muy desestabilizadora de taludes.
9. Las condiciones más críticas para la generación de un deslizamiento se tendrán cuando estando en un fenómeno de El Niño, se produzca un sismo, aunque este sea de baja intensidad.
10. Ante las aceleraciones sísmicas de 0.15g y 0.2g del estudio de casos, no fue necesario el evaluar el factor de seguridad ante un sismo con aceleración máxima de 0.4g, correspondiente a Guayaquil según la NEC2011. Teniendo estas aceleraciones inferiores al máximo establecido y con niveles freáticos de nivel medio, fue suficiente para generar factores de seguridad inferiores a 1.0, teniendo así el gran impacto de la aceleración de la gravedad en estos FS.

11. La Diferencia porcentual entre los FS del estudio de Bastión Popular, fueron relativamente altas ante condiciones de NF iguales y dado un sismo igual a 0.2g. Un 21.4% de diferencia de FS logra establecer de forma cuantitativa el impacto de un sismo ante condiciones idénticas en un determinado sitio.

12. La aplicación de las soluciones que fueron planteadas ante la acción de agua superficial o sub superficial, indudablemente mitigaran en gran parte o erradicaran complemente el presente o futuro impacto que daría lugar a la falla del talud. El uso de las mismas, dependerán de la fase en que se encuentre el sitio, ya sea constructivo, post constructivo o de un estado aun no alterado de forma antrópica.

8.2. RECOMENDACIONES

1. Es importante que cuando se requieran construir obras de ingeniería, en articular urbanizaciones, edificaciones de todo tipo y vías, debe realizarse un completo estudio de las condiciones previas en las que se encuentra el macizo rocoso, sus condiciones geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas y geotécnicas. El principal objetivo debe ser valorar los efectos del deterioro y en especial la acción del agua en cualquier forma de acción que esta tenga (lluvia, escorrentía,

infiltración) en las nuevas condiciones, con la finalidad de adoptar las soluciones de ingeniería más apropiadas.

2. Para efectuar el análisis de estabilidad de las condiciones previas y posteriores a los estudios y diseños es necesario que se efectúen los correspondientes ensayos de laboratorio, en especial los parámetros relacionados a los análisis de estabilidad.
3. Cuando se dan soluciones o se diseñan taludes y obras de estabilización debe considerarse como la condición más crítica del nivel freático, la que se tiene en un fenómeno de El Niño muy fuerte especialmente debido al corto periodo de retorno de este fenómeno.
4. Realizar un estudio para determinar cuantitativamente la incidencia de un fenómeno de El Niño en el aumento del nivel freático, de tal manera que la comunidad de ingenieros geotécnicos cuente con una herramienta que le permita evaluar este efecto con un buen nivel de confianza.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Apuntes del Curso de Geotecnia Básica, dictado en la FICT, por el Profesor Dr. Miguel Ángel Chávez Moncayo.
- [2] Apuntes del Curso de Mecánica de Rocas, dictado en la FICT, por el Profesor Dr. Miguel Ángel Chávez Moncayo.
- [3] Apuntes del Curso de Estabilización de Suelos y Rocas, dictado en la FICT, por el Profesor Dr. Miguel Ángel Chávez Moncayo.
- [4] Apuntes del Curso de Hidrología, dictado en la FICT, por el Profesor Dr. Mijail Arias.
- [5] Barton n. "A geotechnical analysis of rock structure and fabric in the CSA Mine" Geomechanics Paper XSIRO Australia, 1977.
- [6] Barron, K. y otros, Artificial Supports of Rock Slopes. Research Report R228, Department of Energy, Mines and Resources Mines Branch, Canada, 130 – 145, 1971.

- [7] Barton, N. y otros, Engineering Classifications of rocks masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6, 189-236, 1974.
- [8] Beltrán, L., Técnicas de Bio-ingeniería para la Estabilización de Taludes y el Control de la Erosión. Memorias del IV Congreso Colombiano de Geotecnia. 1, 435-456, Santa Fé de Bogotá, Colombia, 1991.
- [9] Bonnard, Ch., Aplicaciones de Métodos de tratamientos de Deslizamientos. Memorias del Simposio Panamericano de Deslizamientos. 87 - 117, Paipa, Colombia, 1989.
- [10] Benítez Acosta, Stalin (2005). Estudio geológico etapa final (Investigación y estudio del comportamiento dinámico del subsuelo y la microzonificación sísmica de la ciudad de Guayaquil). Guayaquil: Instituto de investigación y desarrollo Facultad de ingeniería IIFIUC.
- [11] Bieniawsky Z. "The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications" Proc. IV ICRM Montreux, 1979.

- [12] Buhdu, Muni. (2011). Soil Mechanics and foundations: Chapter 9 two-dimensional flow of water through soils. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Louis Claude 1974-1983, Hidraulique des Roches, Bolulletin de Liasson de la Ecole des Ponts et Chaussez de Paris.
- [14] Comité Ejecutivo de la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Norma ecuatoriana de la construcción: Capitulo 2 Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente. 2013. Quito:Ecuador.
- [15] Cáceres, L. y González, A., Erosión por Flujo Superficial y Sub superficial en la Ciudad de Tunja. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia, 3.1-3.12, Santa Fé de Bogotá, Colombia, 2000.
- [16] Cadima, V., Comparación entre métodos convencionales y el uso de geosintético en la estabilización de taludes y Aplicación al Deslizamiento de San Isidro. Tesis de Grado Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia, 2001.

- [17] Carrillo Gil, A. y Carrillo Acevedo, A., Diseño y Protección de taludes en climas tropicales. Memorias III Simposio Panamericano de Deslizamientos .2 525-536, Cartagena, Colombia, 2001.
- [18] Carrillo Gil, A. y Carrillo Acevedo, A., Sistemas de Estabilización de Taludes: Algunos casos peruanos. Memorias 12ava Conferencia de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2 2535-2550, Boston, USA, 2003.
- [19] Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del Río Guayas (CEDEGE), Publicaciones Del Departamento de Hidrología (1984).
- [20] Chávez Moncayo Miguel, “Procedimiento de Investigación para la Elección de Soluciones de Estabilización de Taludes y Laderas en Suelos y Rocas Blandas del HGGHH.
- [21] Chávez Moncayo Miguel,. “Estudios y Diseños para la Construcción de la Presa PARCON en el Campus Politécnico” Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador, 2010.

- [22] Chávez Moncayo Miguel, “Estudios y Diseños de Estabilización del deslizamiento ocurrido sobre el Acueducto Lomas de Urdesa, del Sistema de Agua Potable de Guayaquil”, Techint – Comintrac, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil Ecuador, 1995.
- [23] Chávez Moncayo Miguel, “Estudios y Diseños Geotécnicos para la construcción del Tanque de Almacenamiento en Lomas de Urdesa del Sistema de Agua Potable de Guayaquil”, Techint – Comintrac, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil Ecuador, 1994.
- [24] Chávez Moncayo Miguel. “Estudios y Diseños para la Construcción de la Presa Prosperina II en el Campus Politécnico”, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil - Ecuador, 1983.
- [25] Chávez Moncayo Miguel. “Estudios y Diseños de Estabilización de los taludes de Corte en la Nueva Planta de Agua Potable de Guayaquil”, Techint - Comintrac Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil Ecuador, 1992.

- [26] Chávez Moncayo Miguel. “Aplicaciones de la Mecánica de Rocas a los Estudios de Tectónica y Evaluación de la Sismicidad”, Colegio de Ingeniero de Geología Minas y Petróleos del Guayas, IV Congreso Ecuatoriano de Geología Minas y Petróleos, Guayaquil Ecuador, 1991
- [27] Chávez Moncayo Miguel, “Caracterización Geomecánica de la Formación Cayo en Guayaquil Ecuador”, IX Conferencia Panamericana de Mecánica de Rocas, Caracas, 1990.
- [28] Chávez Moncayo Miguel, “Caracterización Geotécnica de los Materiales Rocosos de la Cuenca Baja del río Guayas.” CEDEGE, Guayaquil Ecuador, 1981.
- [29] Chávez Moncayo Miguel, “Contribución a los Estudios y Diseños para la Construcción de un Túnel en el cerro del Carmen.” Sociedad Ecuatoriana de Mecánica de Suelos y Rocas, Guayaquil Ecuador, 1980.
- [30] De la Torre, M., Control de Deslizamiento que Afectan las Vías Terrestres, VIII congreso Nacional Geolima, 320 - 326. Lima, Perú, 1998.

- [31] Espol, 1999., Estudios y Diseños para la Estabilización del Cerro Azul, Municipalidad de Guayaquil.
- [32] Geological Society Engineering Group Working Party. The Description and Classifications of Weathered Rocks for engineering purposes. Quarterly Journal Engineering Geology, 28 (3) 207-242, 1995.
- [33] González de Vallejo, L., Ingeniería Geológica. Editorial Printice Hall. España, 1997.
- [34] Goodman R. y SHI G. "Block theory and its application to rock engineering" Prentice Hall New York, 1985.
- [35] Hencher, S. R., The Implications of Joints and Structures for Slope Stability. Geotechnical Engineering and Geomorphology, 146-155. Editorial J. Willey and Sons, New York USA, 1987.
- [36] Hiedra L. J. y Hiedra, J., Solución al deslizamiento del talud entre la calle El Colegio y la Avenida de Alto Prado, Municipio, Baruta Estado Miranda. Memorias XIV Seminario Venezolano de Geotecnia,
- [37] Sociedad Venezolana de Geotecnia, 209 – 216, Caracas, Venezuela, 1996.

- [38] Hoek, E. and Bray, J. W., Rock Slope Engineering 3th Edition. The Institute of Mining and Metallurgy. London, 1981.
- [39] Hoek H. Y Londe P. "The design of rock slopes and foundations" III ICRM Washington, 1974.
- [40] Hoek, E. Hoek – Brown Failure Criterion 2002 Edition. Proc. 5th North American Rock Mech. Symposium. 1 243-267, USA, 2002.
- [41] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Cartografía hidrogeológica. 2012. Guayaquil: Ecuador.
- [42] ISRM International Soc. Rock Mech., Rock Characterization Testing and monitoring. Int. Soc of rock Mechanics Suggested Methods. Pergamon Press, 1981.
- [43] Kanji, M. A. y otros, Condiciones de Disparo de Aluviones y Estimación de la Susceptibilidad de Ocurrencia, Memorias 12ava Conferencia de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2 2503-2507, Boston, USA, 2003.

- [44] Ladeira, F. y Minette, E., A quantificacao de alteragao na quantificasao de alterabilidade de roches. Geotecnia. 4 27 – 34, Lisboa Portugal, 1984.
- [45] Landázuri L.C. y Landázuri S.C., Deslizamientos de taludes provocados por la acción del Fenómeno de El Niño. Memorias VIII Congreso Nacional Geo-Lima 98 237 – 247, Lima, Perú, 1998.
- [46] López Jimeno C. y otros, Sistema para evaluar la degradación potencial de los taludes rocosos. Programa Degtalud. Editorial Ingeopres. Madrid, 1992.
- [47] López Jimeno C., Manual de Estabilización y Revegetación de Taludes. Ediciones Graficas Arias Montano, Madrid, España, 1999.
- [48] Marín Nieto, L., El Niño 97-98 en la región sur-occidental del Ecuador (Conf.). Memorias VIII Congreso Nacional Geo-Lima. 98 85 – 109, Lima, Perú, 1998.
- [49] Marín Nieto Luis, Mecánicas de Suelos, Universidad de Guayaquil 1981.

- [50] Marín Nieto, L., Correlaciones Lluvias- Deslizamientos durante El Niño. Memorias 12ava Conferencia de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, 2 2459-2464, Boston, USA, 2003.
- [51] Morgenstern, N. R., Toward landslide risk assessment in practice, Proc. of the Int. Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, Balkema, 15-23, 1997.
- [52] Nicholson, D.T. and Hencher, S., Assessing the potential for deterioration of engineered Rock Slopes. Memorias "International Symposium of Engineering and the environment; 911-917, Atenas, Grecia, 1997.
- [53] Nuñez Del Arco E., Dugas F., Labrousse B., 1983: Contribución al conocimiento Estratigráfico, Sedimentológico y Tectónico de la Región Oriental de la Península de Santa Elena y parte sur de la Cuenca del Guayas - Ecuador, en base a 17 hojas geológicas, escala 1:50.000. Tercer Congreso Ecuatoriano de Ingeniería de Geología, Minas y Petróleo. Memoria pág. 1 - 33, tomo 1B.
- [54] Nuñez Del Arco E., Dugas F., Guía Geológica del Sur-Oeste de la Costa Ecuatoriana, 1987, 160 páginas

- [55] Plaza Nieto, G., Deslizamientos, Zonas Expuestas en el Litoral, Causas y Efectos. Memorias del Seminario "Los Desastres Naturales y las Estrategias de Desarrollo". Guayaquil, 23-35. Guayaquil, Ecuador, 1998
- [56] Perri G. "Graphical method for the analysis of rock slopes in urban areas" Proc. V ICRM Melbourne, 1983.
- [57] Proyecto "Tunel Del Carmen" Volúmenes 4-5-6, Unidad de Transporte Masivo para Guayaquil, realizado por Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1987.
- [58] Salcedo, D., Características y Aspectos Socio Económicos y Ambientales de los Flujos Torrenciales Catastróficos de Diciembre de 1999, en el Estado de Vargas y en el Área Metropolitana de Caracas. III Simposio Panamericano de Deslizamientos. Falta páginas. Cartagena, Colombia, 2001.
- [59] Santos Baquerizo E., "Estudios de la Vía de Enlace Urdesa Norte Av. Juan Tanca Marengo." Tesis de Grado U. de Guayaquil, 1987.
- [60] "Seepage, Drainage & Flownet" de Harry R. Cedergreen (1967)

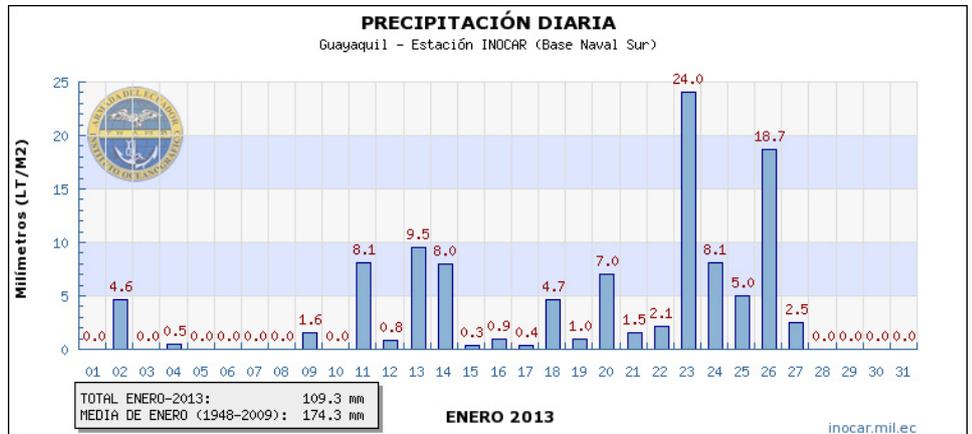
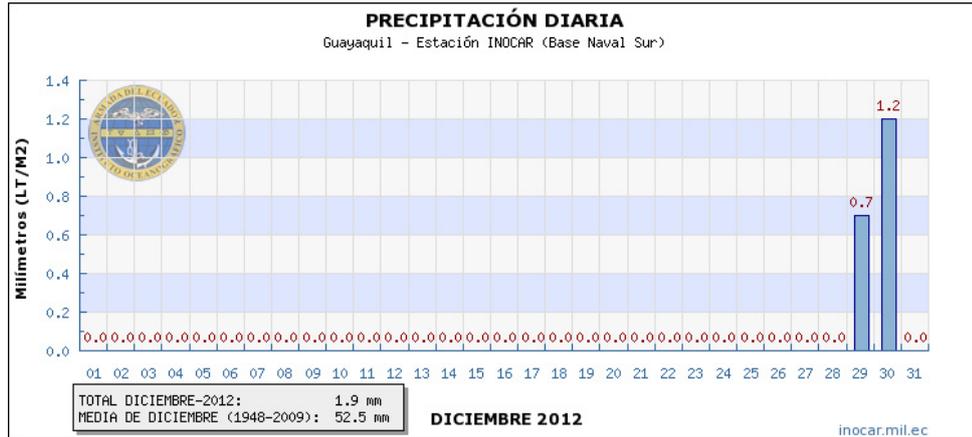
- [61] Suárez, J., Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Instituto de Investigaciones Sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda., Bucaramanga, Colombia, 1998.
- [62] Vera Grunauer, Xavier (2005). Estudio geotécnico fase II (Investigación y estudio del comportamiento dinámico del subsuelo y la microzonificación sísmica de la ciudad de Guayaquil). Guayaquil: Instituto de Investigación y Desarrollo Facultad de Ingeniería IIFIUC.
- [63] Ucar, R., "Cálculo de Anclajes en Taludes con superficie de Deslizamiento Circular". Trabajo de Ascenso para optar a la Categoría de Profesor Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, 1985.
- [64] Varnes, D.J., Landslide types and processes, chap. 3 of Landslides and engineering practice: Natl. Research Council, Highway Research Board Spec. Report 29, 20-50. Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1958.
- [65] Varnes, D.J., Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice. France: UNESCO, 1984.

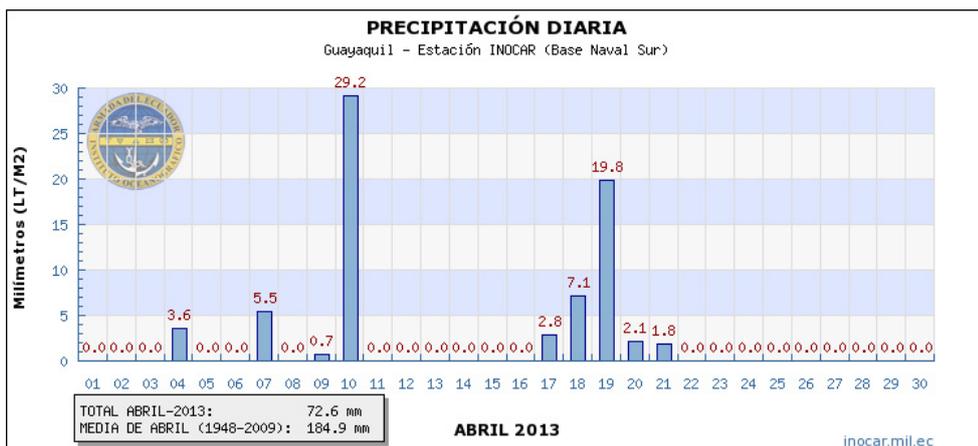
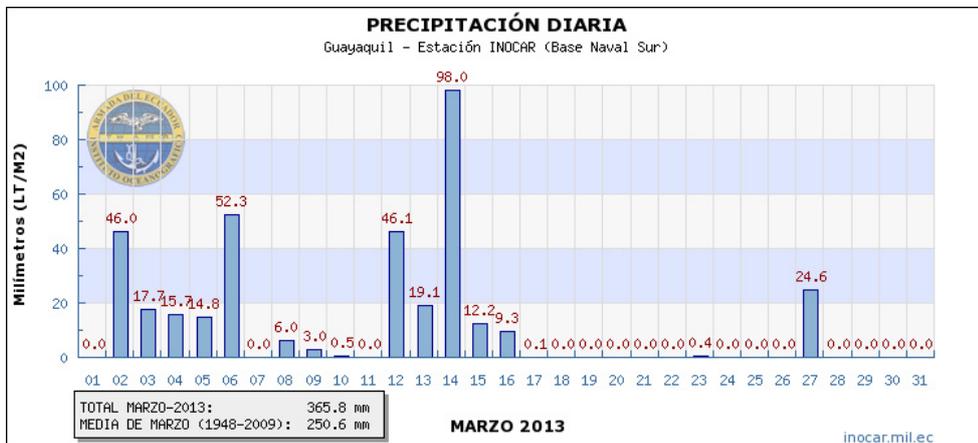
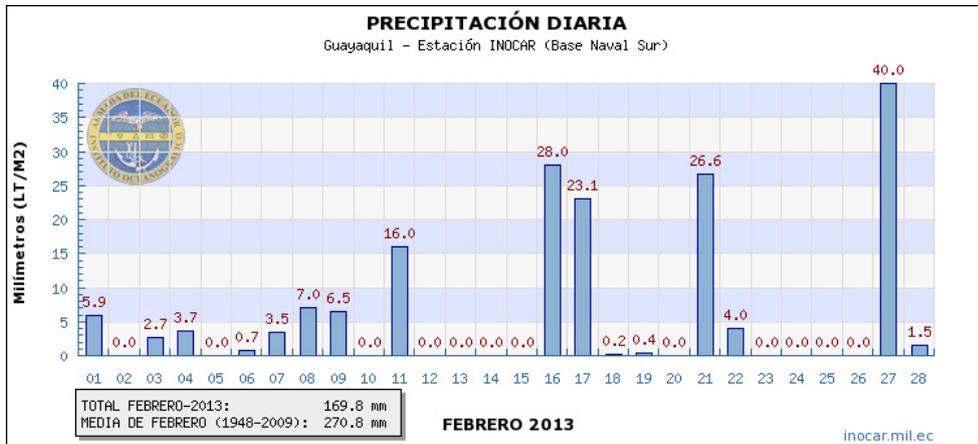
- [66] Wyllie, Duncan C., W. Mah, Christopher. (2005). Rock slope Engineering: Chapter 5 Ground Water. USA, New York: Spon Press.
- [67] Sarma S. K. (1968) Response characteristics and stability of earth dams during strong earthquakes. PhD Thesis, Imperial College of Science & Technology, University of London.
- [68] Corporación Andina de Fomento. El fenómeno El Niño 1997-1998 Memoria, retos y soluciones.
- [69] Comité ejecutivo de la norma ecuatoriana de la construcción. Norma ecuatoriana de la construcción: Capítulo 2 Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente. 2013. Quito: Ecuador.
- [70] Wischmeier y Smith. (1978). Universal soil loss equation. Agriculture Handbook No. 537. Washington, DC: US.
- [71] Figueroa Pin Víctor (2011). "Levantamiento topográfico de taludes próximos al cementerio general de Guayaquil" Tesis de Postgrado U. de Guayaquil, 2011.

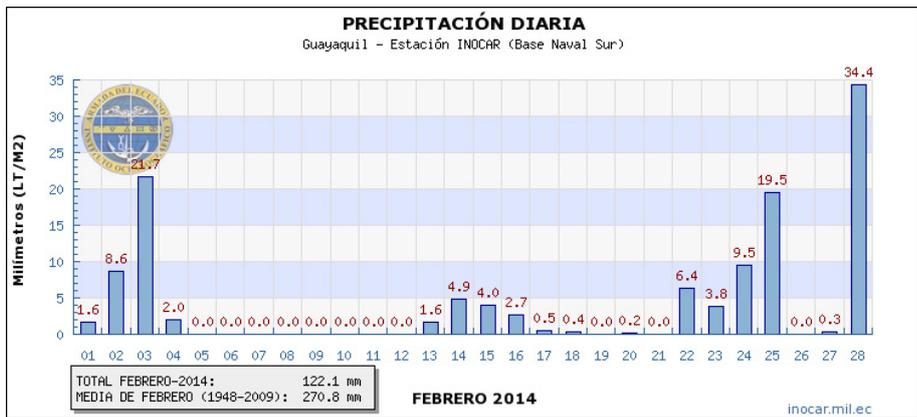
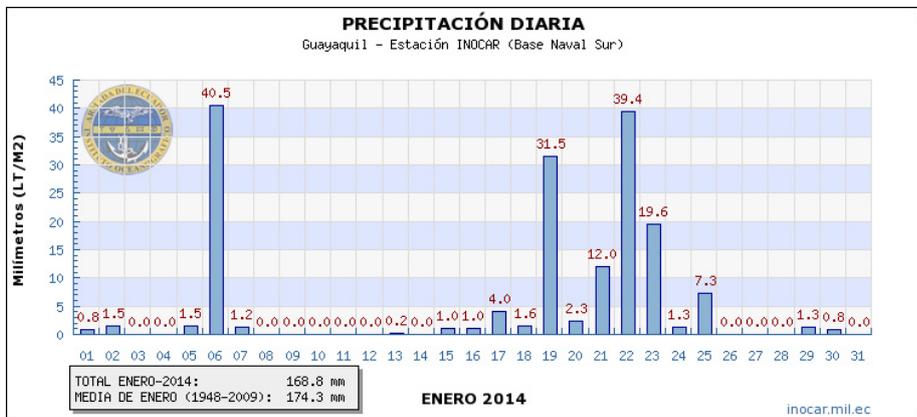
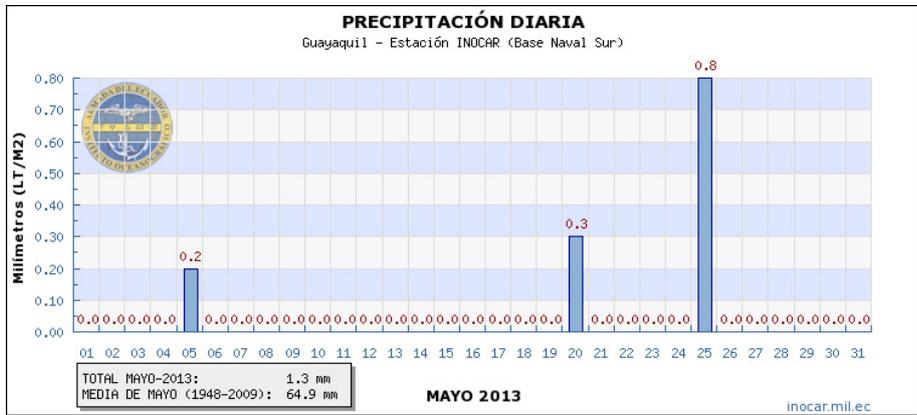
ANEXOS

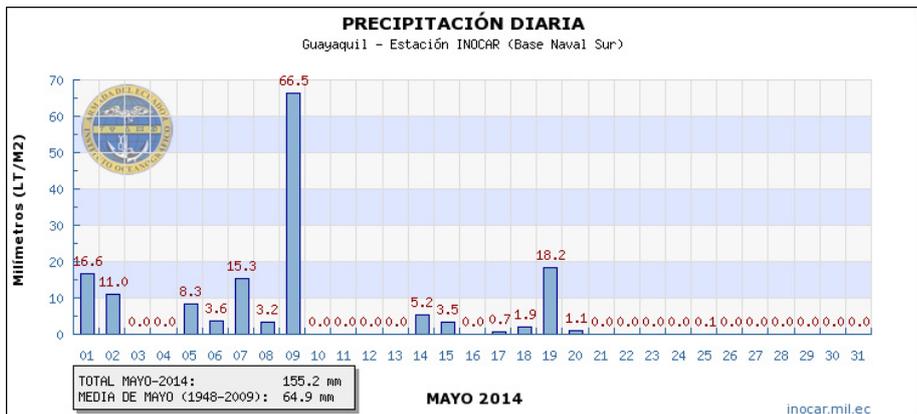
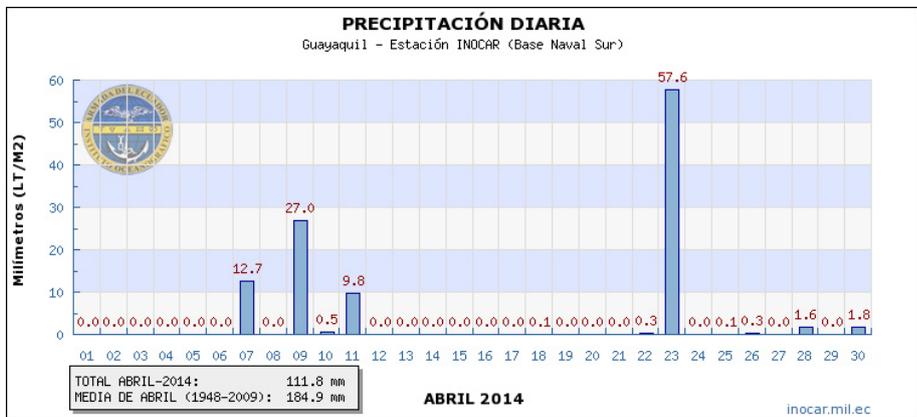
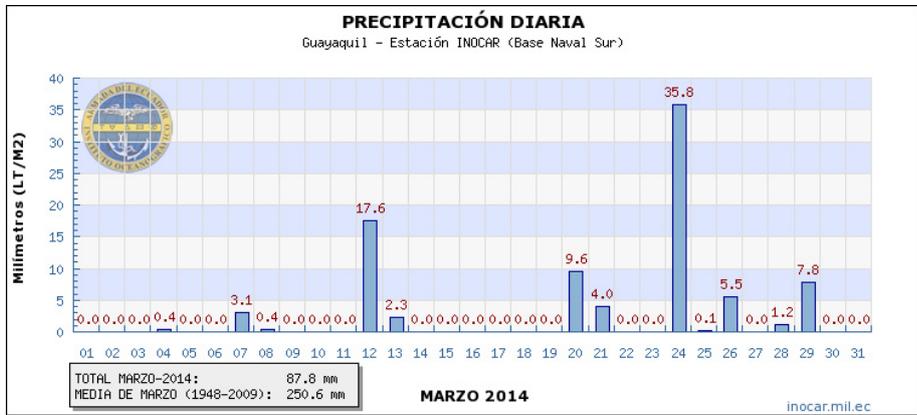
Anexo A

Gráficas de precipitación mensual medida por INOCAR









Anexo B

Memorias de cálculo de la corrida #1 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular"

```

GALENA 6.00 Analysis Results                               License: Escuela Superior Politécnica del Litoral
-----
Project: Tesis de Grado ESPOL, Miguel Angel Chavez Abril
File: F:\TMA\Estabilidad Bastion Popular.gmf              Processed: 18 Feb 2015 17:32:01
-----

DATA: Analysis 1 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bation Popular

Material Properties (4 materials)
-----
Material: 1 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo relleno algo consolidado
Cohesion Phi UnitWeight Ru
12.00 17.0 14.66 Auto
Material: 2 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo Residual y roca muy meteorizada
Cohesion Phi UnitWeight Ru
15.00 22.0 15.20 Auto
Material: 3 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Roca limolitas fraturadas, meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
45.00 28.0 18.50 Auto
Material: 4 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Rocas limolitas poco meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
150.00 31.0 19.00 Auto

Water Properties
-----
Unit weight of water: 9.810 Unit weight of water/medium above ground: 0.000

Material Profiles (4 profiles)
-----
Profile: 1 (2 points) Material beneath: 1 - Suelo relleno algo consolidado
-0.10 85.00 206.30
Profile: 2 (24 points) Material beneath: 2 - Suelo Residual y roca muy meteorizada
-0.10 80.20 17.10 80.00 28.20 78.10 37.00 75.10 41.60 73.00
46.20 69.10 46.60 65.70 51.40 59.60 58.70 55.20 69.20 48.80
80.30 43.50 89.10 39.50 100.00 36.40 111.30 33.50 119.00 31.80
131.40 28.90 144.20 25.70 150.20 24.30 163.80 22.80 176.60 21.50
183.50 19.00 192.50 16.30 200.70 15.10 206.30 16.30

```

```

Profile: 3 (18 points)  Material beneath: 3 - Roca limolitas fracturadas, meteorizadas
-0.10  75.30  10.60  74.10  25.90  72.00  37.40  67.40  44.30  62.60
51.60  57.10  60.60  51.70  70.30  46.00  78.20  42.50  87.40  38.30
98.70  34.30  110.00  30.50  125.50  27.20  138.30  24.70  153.20  20.90
167.20  18.40  182.90  16.10  206.30  16.30
Profile: 4 (12 points)  Material beneath: 4 - Rocas limolitas poco meteorizadas
-0.10  59.00  28.80  52.30  56.90  44.40  79.50  38.50  103.50  30.10
117.40  24.70  135.20  19.90  156.70  14.80  176.20  11.90  190.60  9.60
200.30  8.60  206.30  16.30

Slope Surface (25 points)
-----
-0.10  80.20  17.10  80.00  28.20  78.10  37.00  75.10  41.60  73.00
46.20  69.10  51.20  66.80  60.20  63.60  68.60  62.60  76.70  60.10
87.40  56.10  98.10  49.40  109.40  44.40  116.50  40.60  123.60  37.20
132.20  36.40  142.90  35.20  151.90  34.30  163.80  30.80  172.40  27.20
177.00  24.30  186.00  20.90  191.90  19.00  198.80  17.80  206.30  16.30

Phreatic Surface (12 points)
-----
-0.20  56.20  19.50  51.70  39.10  46.80  54.10  42.00  70.70  37.30
85.70  33.20  103.20  27.80  122.70  20.90  145.50  15.00  168.50  10.90
192.40  7.60  205.20  7.30

Failure Surface
-----
Initial non-circular surface for critical search (8 points)
46.20  69.10  63.60  55.00  84.10  42.50  96.80  38.10  114.00  33.10
135.00  28.70  154.00  25.90  176.94  24.34

Variable Restraints
-----
Horizontal range around X-Left: 39.60  Trial positions within range: 6
Horizontal range around X-Right: 18.60  Trial positions within range: 6
Vertical range around Mid-Point: 16.40  Trial positions within range: 20

```

RESULTS: Analysis 1 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bation Popular

Sarma Non-Vertical Slice Method of Analysis - Non-Circular Failure Surface
 Critical Failure Surface Search using Multiple Surface Generation Techniques

Factor of Safety for initial failure surface approximation: 1.29

There were: 553 successful analyses from a total of 721 trial surfaces
 167 analyses terminated due to unacceptable geometry
 1 analyses that failed to produce a result

Critical (minimum) Factor of Safety: 1.29

Critical Acceleration (Kc): 0.092

Negative normal stresses exist on the base and/or side of one or more slices - examine slice data and consult the GALENA Help utility

Surface and Results Summary (Lowest 99 Factor of Safety surfaces)

| Surface | X-Left | Y-Left | X-Right | Y-Right | Y-Deflection | FoS | Kc |
|---------|--------|--------|---------|---------|--------------|-------|-------|
| 1 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.285 | 0.092 |
| 2 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.293 | 0.094 |
| 3 | 46.20 | 69.10 | 176.94 | 24.34 | 0.00 | 1.293 | 0.094 |
| 4 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.294 | 0.094 |
| 5 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.295 | 0.095 |
| 6 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.298 | 0.098 |
| 7 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.302 | 0.098 |
| 8 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.302 | 0.098 |
| 9 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.302 | 0.101 |
| 10 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 4.75 | 1.302 | 0.098 |
| 11 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.302 | 0.098 |
| 12 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.303 | 0.099 |
| 13 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.306 | 0.098 |
| 14 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.306 | 0.099 |
| 15 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.307 | 0.099 |
| 16 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.309 | 0.103 |
| 17 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.309 | 0.101 |
| 18 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.311 | 0.100 |
| 19 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -0.43 | 1.312 | 0.104 |
| 20 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.312 | 0.101 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.314 | 0.102 |
| 22 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.315 | 0.104 |
| 23 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.315 | 0.104 |
| 24 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.315 | 0.101 |
| 25 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.317 | 0.102 |
| 26 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 4.75 | 1.317 | 0.104 |
| 27 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 5.61 | 1.319 | 0.104 |
| 28 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.319 | 0.104 |
| 29 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.320 | 0.103 |
| 30 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 1.29 | 1.321 | 0.104 |
| 31 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.321 | 0.104 |
| 32 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.322 | 0.104 |
| 33 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.323 | 0.107 |
| 34 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 3.02 | 1.323 | 0.105 |
| 35 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.325 | 0.106 |
| 36 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.88 | 1.325 | 0.106 |
| 37 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 3.88 | 1.325 | 0.107 |
| 38 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.329 | 0.108 |
| 39 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.329 | 0.108 |
| 40 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.329 | 0.106 |
| 41 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.330 | 0.107 |
| 42 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.331 | 0.108 |
| 43 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.331 | 0.109 |
| 44 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.334 | 0.110 |
| 45 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 3.88 | 1.334 | 0.108 |
| 46 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.334 | 0.111 |
| 47 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.334 | 0.110 |
| 48 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | 0.43 | 1.335 | 0.112 |
| 49 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.336 | 0.114 |
| 50 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | 2.16 | 1.336 | 0.114 |
| 51 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | 1.29 | 1.336 | 0.109 |
| 52 | 58.08 | 64.35 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.337 | 0.114 |
| 53 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.337 | 0.109 |
| 54 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 3.02 | 1.338 | 0.110 |
| 55 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.339 | 0.112 |
| 56 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -0.43 | 1.339 | 0.111 |
| 57 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 3.88 | 1.340 | 0.111 |
| 58 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 4.75 | 1.342 | 0.113 |
| 59 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.344 | 0.116 |
| 60 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 5.61 | 1.344 | 0.113 |
| 61 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 2.16 | 1.344 | 0.111 |

Critical Failure Surface (8 points)
 34.32 76.01 53.55 59.91 76.20 45.66 90.24 40.84 109.25 35.16
 132.45 29.93 153.45 26.22 178.80 23.62

Non-Vertical Slice Geometry (22 slices)

| Slice | Left Hand Side | | | | Right Hand Side | | | | X-S Area | X-S Length | X-S Area | X-S Length | X-S Area | X-S Length |
|-------|----------------|-------|----------|----------|-----------------|-------|----------|----------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
| | X-Top | Y-Top | X-Bottom | Y-Bottom | X-Top | Y-Top | X-Bottom | Y-Bottom | | | | | | |
| 1 | 34.32 | 76.01 | 34.32 | 76.01 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.45 | 2.18 | 2.84 | 39.9 | 2.18 | 2.84 |
| 2 | 37.00 | 75.10 | 36.50 | 74.19 | -29.1 | 1.04 | 8.72 | 39.9 | 8.72 | 3.96 | 5.16 | 39.9 | 3.96 | 5.16 |
| 3 | 41.60 | 73.00 | 40.45 | 70.88 | -28.4 | 2.41 | 14.16 | 39.9 | 14.16 | 4.64 | 6.05 | 39.9 | 4.64 | 6.05 |
| 4 | 46.20 | 69.10 | 45.09 | 66.99 | -27.7 | 2.38 | 17.24 | 39.9 | 17.24 | 4.35 | 5.67 | 39.9 | 4.35 | 5.67 |
| 5 | 51.20 | 66.80 | 49.44 | 63.35 | -27.0 | 3.87 | 24.95 | 39.9 | 24.95 | 4.11 | 5.36 | 39.9 | 4.11 | 5.36 |
| 6 | 56.10 | 65.06 | 53.55 | 59.91 | -26.4 | 5.74 | 27.06 | 32.2 | 27.06 | 3.73 | 4.40 | 32.2 | 3.73 | 4.40 |
| 7 | 60.20 | 63.60 | 57.27 | 57.57 | -25.9 | 6.70 | 29.10 | 32.2 | 29.10 | 6.96 | 8.22 | 32.2 | 6.96 | 8.22 |
| 8 | 68.60 | 62.60 | 64.24 | 53.19 | -24.9 | 10.37 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 7.36 | 8.70 | 32.2 | 7.36 | 8.70 |
| 9 | 76.70 | 60.10 | 71.60 | 48.56 | -23.8 | 12.62 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 4.60 | 5.44 | 32.2 | 4.60 | 5.44 |
| 10 | 81.60 | 58.27 | 76.20 | 45.66 | -23.2 | 13.71 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 6.03 | 6.38 | 32.2 | 6.03 | 6.38 |
| 11 | 87.40 | 56.10 | 82.24 | 43.59 | -22.4 | 13.53 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 8.00 | 8.46 | 32.2 | 8.00 | 8.46 |
| 12 | 94.48 | 51.66 | 90.24 | 40.84 | -21.4 | 11.63 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 10.0 | 10.46 | 32.2 | 10.0 | 10.46 |
| 13 | 98.10 | 49.40 | 94.36 | 39.61 | -20.9 | 10.48 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 12.7 | 13.19 | 32.2 | 12.7 | 13.19 |
| 14 | 109.40 | 44.40 | 109.25 | 35.16 | -1.0 | 9.24 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 12.7 | 13.19 | 32.2 | 12.7 | 13.19 |
| 15 | 116.50 | 40.60 | 114.31 | 34.02 | -18.4 | 6.94 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 7.74 | 7.94 | 32.2 | 7.74 | 7.94 |
| 16 | 123.60 | 37.20 | 122.05 | 32.27 | -17.4 | 5.16 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 10.40 | 10.66 | 32.2 | 10.40 | 10.66 |
| 17 | 132.20 | 36.40 | 132.45 | 29.93 | 2.2 | 6.47 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 8.62 | 8.75 | 32.2 | 8.62 | 8.75 |
| 18 | 142.90 | 35.20 | 141.07 | 28.41 | -15.1 | 7.04 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 12.38 | 12.57 | 32.2 | 12.38 | 12.57 |
| 19 | 151.90 | 34.30 | 153.45 | 26.22 | 10.9 | 8.23 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 7.14 | 7.18 | 32.2 | 7.14 | 7.18 |
| 20 | 163.80 | 30.80 | 162.58 | 25.28 | -12.5 | 5.65 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 9.24 | 9.29 | 32.2 | 9.24 | 9.29 |
| 21 | 172.40 | 27.20 | 171.83 | 24.34 | -11.3 | 2.92 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 5.8 | 5.8 | 32.2 | 5.8 | 5.8 |
| 22 | 177.00 | 24.30 | 176.91 | 23.81 | -10.7 | 0.49 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 5.8 | 5.8 | 32.2 | 5.8 | 5.8 |
| RHS | 178.80 | 23.62 | 178.80 | 23.62 | 0.0 | 0.00 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 1.89 | 1.90 | 32.2 | 1.89 | 1.90 |
| | | | | | | | | | | 1119.60 | 157.11 | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|----------|-------|-------|----------------------|-------------------|---------------------|-------|-------------|----------------------|
| 15 | 116.50 | 40.60 | 114.31 | 34.02 | -18.4 | 6.94 | 47.50 | 12.7 | 7.74 | 7.94 | |
| 16 | 123.60 | 37.20 | 122.05 | 32.27 | -17.4 | 5.16 | 55.14 | 12.7 | 10.40 | 10.66 | |
| 17 | 132.20 | 36.40 | 132.45 | 29.93 | -2.2 | 6.47 | 65.12 | 10.0 | 8.62 | 8.75 | |
| 18 | 142.90 | 35.20 | 141.07 | 28.41 | -15.1 | 7.04 | 79.73 | 10.0 | 12.38 | 12.57 | |
| 19 | 151.90 | 34.30 | 153.45 | 26.22 | 10.9 | 8.23 | 71.14 | 5.8 | 9.13 | 9.18 | |
| 20 | 163.80 | 30.80 | 162.58 | 25.28 | -12.5 | 5.65 | 39.43 | 5.8 | 9.24 | 9.29 | |
| 21 | 172.40 | 27.20 | 171.83 | 24.34 | -11.3 | 2.92 | 8.68 | 5.8 | 5.08 | 5.11 | |
| 22 | 177.00 | 24.30 | 176.91 | 23.81 | -10.7 | 0.49 | 0.47 | 5.8 | 1.89 | 1.90 | |
| RHS | 178.80 | 23.62 | 178.80 | 23.62 | 0.0 | 0.00 | ----- | ----- | ----- | ----- | |
| | | | | | | | X-S Area: 1119.60 | Path Length: 157.11 | | | |
| Non-Vertical Slice Properties (22 slices) | | | | | | | | | | | |
| Slice | Left-Hand-Side | Phi | Cohesion | Phi | Base | Weight | Vert | Total-Extnl-Force | Horiz | Water-Force | Effect-Normal-Stress |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 22.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2 | 15.00 | 22.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 132.49 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -21.91 |
| 3 | 15.00 | 22.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 215.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -41.67 |
| 4 | 15.00 | 22.0 | 12.75 | 18.2 | 18.2 | 252.98 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -5.46 |
| 5 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 364.30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 10.82 |
| 6 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 395.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 27.05 |
| 7 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1008.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 36.69 |
| 8 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1428.83 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 48.68 |
| 9 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1019.11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 70.71 |
| 10 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1247.75 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 85.54 |
| 11 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1531.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 134.85 |
| 12 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 684.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 91.07 |
| 13 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1853.27 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 111.16 |
| 14 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 744.73 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 122.13 |
| 15 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 693.47 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 149.90 |
| 16 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 805.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 114.10 |
| 17 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 950.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 167.78 |
| 18 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1164.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 203.88 |
| 19 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1058.61 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 106.35 |
| 20 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 575.69 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 122.70 |
| 21 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 126.68 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 169.82 |
| 22 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 6.82 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 18.70 |
| RHS | 0.00 | 0.0 | | | | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | | | | | | X-S Weight: 16361.99 | | | | | |

Anexo C

Memorias de cálculo de la corrida #2 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular"

```

Slope Surface (25 points)
-----
-0.10      80.20      17.10      80.00      28.20      78.10      37.00      75.10      41.60      73.00
46.20      69.10      51.20      66.80      60.20      63.60      68.60      62.60      76.70      60.10
87.40      56.10      98.10      49.40      109.40      44.40      116.50      40.60      123.60      37.20
132.20     36.40      142.90      35.20      151.90      34.30      163.80      30.80      172.40      27.20
177.00     24.30      186.00      20.90      191.90      19.00      198.80      17.80      206.30      16.30

Phreatic Surface (15 points)
-----
0.00      69.10      14.30      66.00      28.90      63.10      43.60      58.40      51.70      56.00
61.90     53.10      79.90      46.80      94.50      42.50      108.20      38.20      120.80      34.40
139.10     29.40      158.00      24.40      172.80      21.60      182.00      20.40      191.20      19.20

Failure Surface
-----
Initial non-circular surface for critical search (8 points)
46.20     69.10      63.60      55.00      84.10      42.50      96.80      38.10      114.00      33.10
135.00     28.70      154.00      25.90      176.94      24.34

Variable Restraints
-----
Horizontal range around X-Left:      39.60      Trial positions within range:      6
Horizontal range around X-Right:     18.60      Trial positions within range:      6
Vertical range around Mid-Point:     16.40      Trial positions within range:     20

```

DATA: Analysis 2 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bacion Popular

Material Properties (4 materials)

```

-----
Material: 1 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo relleno algo consolidado
Cohesion Phi UnitWeight Ru
12.00 17.0 14.60 Auto
Material: 2 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo Residual y roca muy meteorizada
Cohesion Phi UnitWeight Ru
15.00 22.0 15.20 Auto
Material: 3 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Rocas limolitas fraturadas, meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
45.00 28.0 18.50 Auto
Material: 4 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Rocas limolitas poco meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
150.00 31.0 19.00 Auto
  
```

Water Properties

Unit weight of water: 9.810

Unit weight of water/medium above ground: 0.000

Material Profiles (4 Profiles)

```

-----
Profile: 1 (2 points) Material beneath: 1 - Suelo relleno algo consolidado
-0.10 85.00 206.30
Profile: 2 (24 points) Material beneath: 2 - Suelo Residual y roca muy meteorizada
-0.10 80.20 17.10 80.00 28.20 78.10 37.00
46.20 69.10 46.60 65.70 51.40 59.60 58.70
80.30 43.50 89.10 39.50 100.00 36.40 111.30
131.40 28.90 144.20 25.70 150.20 24.30 163.80
183.50 19.00 192.50 16.30 200.70 15.10 206.30
Profile: 3 (18 points) Material beneath: 3 - Rocas limolitas fraturadas, meteorizadas
-0.10 75.30 10.60 74.10 25.90 72.00 37.40
51.60 57.10 60.60 51.70 70.30 46.00 78.20
98.70 34.30 110.00 30.80 125.50 27.20 138.30
167.20 18.40 182.90 16.10 206.30 16.30
Profile: 4 (12 points) Material beneath: 4 - Rocas limolitas poco meteorizadas
-0.10 59.00 28.80 52.30 56.90 44.40 79.50
117.40 24.70 135.20 19.90 156.70 14.80 176.20
200.30 8.60 206.30 16.30
  
```

RESULTS: Analysis 2 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bation Popular

Sarma Non-Vertical Slice Method of Analysis - Non-Circular Failure Surface

Critical Failure Surface Search using Multiple Surface Generation Techniques

Factor of Safety for initial failure surface approximation: 1.18

There were: 553 successful analyses from a total of 721 trial surfaces
167 analyses terminated due to unacceptable geometry
1 analyses that failed to produce a result

Critical (minimum) Factor of Safety: 1.17

Critical Acceleration (Kc): 0.054

Negative normal stresses exist on the base and/or side of one or more slices - examine slice data and consult the GALENA Help utility

Surface and Results Summary (Lowest 99 Factor of Safety surfaces)

| Surface | X-Left | Y-Left | X-Right | Y-Right | Y-Deflection | FoS | Kc |
|---------|--------|--------|---------|---------|--------------|-------|-------|
| 1 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.168 | 0.054 |
| 2 | 46.20 | 69.10 | 176.94 | 24.34 | 0.00 | 1.175 | 0.056 |
| 3 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.185 | 0.059 |
| 4 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.186 | 0.059 |
| 5 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.186 | 0.060 |
| 6 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.189 | 0.062 |
| 7 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.191 | 0.061 |
| 8 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.192 | 0.061 |
| 9 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.194 | 0.062 |
| 10 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.196 | 0.065 |
| 11 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.196 | 0.064 |
| 12 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.198 | 0.064 |
| 13 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.198 | 0.063 |
| 14 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.205 | 0.065 |
| 15 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.206 | 0.066 |
| 16 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.208 | 0.066 |
| 17 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.211 | 0.068 |
| 18 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.212 | 0.066 |
| 19 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.213 | 0.071 |
| 20 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.216 | 0.071 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.217 | 0.068 |
| 22 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.217 | 0.071 |
| 23 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.218 | 0.070 |
| 24 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.218 | 0.069 |
| 25 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.222 | 0.073 |
| 26 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.222 | 0.076 |
| 27 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.223 | 0.072 |
| 28 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.226 | 0.074 |
| 29 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.227 | 0.073 |
| 30 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.228 | 0.077 |
| 31 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.228 | 0.075 |
| 32 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.228 | 0.073 |
| 33 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.228 | 0.076 |
| 34 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.229 | 0.076 |
| 35 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.230 | 0.074 |
| 36 | 58.08 | 64.35 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.232 | 0.079 |
| 37 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.233 | 0.077 |
| 38 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.233 | 0.076 |
| 39 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.233 | 0.074 |
| 40 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.233 | 0.076 |
| 41 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.234 | 0.076 |
| 42 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.234 | 0.078 |
| 43 | 42.24 | 72.46 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.234 | 0.074 |
| 44 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.234 | 0.076 |
| 45 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.235 | 0.075 |
| 46 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.235 | 0.080 |
| 47 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.236 | 0.077 |
| 48 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.236 | 0.076 |
| 49 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.237 | 0.082 |
| 50 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.237 | 0.077 |
| 51 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.242 | 0.079 |
| 52 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.242 | 0.078 |
| 53 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.244 | 0.079 |
| 54 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.245 | 0.078 |
| 55 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.245 | 0.079 |
| 56 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.245 | 0.079 |
| 57 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.248 | 0.079 |
| 58 | 26.40 | 78.41 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.249 | 0.081 |
| 59 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -2.16 | 1.249 | 0.080 |
| 60 | 58.08 | 64.35 | 167.64 | 29.19 | -3.88 | 1.250 | 0.085 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 61 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -3.88 | 1.251 | 0.080 |
| 62 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.252 | 0.081 |
| 63 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.253 | 0.083 |
| 64 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.255 | 0.081 |
| 65 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 4.75 | 1.255 | 0.083 |
| 66 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.256 | 0.084 |
| 67 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.256 | 0.084 |
| 68 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -0.43 | 1.259 | 0.086 |
| 69 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -3.88 | 1.259 | 0.084 |
| 70 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.259 | 0.082 |
| 71 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.88 | 1.259 | 0.085 |
| 72 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -3.02 | 1.259 | 0.082 |
| 73 | 58.08 | 64.35 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.259 | 0.086 |
| 74 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.260 | 0.086 |
| 75 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | -0.43 | 1.260 | 0.085 |
| 76 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 1.29 | 1.261 | 0.085 |
| 77 | 58.08 | 64.35 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.261 | 0.085 |
| 78 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.262 | 0.085 |
| 79 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.262 | 0.084 |
| 80 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.262 | 0.084 |
| 81 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -5.61 | 1.263 | 0.085 |
| 82 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -4.75 | 1.264 | 0.085 |
| 83 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.264 | 0.083 |
| 84 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.264 | 0.084 |
| 85 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.265 | 0.083 |
| 86 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 0.43 | 1.265 | 0.085 |
| 87 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.265 | 0.088 |
| 88 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.266 | 0.086 |
| 89 | 26.40 | 78.41 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.267 | 0.087 |
| 90 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.268 | 0.089 |
| 91 | 58.08 | 64.35 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.269 | 0.092 |
| 92 | 66.00 | 62.91 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.269 | 0.086 |
| 93 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -2.16 | 1.271 | 0.087 |
| 94 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.271 | 0.089 |
| 95 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -3.02 | 1.271 | 0.085 |
| 96 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -4.75 | 1.272 | 0.091 |
| 97 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.272 | 0.088 |
| 98 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -3.88 | 1.273 | 0.086 |
| 99 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.273 | 0.086 |

ave: Y-Deflection values are failure surface mid-point vertical distances from the initial failure surface mid-point

Critical Failure Surface (8 points)

 34.32 76.01 53.55 59.64 76.20 45.14 90.24 40.10 109.25 34.30
 132.45 29.13 153.45 25.70 178.80 23.62

Non-Vertical Slice Geometry (22 slices)

| Slice | Left Hand Side | | | | Angle | Length | X-S Area | Base | | |
|-------|----------------|-------|--------|--------|-------|-----------|----------|--------------|--------|--------|
| | X-Top | Y-Top | X-Base | Y-Base | | | | Angle | Width | Length |
| 1 | 34.32 | 76.01 | 34.32 | 76.01 | 0.0 | 0.00 | 1.48 | 40.4 | 2.16 | 2.84 |
| 2 | 37.00 | 75.10 | 36.48 | 74.17 | -29.1 | 1.06 | 8.94 | 40.4 | 3.94 | 5.17 |
| 3 | 41.60 | 73.00 | 40.42 | 70.82 | -28.4 | 2.48 | 14.70 | 40.4 | 4.82 | 6.07 |
| 4 | 46.20 | 69.10 | 45.04 | 66.89 | -27.7 | 2.50 | 18.02 | 40.4 | 4.33 | 5.68 |
| 5 | 51.20 | 66.80 | 49.37 | 63.20 | -27.0 | 4.04 | 26.64 | 40.4 | 4.18 | 5.49 |
| 6 | 56.21 | 65.02 | 53.55 | 59.64 | -26.4 | 6.00 | 27.43 | 32.6 | 3.61 | 4.29 |
| 7 | 60.20 | 63.60 | 57.16 | 57.33 | -25.9 | 6.97 | 71.52 | 32.6 | 6.94 | 8.24 |
| 8 | 68.60 | 62.60 | 64.10 | 52.89 | -24.9 | 10.70 | 101.02 | 32.6 | 7.94 | 8.72 |
| 9 | 76.70 | 60.10 | 71.44 | 48.19 | -23.8 | 13.02 | 74.97 | 32.6 | 4.77 | 5.66 |
| 10 | 81.79 | 58.20 | 76.20 | 45.14 | -23.2 | 14.20 | 86.00 | 19.8 | 5.31 | 6.17 |
| 11 | 87.40 | 56.10 | 82.01 | 43.05 | -22.4 | 14.12 | 113.61 | 19.8 | 8.22 | 8.74 |
| 12 | 94.71 | 51.52 | 90.24 | 40.10 | -21.4 | 12.27 | 46.69 | 17.0 | 3.86 | 4.04 |
| 13 | 98.10 | 49.40 | 94.10 | 38.92 | -20.9 | 11.22 | 146.03 | 17.0 | 15.15 | 15.83 |
| 14 | 109.40 | 44.40 | 109.25 | 34.30 | -0.9 | 10.10 | 55.15 | 12.6 | 4.80 | 4.92 |
| 15 | 116.50 | 40.60 | 114.05 | 33.23 | -18.4 | 7.76 | 53.99 | 12.6 | 7.76 | 7.95 |
| 16 | 123.60 | 37.20 | 121.81 | 31.50 | -17.4 | 5.97 | 63.63 | 12.6 | 10.64 | 10.90 |
| 17 | 132.20 | 36.40 | 132.45 | 29.13 | 2.0 | 7.28 | 71.57 | 9.3 | 8.44 | 8.55 |
| 18 | 142.90 | 35.20 | 140.89 | 27.75 | -15.1 | 7.71 | 86.81 | 9.3 | 12.56 | 12.72 |
| 19 | 151.90 | 34.30 | 153.45 | 25.70 | 10.2 | 8.73 | 75.37 | 4.7 | 9.06 | 9.09 |
| 20 | 163.80 | 30.80 | 162.51 | 24.96 | -12.5 | 5.98 | 41.61 | 4.7 | 9.29 | 9.32 |
| 21 | 172.40 | 27.20 | 171.80 | 24.20 | -11.3 | 3.06 | 9.14 | 4.7 | 5.10 | 5.12 |
| 22 | 177.00 | 24.30 | 176.90 | 23.78 | -10.7 | 0.53 | 0.50 | 4.7 | 1.89 | 1.90 |
| RHS | 178.80 | 23.62 | 178.80 | 23.62 | 0.0 | 0.00 | ----- | ----- | ----- | ----- |
| | | | | | | X-S Area: | 1194.84 | Path Length: | 157.42 | |

Anexo D

Memorias de cálculo de la corrida #3 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular"

```

DATA: Analysis 3 - Analisis de estabilidad en las laderas de Baticon Popular
-----
Material Properties (4 materials)
-----
Material: 1 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo relleno algo consolidado
Cohesion Phi UnitWeight Ru
12.00 17.0 14.60 Auto
Material: 2 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo Residual y roca muy meteorizada
Cohesion Phi UnitWeight Ru
15.00 22.0 15.20 Auto
Material: 3 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Roca limolitas fraturadas, meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
45.00 28.0 18.50 Auto
Material: 4 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Rocas limolitas poco meteorizadas
Cohesion Phi UnitWeight Ru
150.00 31.0 19.00 Auto
-----
Water Properties
-----
Unit weight of water: 9.810 Unit weight of water/medium above ground: 0.000
-----
Material Profiles (4 profiles)
-----
Profile: 1 (2 points) Material beneath: 1 - Suelo relleno algo consolidado
-0.10 85.00 206.30 85.00
Profile: 2 (24 points) Material beneath: 2 - Suelo Residual y roca muy meteorizada
-0.10 80.20 17.10 80.00 28.20 78.10 37.00
46.20 69.10 46.60 65.70 51.40 59.60 58.70
80.30 43.50 89.10 39.50 100.00 36.40 111.30
131.40 28.90 144.20 25.70 150.20 24.30 163.80
183.50 19.00 192.50 16.30 200.70 15.10 206.30
Profile: 3 (18 points) Material beneath: 3 - Roca limolitas fraturadas, meteorizadas
-0.10 75.30 10.60 74.10 25.90 72.00 37.40
51.60 57.10 60.60 51.70 70.30 46.00 78.20
98.70 34.30 110.00 30.50 125.50 27.20 138.30
167.20 18.40 182.90 16.10 206.30 16.30
Profile: 4 (12 points) Material beneath: 4 - Rocas limolitas poco meteorizadas
-0.10 59.00 28.80 52.30 56.90 44.40 79.50
117.40 24.70 135.20 19.90 156.70 14.80 176.20
200.30 8.60 206.30 16.30
-----

```

```

Slope Surface (25 points)
-----
-0.10      80.20      17.10      80.00      28.20      78.10      37.00      75.10      41.60      73.00
46.20      69.10      51.20      66.80      60.20      63.60      68.60      62.60      76.70      60.10
87.40      56.10      98.10      49.40      109.40      44.40      116.50      40.60      123.60      37.20
132.20     36.40      142.90     35.20     151.90     34.30     163.80     30.80     172.40     27.20
177.00     24.30     186.00     20.90     191.90     19.00     198.80     17.80     206.30     16.30

Pneumatic Surface (19 points)
-----
0.00      77.40      10.20      77.30      21.80      75.20      30.60      72.10      36.80      69.50
43.60     66.70     48.90     63.80     55.00     61.00     64.00     57.20     75.20     52.90
86.40     48.70     99.20     44.40     111.30    40.10     119.40    36.60     127.40    33.90
140.90    30.60     156.60    27.30     166.80    25.40     182.40    22.10

Failure Surface
-----
Initial non-circular surface for critical search (8 points)
46.20     69.10     63.60     55.00     84.10     42.50     96.80     38.10     114.00     33.10
135.00    28.70    154.00    25.90    176.94    24.34

Variable Restraints
-----
Horizontal range around X-Left:    39.60    Trial positions within range:    6
Horizontal range around X-Right:   18.60    Trial positions within range:    6
Vertical range around Mid-Point:   16.40    Trial positions within range:   20

```

RESULTS: Analysis 3 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bacion Popular

Sarma Non-Vertical Slice Method of Analysis - Non-Circular Failure Surface

 Critical Failure Surface Search using Multiple Surface Generation Techniques

Factor of Safety for initial failure surface approximation: 1.00

There were: 553 successful analyses from a total of 721 trial surfaces

167 analyses terminated due to unacceptable geometry

1 analyses that failed to produce a result

Critical (minimum) Factor of Safety: 0.98

Critical Acceleration (Kc): -0.007

Negative normal stresses exist on the base and/or side of one or more slices - examine slice data and consult the GALENA Help utility

Surface and Results Summary (Lowest 99 Factor of Safety surfaces)

| Surface | X-Left | Y-Left | X-Right | Y-Right | Y-Deflection | FoS | Kc |
|---------|--------|--------|---------|---------|--------------|-------|--------|
| 1 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 0.981 | -0.007 |
| 2 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 0.986 | -0.005 |
| 3 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.989 | -0.004 |
| 4 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.994 | -0.003 |
| 5 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.000 | 0.000 |
| 6 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.000 | 0.001 |
| 7 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.000 | -0.002 |
| 8 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.000 | 0.001 |
| 9 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.000 | 0.002 |
| 10 | 46.20 | 69.10 | 176.94 | 24.34 | 0.00 | 1.000 | -0.001 |
| 11 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.005 | 0.002 |
| 12 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.008 | 0.003 |
| 13 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.009 | 0.003 |
| 14 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.013 | 0.004 |
| 15 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.014 | 0.004 |
| 16 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.015 | 0.005 |
| 17 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.016 | 0.005 |
| 18 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.016 | 0.005 |
| 19 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.020 | 0.006 |
| 20 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.022 | 0.007 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.025 | 0.008 |
| 22 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.027 | 0.009 |
| 23 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.028 | 0.009 |
| 24 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.030 | 0.009 |
| 25 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.031 | 0.010 |
| 26 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.032 | 0.010 |
| 27 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.032 | 0.011 |
| 28 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.033 | 0.011 |
| 29 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.035 | 0.011 |
| 30 | 42.24 | 72.46 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.035 | 0.011 |
| 31 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.037 | 0.012 |
| 32 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.037 | 0.012 |
| 33 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.037 | 0.012 |
| 34 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 1.038 | 0.012 |
| 35 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.038 | 0.012 |
| 36 | 26.40 | 78.41 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 1.039 | 0.013 |
| 37 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.040 | 0.013 |
| 38 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.042 | 0.013 |
| 39 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 1.043 | 0.014 |
| 40 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.044 | 0.014 |
| 41 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.044 | 0.014 |
| 42 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.045 | 0.014 |
| 43 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | -0.43 | 1.046 | 0.015 |
| 44 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 4.75 | 1.046 | 0.015 |
| 45 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 1.047 | 0.014 |
| 46 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.047 | 0.015 |
| 47 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 3.88 | 1.048 | 0.015 |
| 48 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.049 | 0.015 |
| 49 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 1.049 | 0.015 |
| 50 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 1.051 | 0.016 |
| 51 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 1.051 | 0.017 |
| 52 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.054 | 0.017 |
| 53 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 1.055 | 0.017 |
| 54 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 1.056 | 0.017 |
| 55 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.057 | 0.017 |
| 56 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 1.057 | 0.018 |
| 57 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.057 | 0.018 |
| 58 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 1.060 | 0.021 |
| 59 | 26.40 | 78.41 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.060 | 0.019 |
| 60 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.061 | 0.021 |
| 61 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.064 | 0.020 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 61 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.064 | 0.020 |
| 62 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -0.43 | 1.064 | 0.021 |
| 63 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 1.064 | 0.022 |
| 64 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 1.064 | 0.020 |
| 65 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 1.066 | 0.021 |
| 66 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -3.02 | 1.066 | 0.020 |
| 67 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.067 | 0.021 |
| 68 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.068 | 0.022 |
| 69 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -2.16 | 1.068 | 0.021 |
| 70 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -3.88 | 1.068 | 0.021 |
| 71 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.068 | 0.021 |
| 72 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 1.069 | 0.023 |
| 73 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 0.43 | 1.070 | 0.022 |
| 74 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -4.75 | 1.070 | 0.022 |
| 75 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -3.02 | 1.071 | 0.023 |
| 76 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 1.071 | 0.025 |
| 77 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | 0.43 | 1.071 | 0.023 |
| 78 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.072 | 0.024 |
| 79 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 1.072 | 0.024 |
| 80 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.072 | 0.023 |
| 81 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -2.16 | 1.073 | 0.023 |
| 82 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -2.16 | 1.074 | 0.024 |
| 83 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.074 | 0.025 |
| 84 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 1.074 | 0.024 |
| 85 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 1.074 | 0.025 |
| 86 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.88 | 1.075 | 0.025 |
| 87 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -3.02 | 1.076 | 0.024 |
| 88 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 1.076 | 0.025 |
| 89 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -0.43 | 1.076 | 0.025 |
| 90 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.88 | 1.076 | 0.025 |
| 91 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 3.88 | 1.079 | 0.025 |
| 92 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -3.88 | 1.079 | 0.026 |
| 93 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 3.02 | 1.079 | 0.026 |
| 94 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -3.88 | 1.080 | 0.026 |
| 95 | 42.24 | 72.46 | 182.52 | 22.22 | -2.16 | 1.080 | 0.026 |
| 96 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -4.75 | 1.081 | 0.026 |
| 97 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | -1.29 | 1.081 | 0.026 |
| 98 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 1.081 | 0.027 |
| 99 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -5.61 | 1.081 | 0.026 |

Note: Y-Deflection values are failure surface mid-point vertical distances from the initial failure surface mid-point

Non-Vertical Slice Properties (22 slices)

| Slice | Left-Hand-Side | | Base | | Phi | Cohesion | Weight | Total-Extnl-Force | | - Water-Force - | | Effect-Normal-Stress | |
|-------|----------------|------|----------|------|------|----------|--------|-------------------|--------|-----------------|--------|----------------------|--------|
| | Cohesion | Phi | Cohesion | Phi | | | | Vert | Hoziz | Side | Base | Side | Base |
| 1 | 0.00 | 0.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 22.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.86 |
| 2 | 15.00 | 22.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 135.95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -31.41 | 17.00 |
| 3 | 15.00 | 22.0 | 15.00 | 22.0 | 22.0 | 223.51 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | -25.51 | 28.45 |
| 4 | 15.00 | 22.0 | 13.50 | 19.5 | 19.5 | 264.55 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.45 | -32.60 | 31.68 |
| 5 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 388.92 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.55 | 64.80 | -16.36 | 39.46 |
| 6 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 400.45 | 0.00 | 0.00 | 59.52 | 98.83 | -1.37 | 51.20 | 51.20 |
| 7 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1044.20 | 0.00 | 0.00 | 94.20 | 283.80 | 6.97 | 66.14 | 66.14 |
| 8 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1474.96 | 0.00 | 0.00 | 224.28 | 445.70 | 18.60 | 87.35 | 87.35 |
| 9 | 12.00 | 17.0 | 13.50 | 19.5 | 19.5 | 1094.81 | 0.00 | 0.00 | 352.96 | 375.62 | 35.84 | 93.75 | 93.75 |
| 10 | 12.06 | 17.1 | 13.50 | 19.5 | 19.5 | 1255.80 | 0.00 | 0.00 | 503.49 | 444.46 | 46.87 | 118.41 | 118.41 |
| 11 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1688.71 | 0.00 | 0.00 | 504.91 | 622.62 | 52.03 | 103.93 | 103.93 |
| 12 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 681.71 | 0.00 | 0.00 | 440.10 | 287.22 | 78.44 | 90.06 | 90.06 |
| 13 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 2132.04 | 0.00 | 0.00 | 395.76 | 1070.71 | 92.58 | 93.24 | 93.24 |
| 14 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 805.12 | 0.00 | 0.00 | 323.25 | 296.86 | 96.55 | -3.12 | -3.12 |
| 15 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 788.20 | 0.00 | 0.00 | 216.34 | 382.53 | 170.02 | 54.66 | 54.66 |
| 16 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 928.98 | 0.00 | 0.00 | 125.58 | 405.18 | 233.78 | 92.63 | 92.63 |
| 17 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1044.94 | 0.00 | 0.00 | 126.31 | 267.95 | 134.55 | 46.99 | 46.99 |
| 18 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1267.47 | 0.00 | 0.00 | 107.89 | 328.85 | 134.73 | 111.47 | 111.47 |
| 19 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 1100.43 | 0.00 | 0.00 | 96.74 | 153.73 | 63.16 | 85.49 | 85.49 |
| 20 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 607.57 | 0.00 | 0.00 | 36.36 | 66.02 | 71.92 | 75.38 | 75.38 |
| 21 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 133.37 | 0.00 | 0.00 | 2.20 | 0.80 | 52.13 | 42.43 | 42.43 |
| 22 | 12.00 | 17.0 | 12.00 | 17.0 | 17.0 | 7.34 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 62.38 | 14.49 | 14.49 |
| RHS | 0.00 | 0.0 | | | | | | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

X-S Weight: 17461.53

Anexo E

Memorias de cálculo de la corrida #4 del análisis de estabilidad de "Laderas de Bastión Popular"

| | |
|--|---|
| DATA: Analysis 3 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bastion Popular | |
| ----- | |
| Material Properties (4 materials) | |
| ----- | |
| Material: 1 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo relleno algo consolidado | |
| Cohesion Phi UnitWeight Ru | |
| 12.00 17.0 14.60 Auto | |
| Material: 2 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Suelo Residual y roca muy meteorizada | |
| Cohesion Phi UnitWeight Ru | |
| 15.00 22.0 15.20 Auto | |
| Material: 3 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Roca limolitas fraturadas, meteorizadas | |
| Cohesion Phi UnitWeight Ru | |
| 45.00 28.0 18.50 Auto | |
| Material: 4 (Mohr-Coulomb Isotropic) - Rocas limolitas poco meteorizadas | |
| Cohesion Phi UnitWeight Ru | |
| 150.00 31.0 19.00 Auto | |
| ----- | |
| Water Properties | |
| ----- | |
| Unit weight of water: 9.810 | Unit weight of water/medium above ground: 0.000 |
| ----- | |
| Material Profiles (4 profiles) | |
| ----- | |
| Profile: 1 (2 points) Material beneath: 1 - Suelo relleno algo consolidado | |
| -0.10 85.00 206.30 | 85.00 |
| Profile: 2 (24 points) Material beneath: 2 - Suelo Residual y roca muy meteorizada | |
| -0.10 80.20 17.10 80.00 28.20 78.10 37.00 | 75.10 41.60 73.00 |
| 46.20 69.10 46.60 65.70 51.40 59.60 58.70 | 55.20 48.80 |
| 80.30 43.50 89.10 39.50 100.00 36.40 111.30 | 33.50 31.80 |
| 131.40 28.90 144.20 25.70 150.20 24.30 163.80 | 22.80 21.50 |
| 183.50 19.00 192.50 16.30 200.70 15.10 206.30 | 16.30 |
| Profile: 3 (18 points) Material beneath: 3 - Roca limolitas fraturadas, meteorizadas | |
| -0.10 75.30 10.60 74.10 25.90 72.00 37.40 | 44.30 62.60 |
| 51.60 57.10 60.60 51.70 70.30 46.00 78.20 | 87.40 38.30 |
| 98.70 34.30 110.00 30.50 125.50 27.20 138.30 | 42.50 20.90 |
| 167.20 18.40 182.90 16.10 206.30 16.30 | 153.20 24.70 |
| Profile: 4 (12 points) Material beneath: 4 - Rocas limolitas poco meteorizadas | |
| -0.10 59.00 28.50 52.50 156.50 44.40 79.50 | 38.50 103.50 30.10 |
| 117.40 24.70 133.20 19.90 156.70 14.80 176.20 | 11.50 159.60 9.60 |
| 200.30 8.60 206.30 16.30 | |

RESULTS: Analysis 3 - Analisis de estabilidad en las laderas de Bacion Popular

Sarma Non-Vertical Slice Method of Analysis - Non-Circular Failure Surface

Critical Failure Surface Search using Multiple Surface Generation Techniques

Factor of Safety for initial failure surface approximation: 0.93

There were: 552 successful analyses from a total of 721 trial surfaces

167 analyses terminated due to unacceptable geometry

2 analyses that failed to produce a result

Critical (minimum) Factor of Safety: 0.92

Critical Acceleration (Kc): -0.034

Negative normal stresses exist on the base and/or side of one or more slices - examine slice data and consult the GALENA Help utility

Surface and Results Summary (Lowest 99 Factor of Safety surfaces)

| Surface | X-Left | Y-Left | X-Right | Y-Right | Y-Deflection | FoS | Kc |
|---------|--------|--------|---------|---------|--------------|-------|--------|
| 1 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 0.918 | -0.034 |
| 2 | 46.20 | 69.10 | 176.94 | 24.34 | 0.00 | 0.925 | -0.032 |
| 3 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 0.931 | -0.029 |
| 4 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 0.934 | -0.028 |
| 5 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 0.936 | -0.028 |
| 6 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 0.937 | -0.027 |
| 7 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 0.938 | -0.027 |
| 8 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.941 | -0.026 |
| 9 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 0.941 | -0.025 |
| 10 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 0.943 | -0.024 |
| 11 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 0.946 | -0.023 |
| 12 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 0.946 | -0.023 |
| 13 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 0.948 | -0.023 |
| 14 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 0.949 | -0.023 |
| 15 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 0.950 | -0.021 |
| 16 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.950 | -0.021 |
| 17 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 0.951 | -0.021 |
| 18 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.952 | -0.021 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 19 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 1.29 | 0.955 | -0.019 |
| 20 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 0.959 | -0.018 |
| 21 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 0.960 | -0.018 |
| 22 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 0.961 | -0.017 |
| 23 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 0.962 | -0.017 |
| 24 | 42.24 | 72.46 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 0.963 | -0.017 |
| 25 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 0.965 | -0.015 |
| 26 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 0.965 | -0.015 |
| 27 | 26.40 | 78.41 | 182.52 | 22.22 | 2.16 | 0.965 | -0.015 |
| 28 | 58.08 | 64.35 | 186.24 | 20.82 | 2.16 | 0.967 | -0.014 |
| 29 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 1.29 | 0.967 | -0.014 |
| 30 | 26.40 | 78.41 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 0.970 | -0.013 |
| 31 | 42.24 | 72.46 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 0.971 | -0.013 |
| 32 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | 2.16 | 0.971 | -0.013 |
| 33 | 58.08 | 64.35 | 182.52 | 22.22 | 1.29 | 0.971 | -0.013 |
| 34 | 50.16 | 67.28 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 0.972 | -0.012 |
| 35 | 42.24 | 72.46 | 182.52 | 22.22 | -0.43 | 0.972 | -0.012 |
| 36 | 26.40 | 78.41 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 0.973 | -0.012 |
| 37 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 0.974 | -0.011 |
| 38 | 34.32 | 76.01 | 167.64 | 29.19 | -1.29 | 0.974 | -0.012 |
| 39 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 0.974 | -0.012 |
| 40 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 0.975 | -0.012 |
| 41 | 34.32 | 76.01 | 182.52 | 22.22 | 0.43 | 0.975 | -0.011 |
| 42 | 50.16 | 67.28 | 171.36 | 27.64 | -1.29 | 0.976 | -0.011 |
| 43 | 50.16 | 67.28 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 0.976 | -0.011 |
| 44 | 42.24 | 72.46 | 167.64 | 29.19 | -2.16 | 0.977 | -0.010 |
| 45 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 0.977 | -0.010 |
| 46 | 42.24 | 72.46 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 0.978 | -0.010 |
| 47 | 34.32 | 76.01 | 171.36 | 27.64 | -2.16 | 0.979 | -0.009 |
| 48 | 34.32 | 76.01 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 0.979 | -0.010 |
| 49 | 26.40 | 78.41 | 186.24 | 20.82 | 4.75 | 0.980 | -0.009 |
| 50 | 50.16 | 67.28 | 186.24 | 20.82 | 3.02 | 0.981 | -0.009 |
| 51 | 26.40 | 78.41 | 175.08 | 25.51 | -0.43 | 0.981 | -0.008 |
| 52 | 50.16 | 67.28 | 175.08 | 25.51 | 0.43 | 0.982 | -0.008 |
| 53 | 58.08 | 64.35 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 0.982 | -0.008 |
| 54 | 58.08 | 64.35 | 171.36 | 27.64 | -3.02 | 0.982 | -0.008 |
| 55 | 34.32 | 76.01 | 175.08 | 25.51 | -1.29 | 0.983 | -0.008 |
| 56 | 50.16 | 67.28 | 178.80 | 23.62 | -1.29 | 0.984 | -0.007 |
| 57 | 26.40 | 78.41 | 178.80 | 23.62 | 0.43 | 0.985 | -0.007 |
| 58 | 34.32 | 76.01 | 178.80 | 23.62 | -0.43 | 0.985 | -0.007 |
| 59 | 58.08 | 64.35 | 167.64 | 29.19 | -3.02 | 0.985 | -0.007 |

