# TABLA DE CONTENIDO

Pág.

**1. GENERALIDADES..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**1.1 INTRODUCCIÓN..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**1.2 OBJETIVO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**1.4 DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**1.5 ANTECEDENTES ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**2.1 MÉTODO DE TRABAJO ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**2.2 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE AMARRE ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**2.3 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL ÁREA..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE CIERRE ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
2.3.2 AMOJONAMIENTO DE REFERENCIA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**2.4 CORRESPONDENCIA CON CARTOGRAFÍA EXISTENTE ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**3. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**3.1 ASPECTOS DE GEOLOGÍA REGIONAL ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**3.2 ESTRATIGRAFÍA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.2.1 FORMACIÓN GUADUAS (KTGM) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.2.2 DEPÓSITOS RECIENTES..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**3.4 GEOLOGÍA LOCAL ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.4.1 LITOLOGÍA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.4.2 ESTRUCTURAL..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**3.5 GEOMORFOLOGÍA ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.5.1 MORFOESTRUCTURAL..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.5.2 MORFODINÁMICA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**3.6 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE PROCESOS DENUDACIONALES. . ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.1 AÑO 1951 (C-604, FOTO 610) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.2 AÑO 1956 (C-773, FOTO 052) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.3 AÑO 1963 (R-590, FOTO 022) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.4 AÑO 1977 (C-1732, FOTO 023) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.5 AÑO 1990 (R-1153, FOTO 255) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
3.6.6 AÑO 1998 (SAV-415, FAJA 4, FOTO 086) ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**4. CLIMA, HIDROLÓGICA, HIDRÁULICA, HIDROGEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**4.1 CLIMA** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
4.1.2 PRECIPITACIÓN MEDIA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**4.2 HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**4.3 HIDROGEOLOGÍA** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**4.4 SISMOLOGÍA** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**5. COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO**.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**5.1 ÁREAS URBANAS CONSOLIDADAS (ZUP)** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**5.2 ÁREAS URBANAS SIN PAVIMENTAR (ZUSP)** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**5.3 PASTOS O VEGETACIÓN HERBÁCEA (PN)** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**5.4 ERIALES (E)** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO, PRUEBAS DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**6.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
6.1.1 SONDEOS MECÁNICOS, APIQUES Y TRINCHERAS **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
6.1.2 LÍNEAS GEOSÍSMICAS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
6.1.3 SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
6.1.4 PRUEBAS DE CAMPO ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
6.1.5 ENSAYOS DE LABORATORIO ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**7. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA**..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**7.1 MATERIALES** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
7.1.1 COLUVIÓN ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
7.1.2 RELLENOS ANTRÓPICOS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
7.1.3 DEPÓSITOS ALUVIALES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
7.1.4 ARCILLOLITAS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
7.1.5 ARENISCAS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**7.2 DISCONTINUIDADES** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**7.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**7.4 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN PLUVIAL** ... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
7.4.1 BASE TEÓRICA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
7.4.2 APLICACIÓN Y RESULTADOS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**8. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FRM..** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**8.1 INTRODUCCIÓN** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**8.2 INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**8.3 VARIABLES ALEATORIAS: LÍMITES** ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**8.4 ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA TALUDES EN ROCA**..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8.4.1 FAMILIA DE DISCONTINUIDADES ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
8.4.2 TALUDES DE ESTUDIO ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

8.4.3 POSIBILIDAD CINEMÁTICA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
8.4.4 TIPIFICACIÓN DE TALUDES Y DE MECANISMOS DE FALLA ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**8.5 ANÁLISIS DE FACTORES DE SEGURIDAD....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8.5.1 TALUDES EN ROCA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**8.6 PROBABILIDAD DE FALLA TOTAL .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**8.7 DISTANCIA DE VIAJE .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8.7.1 TALUDES EN ROCA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
8.7.2 TALUDES EN SUELO ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**8.8 SUSCEPTIBILIDAD DE AMENAZA .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**8.9 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**9. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**9.1 INTRODUCCIÓN.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
9.1.1 TIPOS DE VULNERABILIDAD..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
9.1.2 LÍNEA BASE PARA EL ANÁLISIS ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
**9.2 VULNERABILIDAD SOCIAL .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**9.3 VULNERABILIDAD FÍSICA .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
9.3.1 ÍNDICE DE EXPOSICIÓN..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
9.3.2 ÍNDICE DE RESISTENCIA (IR)..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
9.3.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

**10. ANÁLISIS DE RIESGO .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**10.1 INTRODUCCIÓN.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**10.2 ANÁLISIS.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**11. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**11.1 ALTERNATIVAS PLANTEADAS.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**11.2 MODELO DE DECISIÓN.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**11.3 PROBABILIDAD DE FALLA.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**11.4 RESULTADOS.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**11.5 ANÁLISIS DE AMENAZA CON OBRAS.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**12. OBRAS DE MITIGACIÓN .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**12.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**12.2 PRECIOS UNITARIOS.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**12.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
**12.4 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO..** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**13. CONCLUSIONES.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**14. LIMITACIONES.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

**15. BIBLIOGRAFÍA.....** ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

# LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1 Puntos para el amarre a coordenadas IGAC **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2-2 Puntos generados para el ajuste de la poligonal**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2-3 Mojones materializados..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4-1 Valores totales mensuales de precipitación, Estacion Casablanca (20197). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4-2 Valores medios mensuales multianuales de variables climatológicas . **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4-3 Valores de intensidad para diferentes periodos de retorno**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4-4 Caudales obtenidos empleando el método racional**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4-5 Caudales obtenidos empleando el método del SCS**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-1 Velocidades y espesores de las capas obtenidos en la exploración geofísica ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-2 Resultados obtenidos en el ensayo de penetración estándar, SPT..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-3 Porcentajes de recobro y RQD..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-4 Normalización del ensayo de penetración estándar, SPT**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-5 Cantidades de ensayos de laboratorio realizados**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6-6 Tabla resumen de resultados de ensayos laboratorio**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-1 Parámetros de resistencia al corte obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-2 Parámetros de resistencia al corte obtenidos en ensayos de corte directo realizados en el estudio del Barrio Juan José Rondón (CONSORCIO IGR, 2005). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-3 Resultados de ensayos de permeabilidad..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-4 Resultados del ensayo de granulometría por hidrometría**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-5 Valores adoptados para hallar el Factor K .... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-6 Variación de longitud y pendiente del talud... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 7-7 Valores obtenidos de pérdida de suelo ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-1 Valores extremos de las variables aleatorias. **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-2Taludes de estudio y discontinuidades..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-3 Resumen de taludes y tipos de falla existentes**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-4 Factores de seguridad para falla en cuña ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-5 Factor de seguridad por falla planar..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-6 Factores de seguridad para Mecanismo de Falla rotacional**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-7. Probabilidades de agentes exógenos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-8 Datos de variables. Finlay et all (1999). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-9 Determinación de la distancia de viaje..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-10 Matriz de susceptibilidad de amenaza ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 8-11 Evaluación de susceptibilidad ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 9-1 Índice de exposición en función de la zona de influencia**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 9-2 Criterios para la calificación de los indicadores de competencia estructural ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 9-3 Evaluación del nivel de daño..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 10-1 Matriz de valoración del riesgo (perdida esperadas %)**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 11-1 Estimativo de costos de alternativas ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 11-2 Probabilidades de falla total ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 12-1 Presupuesto ..... **¡Error! Marcador no definido.**

# LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-1 Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa (Ingeocim Ltda., 1998). ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 2-1 Localización de poligonales para el levantamiento topográfico ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-1 Marco geológico regional (Tomado de UPES, 1999)**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-2 Estereógrafa de diaclasas, Bloque yacente. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-3 Polos para las diaclasas medidas, Bloque yacente**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-4 Discontinuidades promedias a partir de la totalidad de las diaclasas, Bloque yacente ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-5 Estereógrafa de diaclasas Bloque colgante. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-6 Polos para las diaclasas medidas, Bloque colgante**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 3-7 Discontinuidades promedias a partir de la totalidad de las diaclasas, Bloque colgante ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 4-1 Localización de las estaciones y patrón de distribución de la precipitación media (INGEOMINAS, 2002)..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 4-2 Distribución intra anual de la precipitación... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 4-3 Cuenca de la quebrada Zanjón de la candelaria (Tomado de UPES, 1999) ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 4-4 Pozos de inspección de alcantarillado ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 5-1 Cobertura vegetal y usos del suelo ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-1 Localización de los sitios de exploración del subsuelo**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-2 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Perforación S-1. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-3 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Perforación S-2 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-4 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-1. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-5 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-2. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-6 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-3.. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-7 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-4. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-8 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-5.. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-9 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-6. **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-10 Aspecto de la Trinchera TR-1. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-11 Aspecto de la Trinchera TR-2. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-12 Aspecto de la Trinchera TR-3. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-13 Aspecto de la Trinchera TR-4. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 6-14 Aspecto de la Trinchera TR-5. ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 7-1 Variación de los parámetros de resistencia al corte**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 7-2 Zonificación Geotécnica..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-1 Sectorización para análisis de amenaza..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-2 Evaluación de parámetros geomecánicos de materiales**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-3 Sección 2-2 geotécnica –Generación de caída de bloques**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-4 Análisis de probabilidad – Sección 2 Geológica**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-5 Análisis de probabilidad. Talud 2.2 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-6 Análisis de probabilidad Talud 3.3 ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8-7 Dimensiones para el cálculo de la distancia de viaje de deslizamientos ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-1 Tipología de vivienda ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-2 Ingreso económico..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-3 Zonas de exposición para movimientos rotacionales**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-4 Índice de exposición..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-5 Índice de resistencia – IR..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-6 Índice de vulnerabilidad física ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 9-7 Vulnerabilidad en viviendas..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 10-1 Pérdida esperada (%) – viviendas ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11-1 Alternativas de mitigación ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11-2- Esquema de perdida de soporte de la malla triple torsión ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11-3 Árbol de decisión. Alternativas de mitigación **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 11-4 Zonificación de Amenza por FRM con obras **¡Error! Marcador no definido.**

# LISTA DE PLANOS

Plano 2-1 Levantamiento Topográfico

Plano 3-1 Geología

Plano 3-2 Geomorfología

Plano 7-1 Secciones geotécnicas

Plano 8-1 Amenaza por FRM

Plano 9-1 Tipología de viviendas

Plano 9-2 Vulnerabilidad por FRM

Plano 10-1 Riesgo por FRM

Plano 12-1 Obras recomendadas

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A TOPOGRAFÍA

ANEXO B GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

ANEXO C GEOTECNIA Y GEOFÍSICA

ANEXO D HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

ANEXO E AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

ANEXO F VULNERABILIDAD Y RIESGO POR FRM

ANEXO G ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS Y ESPECIFICACIONES

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 1 - General.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 2 - Levant Topog.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 3 - Geología y Geomorf.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 4 - Clima, Hidr y sismol.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 5 - Usos suelo.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 6 - Exploración Subsuelo.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 7 - Zonif Geotécnica .doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 8 Amenaza.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 9 - Vulnerabilidad.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 10 - Riesgo .doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 11 - AltObra.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 12 - Obras.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 13 - Conclusiones.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 14 - Lmitaciones.doc

C:\IGR\Proyectos\IGR 99-04_Bolívar FOPAE\04-Informes\Informe Final\050413 Informe Final Versión 2\Texto\IGR-99-05_Informe Final Cap 15 -Bibliografía.doc

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias a través de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito – DPAE contrató por medio del Contrato de Consultoría No. 469 de 2004 a EDGAR EDUARDO RODRÍGUEZ GRANADOS - INGENIERÍA Y GEORIESGOS, la elaboración del estudio de riesgos por remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del Barrio Villas de Bolívar de la Localidad Ciudad Bolívar en Bogotá D. C., contrato iniciado a partir del 13 de enero de 2005 con duración de tres meses.

El presente informe se constituye en el Informe Final que incluyen las actividades desarrolladas en el desarrollo del estudio, tales como: topografía; geología regional y local, geomorfología, inventario de procesos; aspectos climáticos, hidrológicos, hidrogeológicos y sismológicos; cobertura vegetal y usos del suelo; exploración del subsuelo y resultados de ensayos de campo y laboratorio; caracterización geotécnica, zonificación geotécnica, zonificación de amenaza para escenario actual, vulnerabilidad y riesgo; planteamiento y análisis de alternativas de mitigación; selección alternativa de diseño, evaluación de amenaza y riesgo para escenario con obras; diseño detallado de la alternativa seleccionada; elaboración de planos de construcción, cantidades de obra, presupuesto y especificaciones técnicas.

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo general del estudio es el diseño detallado de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del Barrio Villas de Bolívar de la Localidad Ciudad Bolívar reduciendo el nivel de riesgo a partir de la construcción de la información cartográfica de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de la zona, cuyos insumos son la geología, la geomorfología y la geotecnia.

## 1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

- Recopilación de información primaria y secundaria.
- Levantamiento topográfico detallado de la zona de estudio a escala 1:500, tanto del macizo rocoso como de los equipamientos urbanos.
- Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.
- Inventario y cartografía de variables como: geología, geomorfología, inventario de viviendas.
- Inventario de los procesos morfodinámicos, con el fin de conocer los mecanismos de falla, los factores condicionantes y desencadenantes de ellos.

- Análisis de amenaza – vulnerabilidad y riesgo de la zona. Evaluación de la probabilidad de falla por distancia y mecanismos de inestabilidad. Análisis de tipología de viviendas, condiciones de exposición y resistencia. Análisis de riesgo.
- Determinación y evaluación de alternativas de reducción del riesgo en la zona.
- Diseño detallado de obras y acciones tendientes a minimizar el riesgo potencial y maximizar el entorno ambiental.
- Presupuesto detallado y especificaciones.

## 1.4 DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El barrio Villas de Bolívar se ubica al noroccidente de la localidad Ciudad Bolívar, limitando al nororiente con la urbanización Candelaria La Nueva, al norte con la urbanización Arborizadora Alta, al sur con el barrio Juan José Rondón y al occidente con la Avenida Bacatá. El área de estudio del escarpe del barrio Villas de Bolívar tiene una longitud aproximada de 300 y un ancho medio de 215 m, para un área total aproximada de 6.52 ha que involucra el escarpe del costado norte junto con el canal natural de drenaje y el escarpe oriental.

El área de estudio se ubica aproximadamente entre las coordenadas (91600E, 96600N); (91500E, 96800N); (91800E, 96900N) y (91800E, 96700N).

## 1.5 ANTECEDENTES

De acuerdo con el estudio de "Zonificación por inestabilidad del terreno en diferentes localidades de Santa Fe de Bogotá" elaborado por INGEOCIM LTDA en 1998 para el Fondo de Atención y Prevención de Emergencias de Bogotá (FOPAE), se definió para el sector una categoría de amenaza por fenómenos de remoción en masa entre media y alta. (Ver Figura 1-1).

El Fondo FOPAE por medio del Conceptos Técnicos CT-3245 del 02 de diciembre de 1998 (con Adendo No. 1 del 14 de diciembre de 2000); identificó zonas de inestabilidad potencial en la ladera del costado sur oriental del Barrio Villas de Bolívar, debido a procesos de extracción de material, para actividad minera. En dichos procesos se conformaron escarpes sucesivos a modo de terrazas y posteriormente no se realizaron trabajos de restauración geomorfológica, por lo que, en el Concepto de la DPAE se recomienda adelantar estudios geotécnicos y de riesgo para la ésta zona.

En la ladera se observa un escarpe de altura máxima de 20m y con inclinación subvertical y en la parte baja del talud se observa material estéril de la explotación y bloques caídos. En la parte superior del escarpe se encuentran las viviendas que conforman el Barrio Villas de Bolívar, constituyéndose en los elementos expuestos ante un fenómeno de remoción en masa.

El barrio se encuentra en materiales pertenecientes a la Formación Guaduas (secuencias de areniscas y arcillolitas) con una geomorfología montañosa de pendientes entre 25 y 40º. En el Concepto Técnico No. DI-864 del DPAE se reportó la caída de bloques de roca desde la parte alta del escarpe a una terraza intermedia.

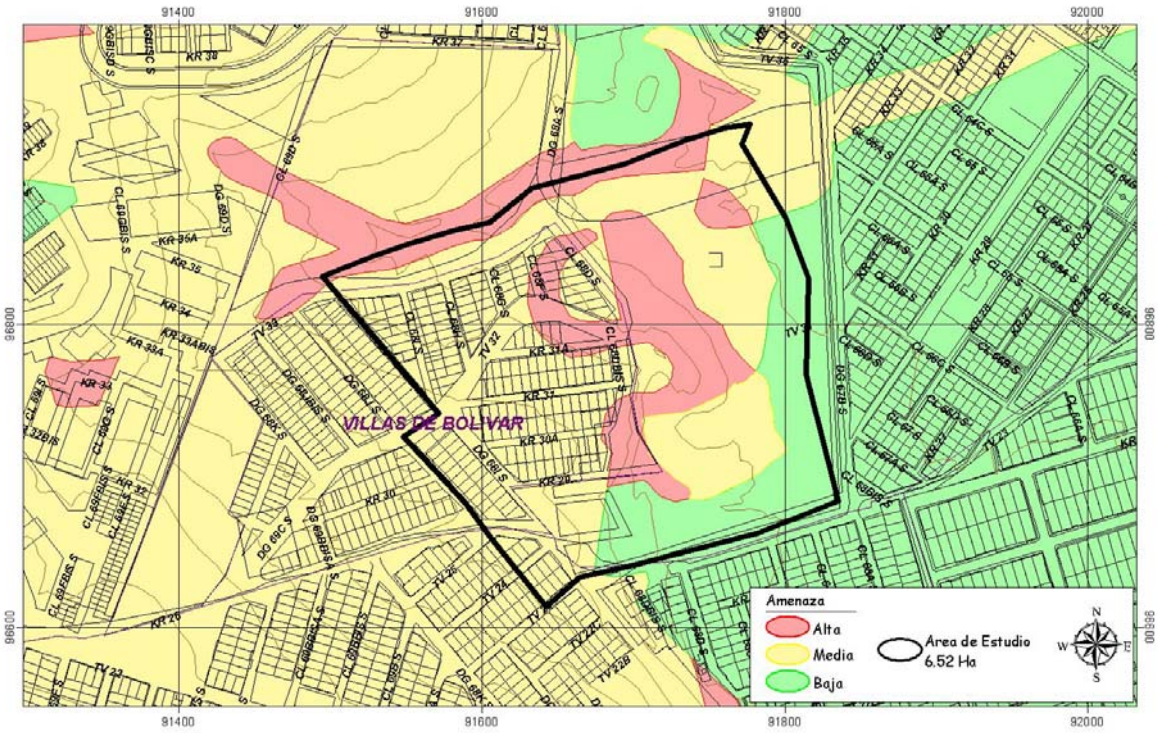



**Figura 1-1 Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa (Ingeocim Ltda., 1998).**

# 2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Como elemento fundamental en la formulación de la cartografía geológica, geomorfológica, geotécnica, y para efectos del análisis de amenaza y el planteamiento de las medidas de reducción del riesgo, se realizó un levantamiento topográfico detallado, escala 1:500, con el que se pretendió registrar de la manera más precisa posible, la morfometría de las laderas y escarpes, las franjas críticas de estabilidad, los procesos morfodinámicos, las unidades residenciales, la infraestructura de servicios públicos y todo tipo de estructura física presente en el sector de estudio (postes, pozos, escaleras, vías, entre otras). Dichas labores se adelantaron evolutivamente tal y como se describen en los siguientes numerales.

## 2.1 MÉTODO DE TRABAJO

La actividad inicial consistió en la ejecución de la poligonal de amarre (primaria), requisito indispensable para la validez del levantamiento; posteriormente, se localizaron, en puntos estratégicos, las estaciones para conformar poligonales internas (secundarias y auxiliares), base para la radiación de puntos (Ver Figura 2-1).

Una vez materializada la poligonal de trabajo, se realizó el levantamiento topográfico detallado total, a escala 1:500 mediante el uso de estación total haciendo toma de los puntos topográficos relevantes y de aquellos que contribuyeran a una mejor modelación del relieve. Durante el levantamiento se realizaron esquemas explicativos para posterior seguimiento e interpretación del plano.

En oficina y con base en la información adquirida, se hizo procesamiento de puntos y generación de curvas de nivel cada medio metro (0.50m), además se hizo el dibujo que representa la geometría en planta de los diferentes elementos, toda la información se revisó en campo y se reinterpretó con base en fotografías. El producto final se muestra en el Plano 2-1 y todos los insumos en el ANEXO A.

## 2.2 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE AMARRE

El levantamiento fue amarrado al sistema de posicionamiento del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, para Bogotá con referencia en el observatorio astronómico Nacional, al que se le asignaron coordenadas planas N 100.000 y E 100.000. Los puntos de amarre fueron las placas CD610 y CD609A cuyas coordenadas se listan en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1 Puntos para el amarre a coordenadas IGAC**

| Punto No. | Norte | Este | Elevación | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| 3000 | 92999.9520 | 97808.0950 | 2557.8601 | CD610 |
| 3001 | 93234.3290 | 96837.5270 | 2566.7080 | CD609A |

El levantamiento se realizó con una Estación Total de precisión angular al segundo y con alcances de lectura con prisma sencillo de 1800 m de distancia en longitud, con capacidad para almacenar hasta 2000 puntos topográficos.

## 2.3 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DEL ÁREA

En el trabajo de campo que se llevó a cabo con la ayuda de una estación total con aproximación en ángulo al segundo y en distancia al milímetro, hizo énfasis en las franjas que revisten importancia para la evaluación tales como: zonas críticas de estabilidad, zonas de erosión, escarpes, accidentes topográficos, líneas vitales, infraestructura de servicios y viviendas.

El barrido altimétrico y planimétrico se ejecutó bajo la aplicación de un procedimiento mixto, es decir tanto con la definición de los contornos de corona y pata de los taludes y detalles más relevantes, como con la captura de una nube de puntos para los detalles urbanísticos. En los taludes laterales de la ladera se tomaron secciones transversales, con el doble propósito de facilitar la interpretación cartográfica y servir de apoyo en la etapa de análisis, específicamente durante la elaboración del Modelo Estratigráfico.

El barrido con nube de puntos se destinó a la definición de elementos urbanísticos como: manzanas, pozos de inspección, vías y caminos peatonales. Paralelo con el levantamiento topográfico se corroboró además el levantamiento catastral de que dispone el distrito. Complementariamente, se tomaron puntos adicionales en los vértices de las manzanas para su correcta definición y el ajuste de los predios de cada una de ellas.

La interpretación cartográfica se ejecutó con el empleo de un software especializado: bajo la aplicación de un modelo de interpretación dirigida. Esto significa que se definieron y respetaron las barreras físicas actuales para condicionar la interpretación a éstas, sin permitir el desempeño del software a su libre esquema de triangulación. En este sentido jugaron un papel importante las observaciones de campo y el contorno de la zona en estudio.

### 2.3.1 Descripción de la poligonal de cierre

Una vez georeferenciada el área a través de la poligonal de amarre, se procedió al cierre y ajuste de la poligonal la cual incluye 16 estaciones de referencia, desde las cuales se establecen visuales a los sitios radiados para la obtención de la nube de puntos, sus coordenadas se muestran en la Tabla 2-2 y en la Figura 2-1.

**Tabla 2-2 Puntos generados para el ajuste de la poligonal**

| Punto No. | Norte | Este | Elevación | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 91729.2657 | 96781.3179 | 2591.0527 | D1 |
| 70 | 91739.0701 | 96759.1398 | 2590.9426 | D2 |
| 909 | 91689.8930 | 96758.6350 | 2603.8989 | D3 |

| Punto No. | Norte | Este | Elevación | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| 969 | 91686.0740 | 96728.4500 | 2605.5271 | D4 |
| 1041 | 91649.5730 | 96725.8750 | 2611.3350 | D5 |
| 1163 | 91595.2200 | 96717.6060 | 2614.1699 | D6 |
| 1390 | 91654.9230 | 96663.2870 | 2613.1030 | D7 |
| 1541 | 91597.7990 | 96671.5900 | 2617.4409 | D8 |
| 1835 | 91569.0540 | 96743.6360 | 2612.0349 | D9 |
| 1938 | 91606.2810 | 96778.7110 | 2603.1790 | D10 |

### 2.3.2 Amojonamiento de referencia

En cuatro puntos se implementaron mojones en concreto con placa: IGR5 a IGR8, cuyos datos de coordenadas y elevación se relacionan en la Tabla 2-3 y se muestran en el Figura 2-1.

**Tabla 2-3 Mojones materializados**

| Punto No. | Norte | Este | Elevación | Referencia |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 91697.6281 | 96811.6651 | 2587.3467 | IGR5 |
| 2077 | 91614.9150 | 96804.5530 | 2599.2280 | IGR6 |
| 1046 | 91582.2950 | 96743.6810 | 2610.6851 | IGR7 |
| 1621 | 91545.4480 | 96728.3320 | 2617.1909 | IGR8 |

## 2.4 CORRESPONDENCIA CON CARTOGRAFÍA EXISTENTE

Al contrastar el levantamiento topográfico con el Plano de Legalización CB5/4-04 del Departamento Administrativo de Planeación Distrital, DAPD, se encontró correspondencia en la localización de predios y manzanas, por lo que para el levantamiento topográfico se adoptó la nomenclatura de predial de dicho plano.

Es de notar que el plano de DAPD (de fecha enero 13 de 1999) fue realizado con base en la información magnética presentada por la comunidad. Además, el plano presenta una nota para el predio 4 de la manzana E, en la cual se señala el nivel de amenaza alta por caída de rocas, de acuerdo con el Concepto UPES 3245 de diciembre 2 de 1998.

**Figura 2-1 Localización de poligonales para el levantamiento topográfico**

**Plano 2-1 Levantamiento Topográfico**

## ANEXO A TOPOGRAFÍA

# 3. ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

## 3.1 ASPECTOS DE GEOLOGÍA REGIONAL

La zona trabajada hace parte de las colinas cercanas al Piedemonte sur de la Sabana de Bogotá (flanco occidental del Sinclinal de Usme) y presenta una morfología de ladera con pendientes que varían entre 25 y 40º. La zona de estudio se encuentra sobre una secuencia sedimentaria (la parte media de la Formación Guaduas - KTgm) en la cual se intercalan arcillolitas grises poco fisibles (alteradas a suelos residuales arcillosos) con areniscas cuarzosas dispuestas en capas gruesas (1 a 3 metros de espesor). Otro grupo litológico esta compuesto por areniscas cuarzosas en bancos, intercaladas con secuencias en las que predominan arcillolitas rosadas; los grupos litológicos están separados por una falla de cabalgamiento, con componente de rumbo. La ladera se encuentra cubierta parcialmente por pequeños depósitos de origen coluvial y materiales antrópicos de menos de 1 metro de espesor.

## 3.2 ESTRATIGRAFÍA

En este numeral se tiene como referencia información del Léxico Estratigráfico Internacional (Da Porta, 1974).

### 3.2.1 Formación Guaduas (KTgm)

Nombre: Propuesto por Hettner (1892) y redefinido por Hubach (1957). El nombre de esta unidad procede de la población de Guaduas (Cundinamarca).

Edad: Finales del Cretácico (Maastrichtiano Superior) a inicios del Terciario (Paleoceno Inferior).

Área tipo y límites: En el sentido de Hubach (1957) la Formación Guaduas queda comprendida entre la Arenisca Tierna del Guadalupe superior, en la base, y la Arenisca del Cacho en la parte superior. Van der Hammen (1957) da como localidad típica para la Formación Guaduas la sucesión que se encuentra entre el Boquerón de Lenguazaque y el Boquerón de Guachetá en el Departamento de Cundinamarca.

Las características físicas de la roca en el área tipo:

- Conjunto Inferior (KTgi). – Consta esencialmente de arcillolitas grises oscuras con algunos fósiles en la base.
- Conjunto Medio (KTgm). – Está determinado por dos niveles de areniscas. En la base la Arenisca Guía y en la parte superior la Arenisca Lajosa. Entre ambas areniscas se encuentra una masa de arcillolitas grises oscuras, compactas, a veces carbonáceas y que contienen mantos de carbón explotables. Constituye en general la parte productiva de la Formación Guaduas.
- Conjunto Superior (KTgs). – Consta de "gredas rojizas, azulosas, verdosas y moradas entre las que localmente hay mantos inexplotables de carbón y bancos de areniscas de grano grueso".

Características físicas de la roca en el área de estudio (Conjunto medio de la Fm. Guaduas):

La zona de estudio comprende dos dominios litológicos separados por una falla de cabalgamiento importante, a la cual se denominará en este informe la Falla de Bolívar.

La mayor parte de la zona de estudio se encuentra sobre el bloque colgante, en el cual se intercalan areniscas cuarzosas dispuestas en bancos con secuencias rítmicas de arcillolitas y areniscas lodosas de colores rosados. A partir de la revisión del Léxico Estratigráfico Internacional (Da Porta, op. cit.), los bancos de arenisca deben corresponder a la arenisca denominada Lajosa, pues en el talus del escarpe sur se observan abundantes superficies de oxidación y nódulos oxidados (en la referencia del Lexico se lee: "(en) *La Arenisca La Lajosa. Es muy característica la presencia de nódulos limoníticos" Por otra parte, los colores rosados marcan la posibilidad de ambientes de depositación más continentales, típicas del Grupo Guaduas en la parte alta… Entre la arenisca se intercala una sucesión de lutitas grises, pero empiezan a manifestarse ya algunas facies rojas*"

El dominio litológico del bloque yacente incluye, para la parte superior de la ladera arcillolitas poco fisibles, de colores grises y blancuzcos, que alteran a suelo residual arcillo-limoso de plasticidad media aparente y baja humedad. En la parte inferior predominan areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, bien cementadas, de colores grises cuando frescas y amarillentas alteradas. Las areniscas se encuentran fracturadas y brechadas por la acción de fallas con componente de rumbo predominante.

Características geotécnicas y procesos morfodinámicos:

Los macizos rocosos correspondientes a la Formación Guaduas se caracterizan por su variabilidad. Se puede generalizar un comportamiento de macizo rocoso donde predominen areniscas de regular a buena cementación, con intensidad de fracturamiento variable, aunque se anota que incluso las areniscas, pueden presentar comportamiento similar a un talus en sectores de fracturamiento y fallamiento intenso (hacia el oriente del talud más empinado).

En la zona de cimentación del barrio ubicado en la parte alta se observó que existen arcillolitas que se meteorizan como un suelo residual arcilloso a limoso, duro, de color gris a pardo con baja humedad natural y baja plasticidad. En los horizontes superiores del suelos residual (máximo de 30 cm) se observa tinción con lixiviado procedente de los horizontes orgánico-minerales relacionados con la depositación de cenizas.

### 3.2.2 Depósitos recientes

#### 3.2.2.1 Coluviones (Qc)

Están constituidos por depósitos matriz-soportados en matriz predominantemente arenosa, de colores pardos y grises, que embebe bloques de areniscas de tamaño menor a 30 cm.

#### 3.2.2.2 Materiales de rellenos y botaderos antrópicos (Qra)

Están constituidos por materiales en los que predominan los residuos de actividad extractiva, botaderos de ladera, recebos de vías, etc., con espesores menores a 1 metro.

## 3.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de estudio se ubica en el flanco occidental del Sinclinal de Usme, pero dicho flanco presenta replegamientos menores y fuerte afectación tectónica. El Mapa Geológico de Ingeocim-DPAE, 1999 (Ver Figura 3-1) muestra una falla regional de rumbo, con componente dextral a 0,6 km de la zona de estudio.

La cartografía detallada de la zona de estudio, llevada a cabo en el marco de este trabajo permite proponer la existencia de una falla de rumbo de carácter regional, que se denominará Falla de Bolívar y que se detallará en el numeral 3.4.2.

En cuanto a plegamientos, al parecer existe un pequeño replegamiento de carácter sinclinal, aunque la cobertura coluvial y la complejidad tectónica dificultan su visualización y por lo tanto, tener la certeza de su existencia.

## 3.4 GEOLOGÍA LOCAL

### 3.4.1 Litología

La complejidad tectónica y el cubrimiento de la zona con coluviones antiguos dificulta la cartografía de unidades detalladas, así como su correlación entre si. Dada la existencia de la Falla de Bolívar, se agrupan las unidades en dos dominios litológicos separados por ella. Las unidades de roca que conforman el bloque yacente, que son fácilmente cartografiables se muestran en la columna estratigráfica incluida en el Plano 3-1 Geología.

#### 3.4.1.1 Unidades del Bloque Colgante

##### 3.4.1.1.1 Areniscas competentes dispuestas en bancos (TKgm-C-Arcob)

Areniscas cuarzosas de grano medio a muy grueso (en algunos niveles conglomeráticas) con horizontes y nódulos formados por concentración de óxidos de hierro. Se encuentran intensamente fracturadas (Ver Fotografía 3-1) y en ocasiones brechadas.

Su espesor es mayor de 3 metros y conforman la parte alta del escarpe, hacia el sur. Presentan problemas de caída de bloques.

##### 3.4.1.1.2 Arcillolitas rosadas (TKgm - C - Arci)

Arcillolitas rosadas poco fisibles intercaladas con areniscas lodosas de tamaño medio a grueso, lenticulares, en capas menores de 10 cm (predominan delgadas capas de 2 cm). Las areniscas tienen estructuras sedimentarias internas tipo flasser (Ver Fotografía 3-2).



**Fotografía 3-1 Aspecto de las areniscas del bloque colgante. Nótese su intenso fracturamiento, que facilita el desprendimiento de bloques.**



**Fotografía 3-2 Arcillolitas rosadas Bloque colgante (TKgm – C – Arci). Nótense las intercalaciones de areniscas en capas muy delgadas**

**Figura 3-1 Marco geológico regional (Tomado de UPES, 1999)**

#### 3.4.1.1.3 Areniscas tectonizadas (TKgm – C – Artec)

Paquete de areniscas intensamente fracturadas, brechadas, con zonas de harina de falla (Ver Fotografía 3-3). Se disponen como un lente tectónico en la parte inferior del escarpe, hacia el sur. Esta compuesta por areniscas cuarzosas de grano medio. Su comportamiento es similar a un talus.




**Fotografía 3-3 Areniscas brechadas por acción tectónica**

### 3.4.1.2 Unidades del Bloque Yacente

#### 3.4.1.2.1 Areniscas competentes dispuestas en bancos (TKgm - Y- Arcob)

Areniscas cuarzosas competentes, de grano medio a grueso, con espesores mayores de 3 metros. Se encuentran de mediana a intensamente fracturadas, sin llegar al brechamiento tectónico.

#### 3.4.1.2.2 Areniscas competentes dispuestas en capas gruesas (TKgm - Y - Arcoc)

Areniscas de grano fino a medio, con espesores menores de 1,5 metros. Se encuentran mediana a intensamente fracturadas. Se ubican en la parte media y alta del talud de extracción, hacia el extremo norte (Ver Fotografía 3-4).




**Fotografía 3-4 Areniscas competentes dispuestas en capas gruesas, Bloque yacente (TKgm – Y – Arcoc). Obsérvense las capas de arenisca muy fracturadas y las intercalaciones de arcillolitas grises.**

#### 3.4.1.2.3 Areniscas tectonizadas (TKgm – Y – Artec)

Se ubican hacia fuera del escarpe principal sometido a extracción minera. Afloran como pequeños parches en donde las areniscas se observan intensamente fracturadas, con zonas de brechas tectónicas y harina de falla (Ver Fotografía 3-5).




**Fotografía 3-5 Areniscas tectonizadas, Bloque yacente (TKgm – Y – Artec). Nótense los fragmentos brechados y la harina de falla que los rodea.**

#### 3.4.1.2.4 Arcillolitas grises (Tkgm – Y – Arci)

Arcillolitas grises poco fisibles, con escasas intercalaciones de capas delgadas a láminas (menos de 30 cm de espesor) de areniscas lodosas (Ver Fotografía 3-6). Presentan esquistosidad tectónica.



**Fotografía 3-6 Arcillolitas grises, Bloque yacente (TKgm – Y – Arci).**

#### 3.4.1.3 Coluvión antiguo (Qco)

Coluvión arenoso, matriz soportado, con matriz de color parduzco, de carácter predominantemente arenoso que engloba fragmentos pétreos de arenisca con tamaño promedio entre 10 y 30 cm, pero con bloques que pueden alcanzar 3 m3 aproximadamente en volumen. Este coluvión muestra evidencias de su antigüedad dado el color oxidados de su matriz (Fotografía 3-7) y de la incipiente meteorización de los fragmentos petreos.



**Fotografía 3-7 Aspecto del coluvión antiguo. Obsérvese su poco espesor y los colores parduzcos que evidencian su estabilidad**

#### 3.4.1.4 Depósitos aluviales sub-recientes (Qal)

Se ubican a manera de abanicos aluviales en el extremo norte de la zona de estudio. Están constituidos por limos y arenas de colores parduzcos (Fotografía 3-8), susceptibles al carcavamiento.

#### 3.4.1.5 Coluvión reciente y talus (Qco + Qtal)

Este material es el producto de un deslizamiento de coluvión antiguo y bloques de arenisca caídos a partir de un banco de areniscas intensamente fracturadas, producidos por la reconfiguración morfológica inestable relacionada con las actividades extractivas.



**Fotografía 3-8 Materiales granulares susceptibles a la erosión y burdamente estratificados, correspondientes a los depósitos aluviales sub-recientes**

### 3.4.1.6 Suelos negros de origen volcánico

Suelos limosos de colores grises claros, con espesores menores de 0,5 metros que suprayacen la capa endurecida negra (0,1 m) típica del sur de la Sabana de Bogotá. Esta secuencia cubre a su vez el coluvión antiguo en las zonas que no han sido urbanizadas. La unidad no es cartografiada, dado que cubriría información pertinente en lo que a estabilidad se refiere.

### 3.4.1.7 Residuos antrópicos relacionados con la actividad minera (Qrm)

Este material antrópico es de predominio arenoso, con bloques métricos de arenisca dispuestos de manera errática. Presentan compactación dado que fueron sometidos al tráfico de vehículos pesados durante el laboreo minero de la zona. El espesor de estos materiales no supera 1 m.

#### 3.4.1.8 Mezcla de residuos antrópicos mineros, de escombros de ladera y basuras (Qrm + Qb)

Sobre los materiales antrópicos que constituían los patios y las vías de acceso de la cantera, así como sobre el coluvión antiguo que cubría toda el área, se han dispuesto materiales como botaderos antrópicos de ladera, rellenos antrópicos no compactados en zonas bajas, basuras, etc. Este material es heterogéneo y de características variables, aunque se anota que las basuras son poco comunes y que predominan materiales terrígenos provenientes de residuos de construcción. El espesor de estos materiales no supera 1m, excepción hecha de algunos montículos en donde no se alcanzan los 2 m.

### 3.4.2 Estructural

#### 3.4.2.1 Mediciones de campo

Se midieron datos estructurales (planos de estratificación, diaclasas, estrìas de fricción) los cuales se incluyen en el Anexo B. Es importante anotar que en las estrías de fricción; en estos planos se midió, además de su acimut de buzamiento y su inclinación de buzamiento, la dirección (rumbo e inclinación) y el sentido de las estrías de fricción, con el fin de ligar estos datos con las estructuras regionales de fallamiento. En total se midieron 282 datos correspondientes a estratificaciones, fracturas y fallas con sus respectivos indicadores cinemáticos de desplazamiento., que constituyen una muestra representativa de las discontinuidades del sector (Ver ANEXO B).



**Fotografía 3-9 Mediciones de campo**

#### 3.4.2.1.1 Falla de Bolívar

En el macizo rocoso se presenta una falla inversa, con vergencia hacia el suroeste, orientación 230/40, con componente de rumbo. Contacta un paquete litológico con predominio de arcillolitas rosadas y areniscas con superficies de oxidación con un paquete de arcillolitas grises (Fotografía 3-10). Se asocian a ella zonas de fracturamiento intenso, areniscas tectonizadas dispuestas como lentes tectónicos y replegamientos locales de arcillolitas.

Por esta razón y dado que el comportamiento cinemático es diferente para los bloques yacente y colgante, el macizo rocoso fue geológicamente dividido en dos sectores: el primero correspondiente al bloque yacente de esta falla y el segundo correspondiente al bloque colgante.



**Fotografía 3-10 Imagen del trazo de falla de Bolivar, que separa unidades litológicas con colores rosados en el bloque colgante de unidales litológicas con predominios de color gris en el bloque yacente.**

##### *3.4.2.1.1.1 Bloque yacente*

Para el bloque yacente se presentan cuatro familias principales de discontinuidades y algunas dispersas (Ver de la Figura 3-2 a la Figura 3-4):

- D1 = Fracturas 104 / 66 con una frecuencia del 7,8%. Esta familia se encuentra asociada con fallas de rumbo, de carácter dextral y su orientación es similar a fallas N-S reportadas al suroeste de la zona de estudio por trabajos anteriores.
- D2 = Fracturas 142 / 64 con una frecuencia del 5.6%. Esta familia se encuentra asociada a fallas de rumbo destrales y su orientación es similar a un sistema de fallas N50E con espaciamiento de 1 km y que fueron reportadas al suroeste de la zona de estudio por trabajos Ingeocim (1999)
- D3 = Fracturas 184 / 88 con una frecuencia del 3,5%.
- D4 = Estratificación 293 / 29 con una frecuencia del 2,4%.
- Fracturas dispersas asociadas.

Estas familias se mantienen a lo largo y ancho de todo el bloque.

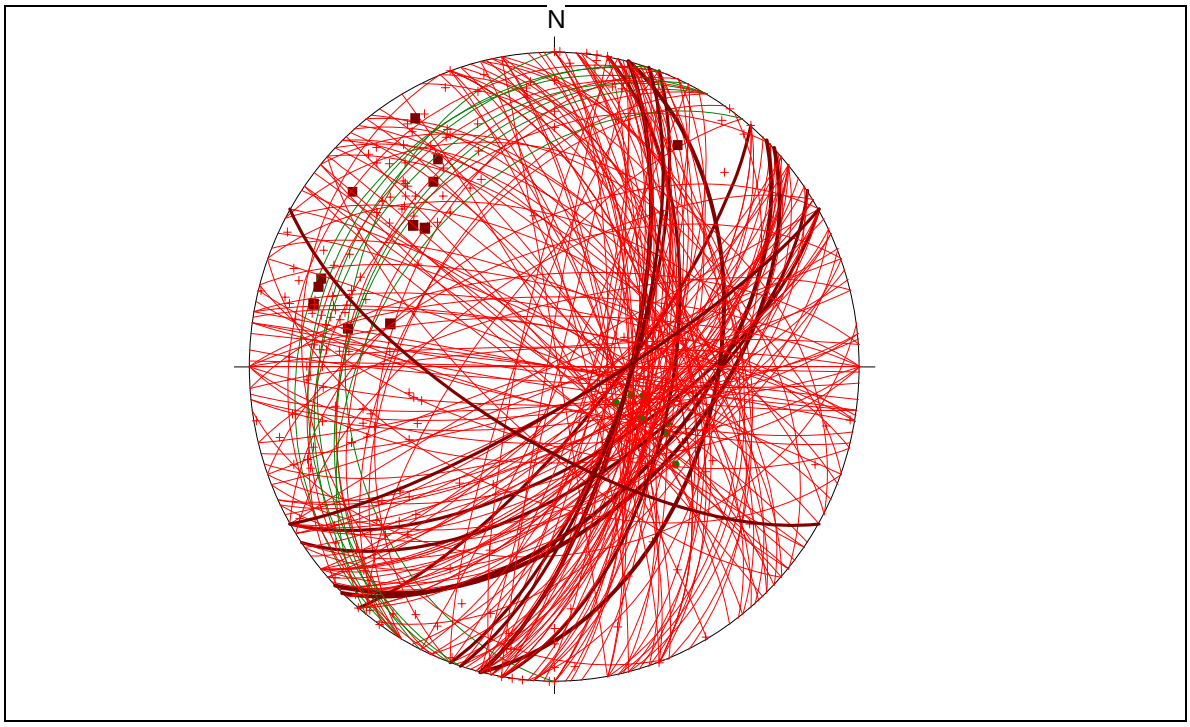



**Figura 3-2 Estereógrafa de diaclasas, Bloque yacente**

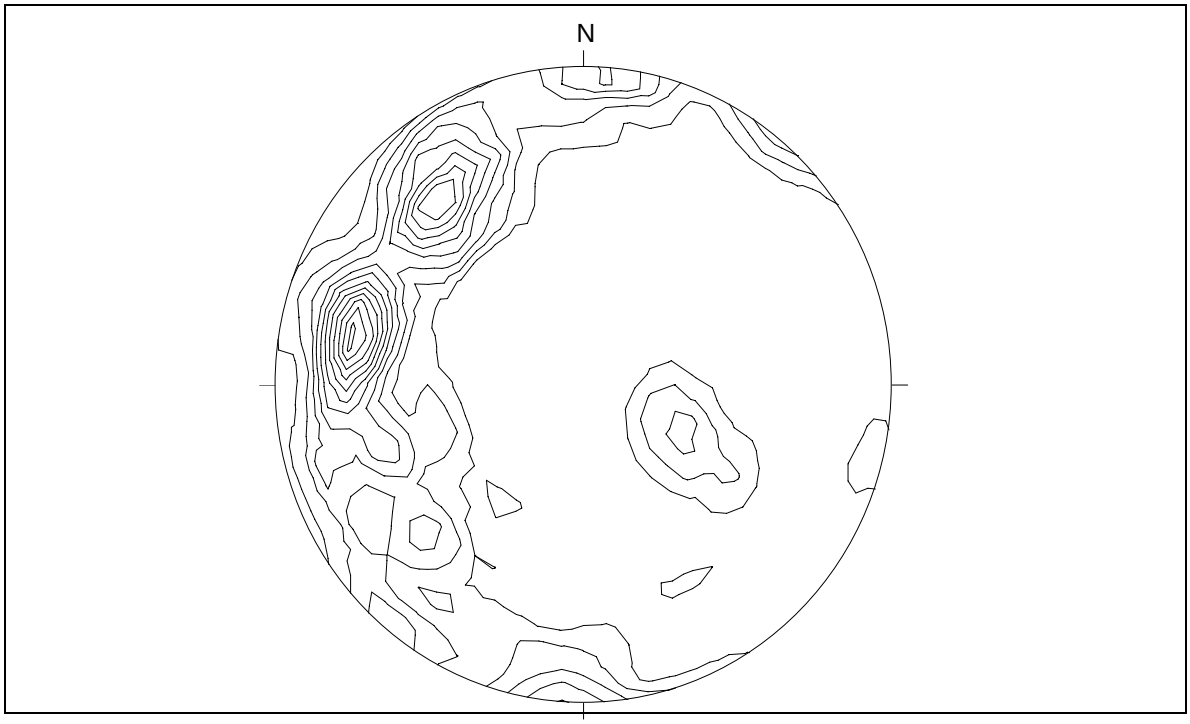



**Figura 3-3 Polos para las diaclasas medidas, Bloque yacente**

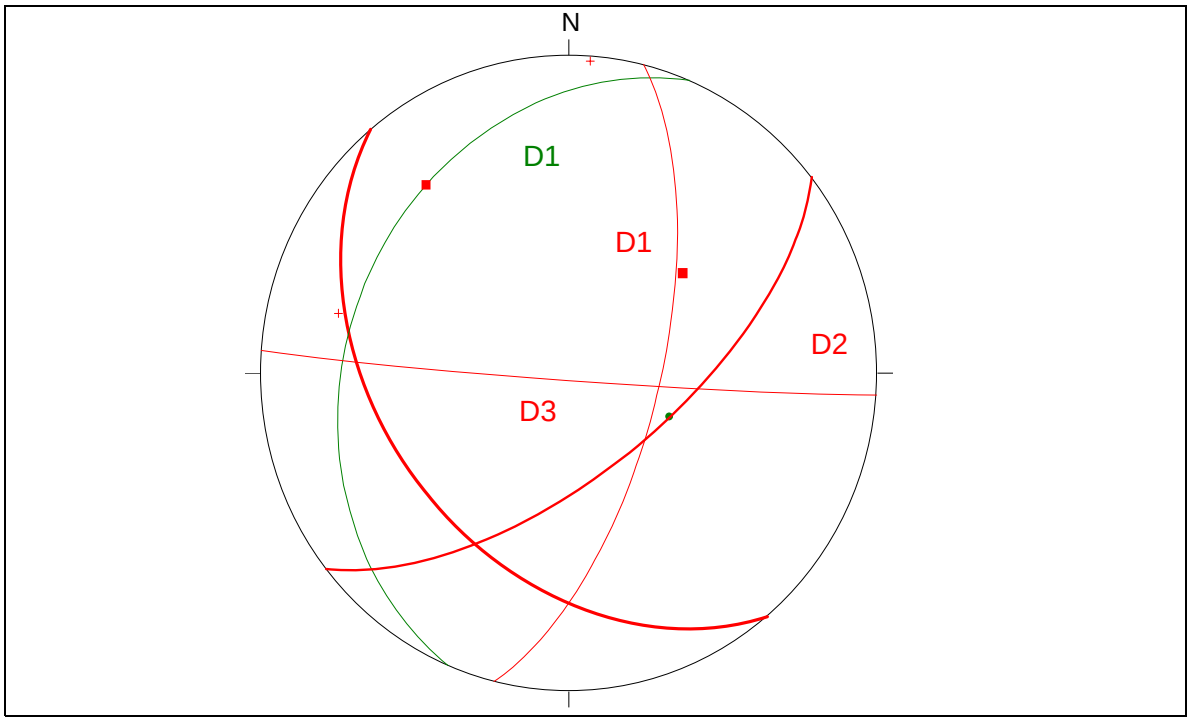



**Figura 3-4 Discontinuidades promedias a partir de la totalidad de las diaclasas, Bloque yacente**

#### *3.4.2.1.1.2 Bloque colgante*

Para el bloque colgante se presentan cuatro familias (Ver de la Figura 3-5 a la Figura 3-7):

- D1 = Fracturas 13 / 54 con una frecuencia del 10.7%.
- D2 = Estratificación 306 / 20 con una frecuencia del 5.1%.
- D3 = Fracturas 46 / 80 con una frecuencia del 5 %.
- D4 = Fracturas 128 / 42 con una frecuencia del 4%. Esta familia se encuentra asociada a fallas de rumbo dextrales y su orientación es similar a un sistema de fallas N50E con espaciamiento de 1 km y que fue reportado al suroeste de la zona de estudio por trabajos Ingeocim, 1999 (Ver Figura 3-1)

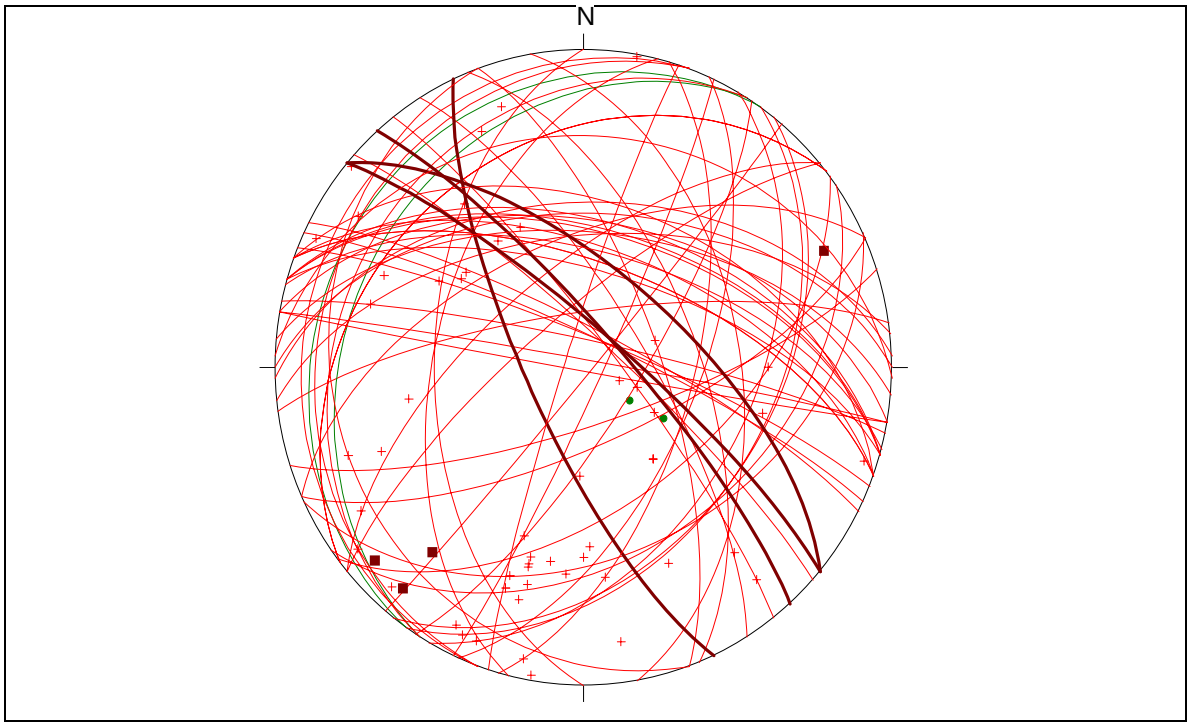



**Figura 3-5 Estereógrafa de diaclasas Bloque colgante**

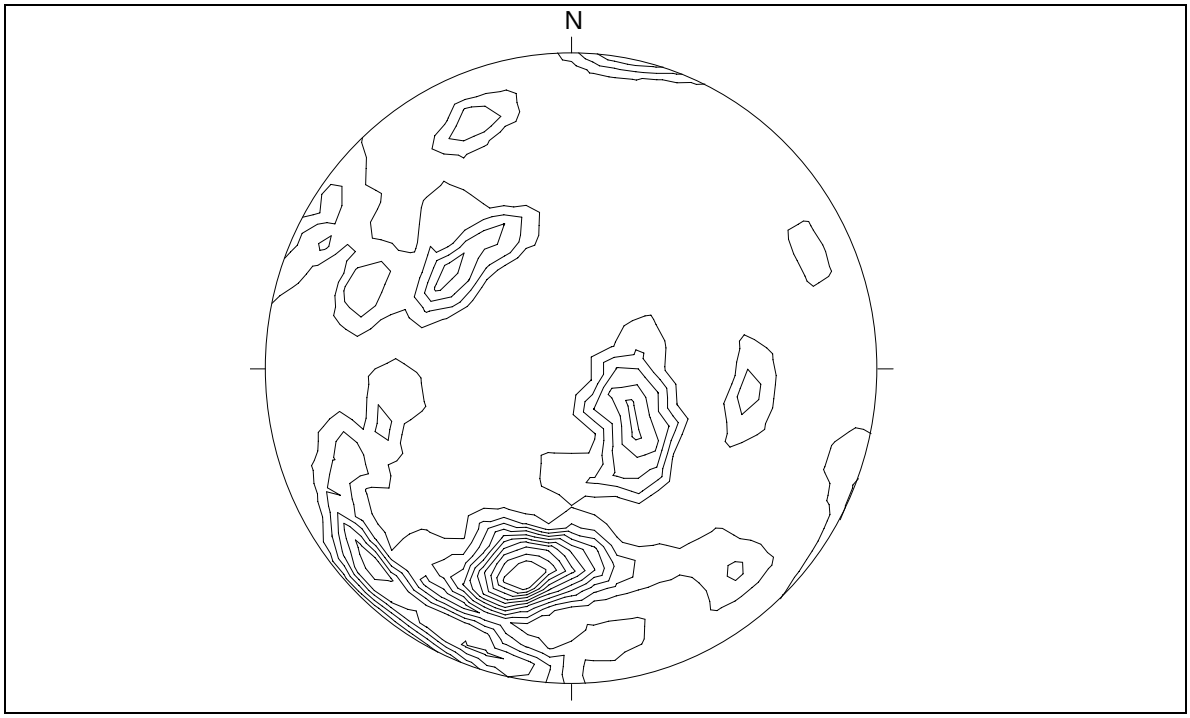



**Figura 3-6 Polos para las diaclasas medidas, Bloque colgante**

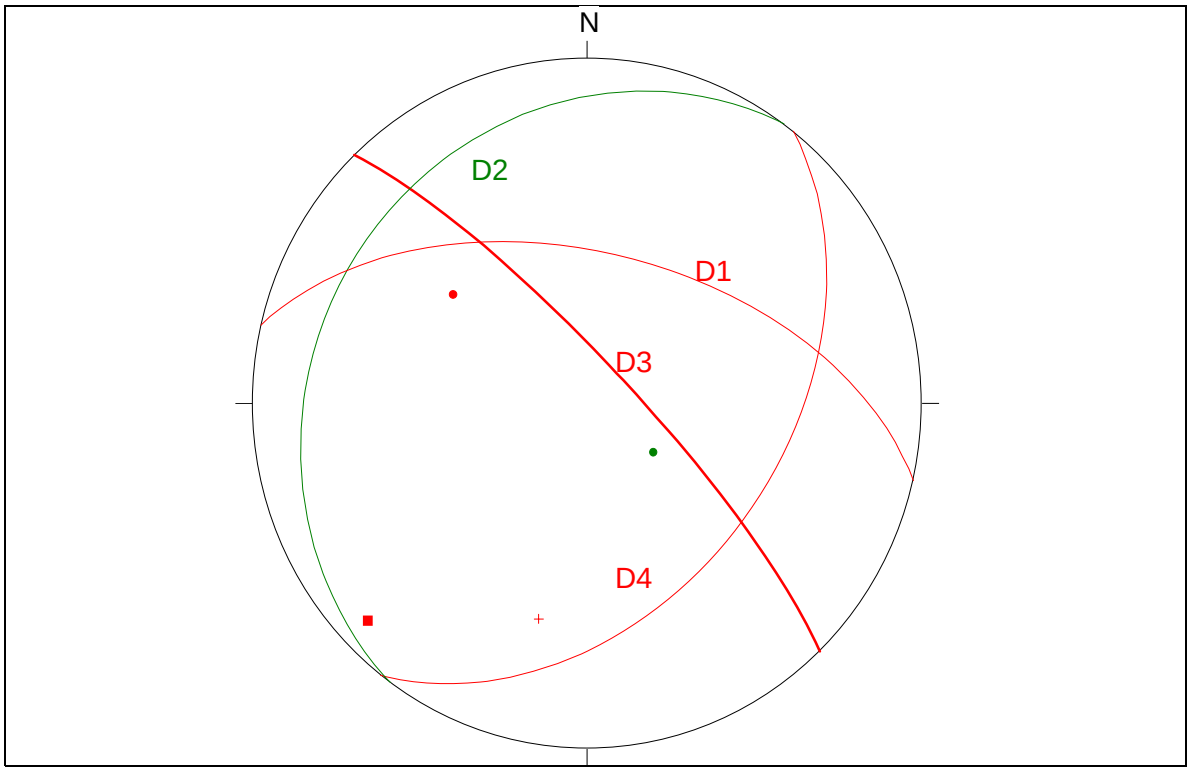



**Figura 3-7 Discontinuidades promedias a partir de la totalidad de las diaclasas, Bloque colgante**

## 3.5 GEOMORFOLOGÍA

### 3.5.1 Morfoestructural

La zona de interés se encuentra en la parte baja de una ladera de tipo denudacional que conforma un Piedemonte colinado, sin un control estructural claro.

La ladera tenia una inclinación promedio de 25º, pero fue intervenida por labores extractivas (como fuente de materiales de construcción) mediante cortes sub-verticales. Como consecuencia de estas actividades, se crearon condiciones cinemáticas para la desestabilización de pequeñas porciones de macizo rocoso mediante el mecanismo de caída de bloques y detritos en las zonas de taludes de extracción (cuya altura no supera 10 metros) que fueron abandonadas con una reconfiguración morfológica inestable, tanto por los mencionados procesos de caídas, y por la disminución de las características de resistencia del macizo rocoso, ya naturalmente afectadas por procesos de tectonismo intenso, por haber sido sometidas a voladuras.

#### 3.5.1.1 Laderas denudacionales coluviales poco intervenidas (Ldc)

Se ubican en la parte alta de la zona de estudio (ladera arriba del escarpe producido por la explotación), en las áreas que no fueron intervenidas por la actividad extractiva. Se

desarrollan sobre coluviones antiguos con evidencias de estabilidad en el tiempo (los coluviones tienen colores oscuros y se encuentran algo meteorizados). Conservan en buena parte de ellas el cubrimiento de suelos oscuros provenientes de cenizas volcánicas, así como por parches de rellenos antrópicos que no superan 1 metro de espesor.

#### 3.5.1.2 Taludes de antiguas extracciones mineras (Tem)

Son los escarpes producidos por la actividad extractiva. Sus pendientes son sub-verticales. Están sujetos a la caída de bloques en las zonas de afloramiento de areniscas y de caída de detritos y carcavamiento en las zonas de afloramiento de arcillolitas, dado su fracturamiento (en el primer caso) y la disminución de sus características de resistencia por los esfuerzos a los que fueron sometidos durante su laboreo como yacimiento minero.

#### 3.5.1.3 Explanaciones correspondientes a antiguos patios y vías de acceso relacionados con la extracción minera (Zem)

Estas zonas de pendientes bajas, cercanas a la horizontal corresponden a antiguos patios y vías de acceso relacionados con la actividad extractiva. Dado que fueron objeto de tráfico pesado tienen cierta compactación, que mejora sus características de resistencia, a menos que hayan sido cubiertas posteriormente por rellenos antrópicos como escombros de construcción y basuras (Ver Fotografía 3-11).




**Fotografía 3-11 Explanaciones correspondientes a antiguos patios y vías de acceso relacionados con la extracción minera**

#### 3.5.1.4 Abanico aluvial antiguo (Ab – Al)

Esta zona levemente inclinada hacia el oriente fue formada por la depositación de materiales aluviales transportados por la quebrada que limita la zona de estudio hacia el norte. En la fotointerpretación se puede ver la susceptibilidad ante la erosión que presenta naturalmente esta unidad.

### 3.5.2 Morfodinámica

#### 3.5.2.1 Meteorización

La meteorización es el conjunto de procesos externos (físico-químicos) que causan la alteración y desintegración de los componentes de las rocas y los suelos.

Para el área estudiada, el factor principal de meteorización es de tipo hídrico, en la que el lavado de ciertos minerales y la concentración de otros lleva al cambio de las rocas y los suelos originales en suelos tipo residual.

Los procesos de meteorización se muestran en estadios algo avanzados en los coluviones que cubren la mayor parte del área y en las zonas de afloramiento de arcillolitas, donde se observan suelos residuales arcillosos de colores amarillentos.

#### 3.5.2.2 Erosión hídrica concentrada

Se definen como el grupo de eventos por medio de los cuales el material rocoso o los suelos son desprendidos o disueltos y transportados por el agua a lo largo de un eje lineal. Esto incluye, en el caso de los suelos, el movimiento de partículas arrancadas por el impacto de las gotas de lluvia que son transportadas en un flujo superficial.

Para la zona de estudio se encuentran surcos y cárcavas desarrolladas sobre las caras desnudas de los antiguos taludes de explotación minera en los que afloran arcillolitas que alteran a suelos residuales arcillosos (Fotografía 3-12).

#### 3.5.2.3 Remoción en masa

El principal mecanismo de remoción en masa esta constituido por las caídas, tanto de bloques como de detritos. En la parte más sur del antiguo talud de extracción se observa un deslizamiento traslacional de coluvión y talus.

##### 3.5.2.3.1 <u>Caídas de bloques</u>

Se presentan en los antiguos taludes de extracción, donde afloran areniscas fracturadas o coluviones antiguos que contengan bloques de arenisca. La altura máxima de caída es de 5 metros y el tamaño máximo de bloque observado fue de aproximadamente 3 $m^3$.



**Fotografía 3-12 Carcavamiento sobre arcillolitas aflorantes en un talud que fue sometido a actividad extractiva.**

#### 3.5.2.3.2 Caídas de detritos

En las zonas de afloramiento de arcillolitas, ubicadas en los antiguos taludes de extracción, se observa caída de detritos arcillosos. Este proceso es en ocasiones detonado por el carcavamiento intenso que se observa en este tipo de litologías..

#### 3.5.2.3.3 Deslizamiento traslacional

En el extremo sur del talud de extracción se presenta un proceso de deslizamiento que involucra coluvión antiguo y talus proveniente de la depositación de fragmentos de arenisca caídos a partir de un banco de arenisca muy fracturado que se encuentra en la parte superior del talud. (Fotografía 3-13)



**Fotografía 3-13 Deslizamiento traslacional lento que involucra colusiones y talus relacionados con los procesos de caída de roca.**

## 3.6 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE PROCESOS DENUDACIONALES.

### 3.6.1 Año 1951 (C-604, Foto 610)

La zona se encuentra poco intervenida, sin urbanización y solo existe un carreteable en la parte plana, equidistante entre el río Tunjuelo y la zona de estudio (la actual Avenida Ciudad de Villavicencio). Ver Fotografía 3-14.

La cobertura en la zona de estudio son pastos en las zonas poco inclinadas y rastrojo bajo en la zona de pendientes más fuertes, correspondientes con el afloramiento de areniscas.

Se observan tres unidades litológicas que definen la morfología: una unidad resistente, que forma zonas abruptas y que corresponde a las areniscas cuarzosas enmarcada al sur por una unidad suave en la parte alta de la zona de estudio, correspondiente principalmente a arcillolitas y una unidad muy poco inclinada formada por la coalescencia de antiguos conos de deyección que forman una zona plana. Las dos unidades suaves (la de ladera y la del pie de ladera) se encuentran afectadas por procesos de

carcavamiento intenso. Fuera de la zona de estudio se encuentra una terraza alta, adosada en algunos puntos a los conos de deyección arcillosos.

La zona correspondiente a las areniscas y que se constituye en el principal rasgo morfológico no presenta ninguna evidencia de la existencia de procesos de remoción en masa.

### 3.6.2 Año 1956 (C-773, Foto 052)

Para esta época ya se observa intervención en la zona de estudio: las vías principales de la actualidad ya se han abierto como carreteables de acceso a dos viviendas y el talud noroeste es una pequeña zona de extracción de arenisca (área de aproximadamente 300m²). Ver Fotografía 3-15.

No se observa progreso en la zona carcavada y la mejor escala de esta fotografía permite definir zonas de bloques sueltos por meteorización en la zona de arenisca y evidencia de caídas aisladas de dichos bloques (se observan pocos bloques en el pie de la zona abrupta marcada por el afloramiento de arenisca).

En la ladera la cobertura del suelo es de pastos y rastrojo bajo en las zonas más suaves y de rastrojo bajo con parches de rastrojo alto en las zonas más abruptas (por afloramiento de arenisca).

### 3.6.3 Año 1963 (R-590, Foto 022)

Esta fotografía fue analizada para determinar lineamientos fotogeológicos regionales que puedan ayudar a dilucidar los resultados obtenidos de la medición de diaclasas. Se presentan cuatro lineamientos en la zona de estudio, dos de ellos sub-paralelos; sus direcciones (en acimut de buzamiento) son:

- 225º (dos de ellos)
- 100º
- 265º

En cuanto a la situación morfodinámica de la zona de estudio, aun no se encuentra intervenida por la actividad extractiva y su situación es similar a la descrita para la fotografía aérea de 1956, aunque con el avance de los carreteables ladera arriba. Ver Fotografía 3-16.

### 3.6.4 Año 1977 (C-1732, Foto 023)

Esta imagen muestra ya la zona de estudio como una zona sometida a extracción de materiales. La zona extraída tiene un área cercana a 700 m2 y la mayor parte de los taludes se observan sub-verticales. El ancho del frente de extracción principal es de aproximadamente 60 metros y su altura (de acuerdo con el mapa topográfico IGAC 1979, restituido a partir de esta fotografía) es de 20 metros. Ver Fotografía 3-17.

A partir del estudio de campo y coherente con la historia de la actividad extractiva en la ciudad, la extracción anterior a la década de los 70 del siglo XX (cuando se extendió la

mecanización de la actividad) se concentraba en zonas en las que el macizo rocoso se encontraba intensamente fracturado, de manera que se optimizaba el avance de la extracción.

En las partes bajas se han plantado eucaliptos y se observa un freno a los procesos de erosión en las partes poco inclinadas. El carcavamiento en la parte alta permanece estable.

La unidad morfológica que correspondía a la terraza alta ha sido urbanizada en su totalidad (Barrio San Francisco) y las vegas de inundación de la quebrada Limas también comienzan a ser invadidas por las urbanizaciones. Las dos viviendas observadas en la foto de 1956 han sido demolidas (una de ellas por encontrarse dentro de la zona de extracción).

### 3.6.5 Año 1990 (R-1153, Foto 255)

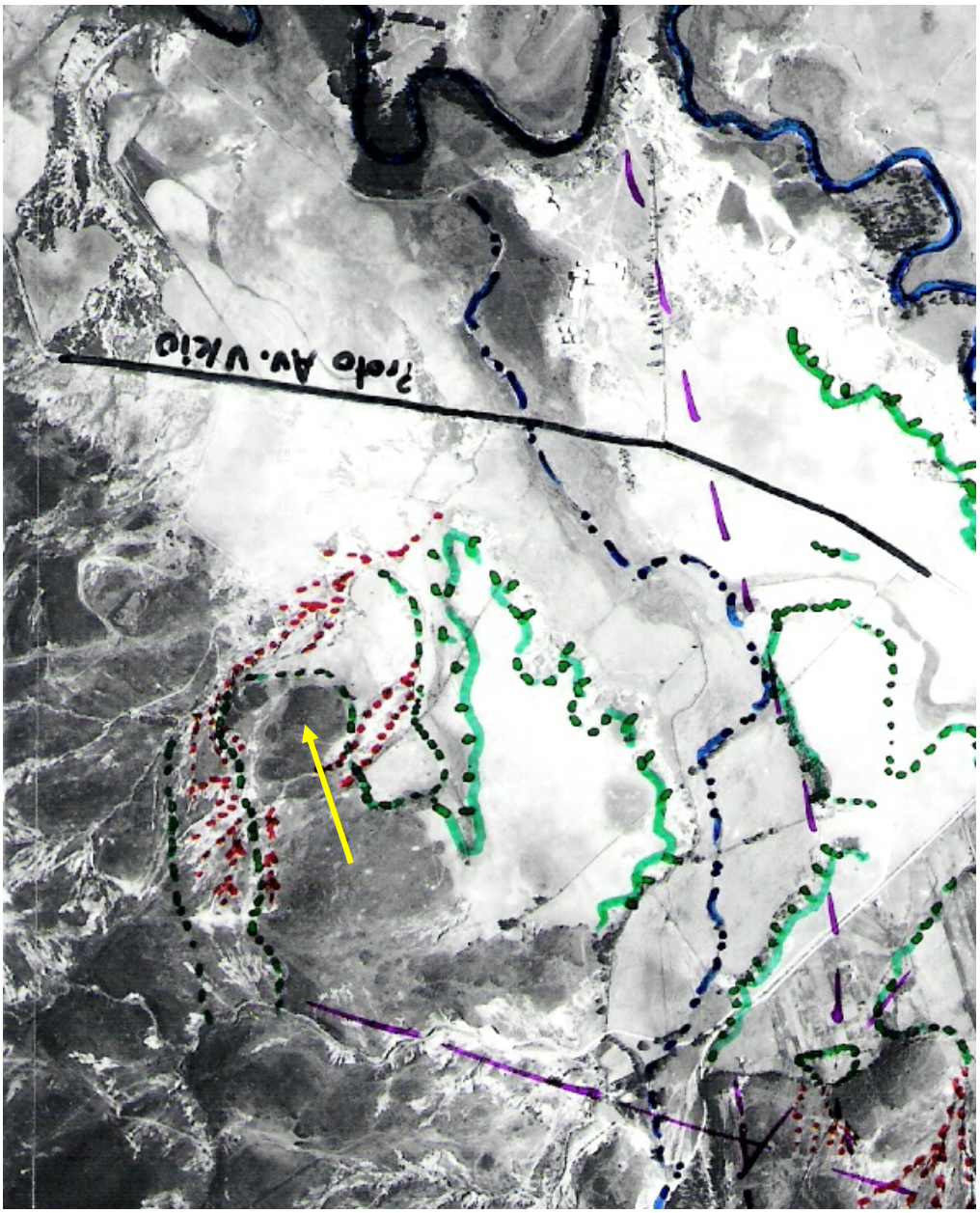
La situación del talud que contiene el área de extracción de materiales no presenta cambios sustanciales con respecto a lo observado en 1977. Al parecer la actividad cesó en este periodo.

Las zonas altas de la ladera que ya han sido urbanizadas lo han hecho sobre las zonas arcillosas de pendiente suave y han cubierto las zonas sujetas anteriormente a erosión. Las zonas erodadas no cubiertas se observan estables en la ladera alta y recesivas en las zonas bajas, donde se ha permitido el avance de vegetación de matorral (rastrojo bajo, con parches de rastrojo alto). Los eucaliptos plantados en la parte baja se conservan. Ver Fotografía 3-18.

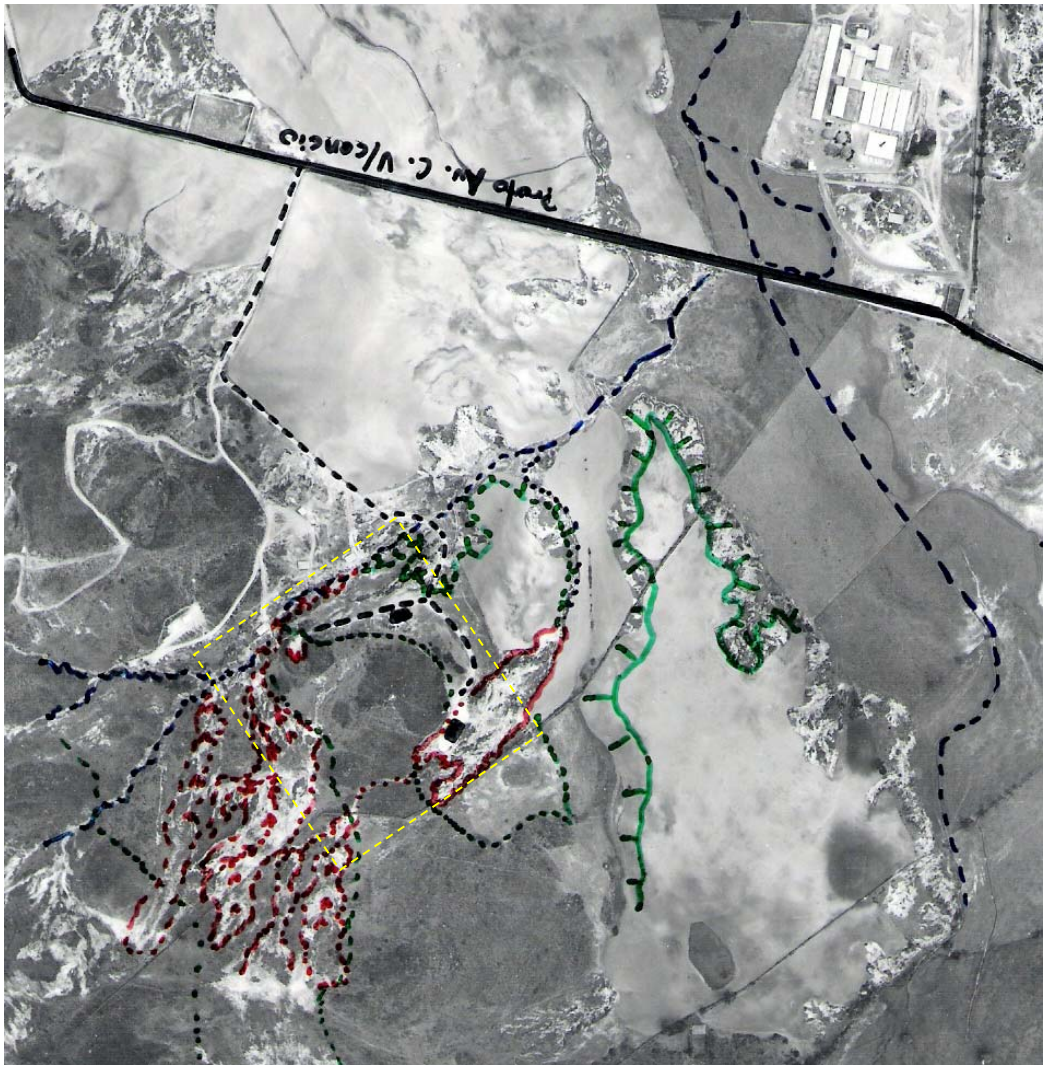
### 3.6.6 Año 1998 (SAV-415, Faja 4, Foto 086)

La situación del talud solo fue modificada por la construcción de un acceso a media ladera, que dividió el antiguo frente de extracción. Las zonas altas menos inclinadas fueron totalmente urbanizadas, razón por la cual no se observan ya los procesos de erosión (carcavamiento). Los eucaliptos de la parte baja permanecen en su mayoría, así como el rastrojo bajo del zanjón ubicado al occidente.

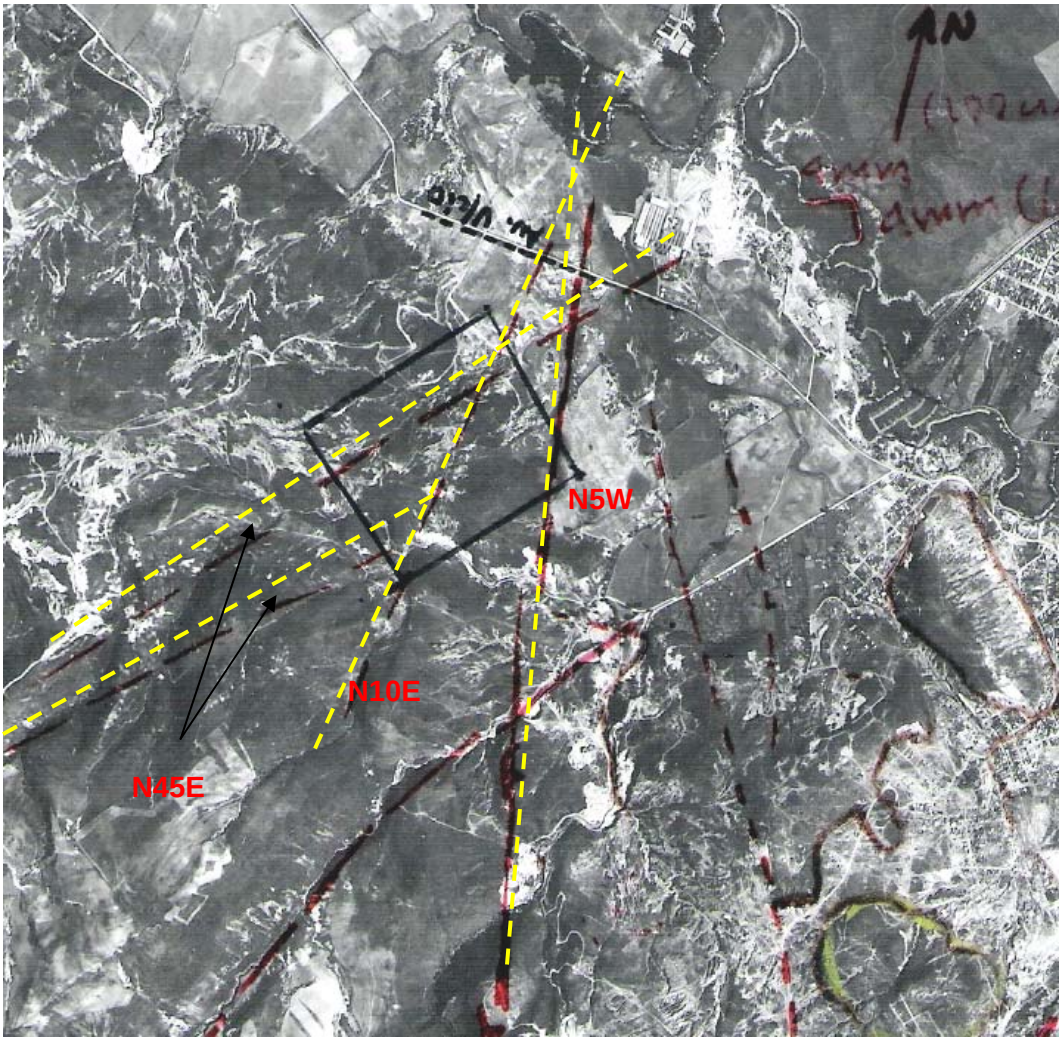
El escarpe se muestra en colores claros (es decir sin intemperismo ni cobertura vegetal) lo que puede significar la extracción puntual de materiales o su inestabilidad. Ver Fotografía 3-19.




**Fotografía 3-14 Fotografía aérea de 1951. En trazos verdes los contactos litológicos aproximados; en rojo las zonas con carcavamiento intenso y en violeta, un lineamiento fotogeológico. Se demarca la zona de estudio con la línea de trazos amarilla. Nótese la inexistencia de procesos de remoción en masa en la zona**



**Fotografía 3-15 Fotografía aérea de 1956. Aun no se observa intervención fuerte, aunque ya existen carreteables cercanos (en negro) y dos viviendas (puntos negros). El carcavamiento se da sobre zonas arcillosas y sobre conos de deyección. La zona más oscura, que demarca la existencia de areniscas resistentes no presenta procesos de remoción en masa, a excepción de caídas puntuales de bloques sueltos por procesos de meteorizacion**




**Fotografía 3-16 Fotografía aérea de 1963. Nótense los lineamientos fotogeológicos. La zona de estudio se encuentra dentro del recuadro**



**Fotografía 3-17 Fotografía aérea de 1977. Para esta época ya se había establecido la actividad extractiva (contorneada con línea roja), sobre zonas de brecha de falla fácilmente laborable sin medios mecanizados. Los procesos erosivos de la parte alta no evolucionaron**



**Fotografía 3-18 Fotografía aérea de 1990. Nótese el avance de los procesos de urbanización y que el frente de extracción se observa similar a lo descrito sobre la imagen de 1977**



**Fotografía 3-19 Fotografía aérea de 1998. Nótese el avance de la urbanización sobre la totalidad de zonas poco empinadas y el acceso (marcado con la flecha) que fue abierto dividiendo el talud afectado por actividades extractivas.**

**Plano 3-1 Geología**

**Plano 3-2 Geomorfología**

**ANEXO A TOPOGRAFÍA**

**ANEXO B**
**GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA**

# 4. CLIMA, HIDROLÓGICA, HIDRÁULICA, HIDROGEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA

## 4.1 CLIMA

La caracterización del clima del área se llevó a cabo con base en la información de los elementos constitutivos del mismo, sobre los cuales se dispone de información.

### 4.1.1 Información disponible

De acuerdo con las investigaciones adelantadas tanto en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB-ESP, en la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR y en el Instituto de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM, se encontró que aunque existen varias estaciones de medición, en no todas ellas se miden los elementos del clima necesarios para los objetivos propuestos. De las estaciones analizadas se seleccionó la de Doña Juana, cuya información corresponde con el mayor número de elementos y adicionalmente, es la más cercana al área de interés.

La caracterización de la precipitación media se adelantó con la información correspondiente a la estación Casa Blanca, la cual posee una serie que data de 1976, representativa para los análisis realizados y por otra parte, dada su cercanía con el área de interés, parece ser la que mejor refleja el régimen de precipitación desde el punto de vista de su distribución espacial y en el tiempo

La precipitación máxima se determinó a partir de las curvas de Intensidad-Duraciòn-Frecuencia, IDF obtenidas por la EAAB-ESP para el sector. Esta selección se llevó a cabo teniendo en cuenta los objetivos perseguidos con su determinación.

En la Figura 4-1 se presenta la localización de las estaciones y el patrón de distribución territorial de la precipitación media mensual en la Sabana de Bogotá, obtenido por INGEOMINAS en el marco del estudio de deslizamientos en el área cercana a la que es objeto del presente estudio.

Dentro de este orden de ideas se seleccionó para efecto de análisis la información sobre temperatura media del aire, Humedad Relativa media mensual y Brillo solar de la Estación Doña Juana y los valores totales mensuales de precipitación correspondientes a la estación Casa Blanca en el tanque de la EAAB-ESP Sierra Morena.

De los análisis realizados con anterioridad para estudios similares de áreas cercanas se puede concluir que el clima del área es, con muy pocas diferencias, similar al de la Sabana de Bogotá, tal como se puede apreciar en lo que se consigna a continuación

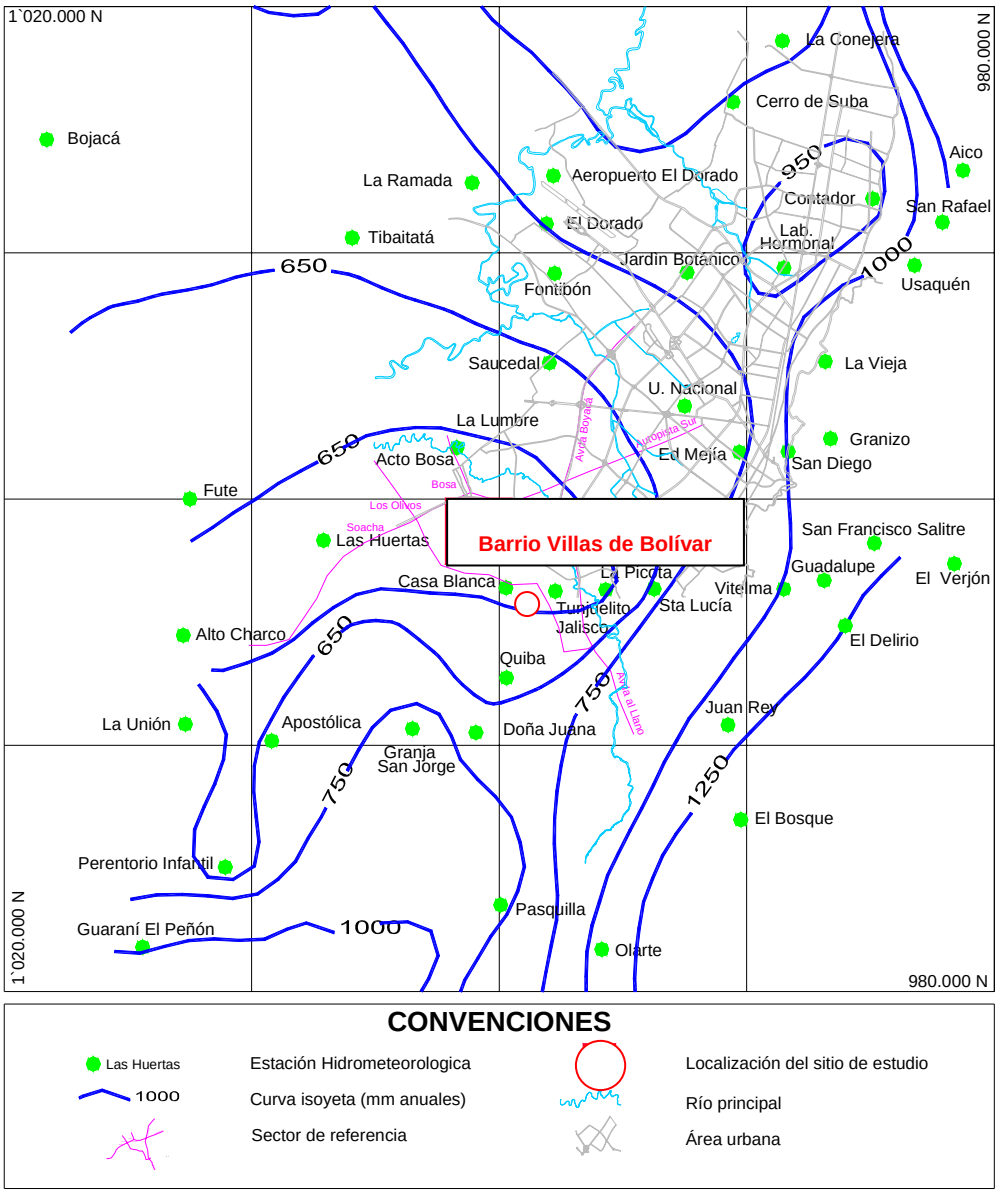



**Figura 4-1 Localización de las estaciones y patrón de distribución de la precipitación media (INGEOMINAS, 2002)**

### 4.1.2 Precipitación media

De acuerdo con el patrón de distribución territorial, los valores medios anuales multianuales de precipitación son menores que en el resto de la Sabana. El valor total anual medio multianual, de acuerdo con la información de la Estación Casablanca es de 616 mm, valor que coincide con lo observado en el patrón de isoyetas de la Figura 4-1.

#### 4.1.2.1 Distribución territorial

La definición de la distribución territorial en la Sabana de Bogotá la realizó INGEOMINAS en el marco de los estudios de deslizamientos en el Sector El Espino, área localizada en el sur oriente de la Sabana. Como se puede apreciar en la Figura 4-1, los mayores valores de precipitación media anual multianual se presentan en el nororiente de la ciudad y decrecen hacia el sur y sur oeste de la Sabana. En el área de interés se observan valores medios anuales del orden de 650 mm, que coinciden con lo obtenido de la información de Casablanca, como se mencionó antes.

#### 4.1.2.2 Distribución temporal

La distribución intra anual de la precipitación obedece a un modelo bimodal, en el que se evidencian dos períodos lluviosos intercalados con períodos secos. El primer período lluvioso o húmedo corresponde a los meses de marzo a mayo, en el que tiene ocurrencia el 36,7 % de la precipitación anual. El segundo se localiza entre los meses de octubre y noviembre, en el que ocurre el 22,1 % del total anual. Los períodos secos corresponden a los meses de enero y febrero, el primero y a Julio a agosto el segundo. La variación intra anual de la precipitación en el área se aprecia en la Figura 4-2.

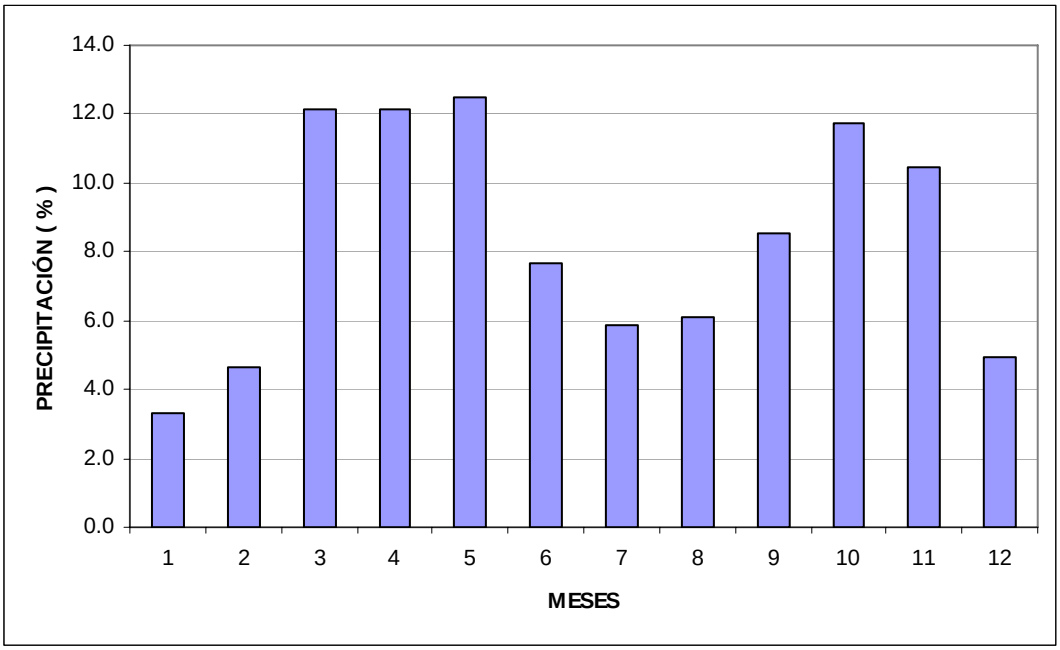



**Figura 4-2 Distribución intra anual de la precipitación**

Los meses más secos, en promedio multianual son enero, con 20,6 mm; febrero donde se presentan 28,7 mm y diciembre, mes en el que ocurren 30,5 mm. Por otra parte, los más húmedos o de mayor precipitación son los meses de marzo, abril, mayo y octubre, con valores superiores a 70 mm.

#### 4.1.2.3 Temperatura del aire, Humedad Relativa y evapotranspiración

La temperatura media del aire muestra pocas variaciones dentro del año; su valor medio es de 12,5° C. Los mese más cálidos son octubre, noviembre, marzo, abril y mayo donde se alcanzan valores de 13° C. El más frío es el de julio, con 11 ° C.

La Humedad Relativa es casi constante. Muestra una variación máxima del 10% dentro del año. Los meses más secos son enero y febrero con valores de 69 y 70%, respectivamente. El más húmedo es julio, donde el valor medio multianual alcanza el 78%.

La evapotranspiración se calculó utilizando la metodología propuesta por Hargreaves, en la cual se tienen en cuenta la temperatura media del aire, la humedad relativa y la relación entre el número de horas de luz en el día y la potencial para cada mes.

En la Tabla 4-1 se aprecian los valores totales mensuales de precipitación obtenidos en la Estación Casablanca y en la Tabla 4-2, los de las variables del clima y los de evapotranspiración potencial obtenidos tal como se indicó antes

**Tabla 4-1 Valores totales mensuales de precipitación, Estacion Casablanca (20197).**

| AÑO | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE | TOTAL |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1976 | 21.0 | 31.0 | 80.0 | 78.0 | 58.0 | 49.9 | 14.2 | 20.2 | 46.8 | 88.9 | 45.9 | 22.2 | 556.1 |
| 1977 | 11.8 | 11.4 | 49.4 | 55.9 | 14.1 | 18.5 | 47.7 | 40.1 | 64.6 | 72.1 | 62.3 | 17.3 | 465.2 |
| 1978 | 3.1 | 19.5 | 28.0 | 109.2 | 94.8 | 61.4 | 41.8 | 21.2 | 40.8 | 49.8 | 26.5 | 13.6 | 509.7 |
| 1979 | 38.0 | 6.1 | 44.1 | 90.9 | 91.8 | 84.0 | 47.1 | 91.9 | 115.1 | 132.8 | 136.8 | 13.7 | 892.3 |
| 1980 | 9.9 | 38.5 | 7.2 | 55.7 | 82.8 | 86.6 | 20.6 | 50.4 | 28.8 | 50.9 | 72.6 | 31.3 | 535.3 |
| 1981 | 1.9 | 10.0 | 14.5 | 154.4 | 111.6 | 26.4 | 15.1 | 38.5 | 71.1 | 92.3 | 130.4 | 41.8 | 708.0 |
| 1982 | 53.5 | 19.1 | 42.4 | 141.7 | 84.6 | 9.5 | 31.9 | 29.5 | 18.4 | 75.7 | 41.0 | 48.4 | 595.7 |
| 1983 | 6.6 | 26.5 | 81.9 | 112.4 | 70.0 | 24.0 | 33.8 | 21.5 | 28.5 | 63.0 | 30.6 | 28.1 | 526.9 |
| 1984 | 39.0 | 45.9 | 28.8 | 38.6 | 79.2 | 97.1 | 26.3 | 107.9 | 50.8 | 93.6 | 77.3 | 3.3 | 687.8 |
| 1985 | 4.4 | 2.0 | 19.5 | 42.7 | 75.4 | 20.1 | 28.3 | 41.4 | 71.1 | 65.5 | 48.9 | 9.2 | 428.5 |
| 1986 | 8.6 | 73.7 | 37.3 | 50.2 | 117.4 | 38.2 | 22.1 | 21.1 | 84.8 | 142.5 | 55.7 | 2.4 | 654.0 |
| 1987 | 14.4 | 27.7 | 17.4 | 65.6 | 57.6 | 9.9 | 62.6 | 29.2 | 65.1 | 106.5 | 40.2 | 11.9 | 508.1 |
| 1988 | 13.5 | 25.6 | 10.0 | 47.1 | 46.5 | 57.8 | 27.9 | 48.3 | 93.2 | 107.9 | 95.1 | 47.6 | 620.5 |
| 1989 | 12.0 | 32.2 | 76.6 | 18.1 | 62.5 | 53.5 | 25.2 | 22.3 | 66.5 | 52.0 | 72.0 | 43.2 | 536.1 |
| 1990 | 33.3 | 28.8 | 38.3 | 50.2 | 75.1 | 26.6 | 37.6 | 37.4 | 33.1 | 97.1 | 51.0 | 19.0 | 527.5 |
| 1991 | 32.8 | 13.3 | 93.1 | 63.7 | 70.9 | 26.2 | 57.0 | 45.0 | 27.7 | 11.1 | 60.4 | 37.6 | 538.8 |
| 1992 | 16.5 | 19.9 | 12.2 | 42.5 | 73.5 | 9.3 | 26.5 | 29.7 | 61.9 | 16.8 | 9.4 | 57.3 | 375.5 |
| 1993 | 13.6 | 20.7 | 55.1 | 87.7 | 96.9 | 31.4 | 67.9 | 21.3 | 33.7 | 36.0 | 161.8 | 8.2 | 634.3 |
| 1994 | 41.1 | 39.4 | 81.3 | 77.5 | 79.4 | 42.4 | 31.9 | 30.1 | 15.3 | 96.6 | 135.8 | 7.5 | 678.3 |
| 1995 | 1.4 | 8.5 | 55.1 | 78.1 | 50.0 | 67.9 | 29.9 | 47.7 | 29.0 | 42.4 | 40.3 | 88.5 | 538.8 |
| 1996 | 28.6 | 48.1 | 92.0 | 86.4 | 47.6 | 87.2 | 50.0 | 42.4 | 29.8 | 124.8 | 42.8 | 31.0 | 710.7 |
| 1997 | 50.7 | 30.0 | 80.0 | 113.7 | 128.9 | 78.5 | 30.1 | 8.0 | 32.9 | 35.6 | 20.5 | 0.8 | 609.7 |
| 1998 | 0.2 | 26.9 | 39.9 | 93.6 | 137.8 | 33.8 | 75.4 | 49.2 | 47.7 | 66.3 | 49.7 | 59.6 | 680.1 |
| 1999 | 47.4 | 70.7 | 61.9 | 58.4 | 93.9 | 50.4 | 21.7 | 54.4 | 70.7 | 80.7 | 57.0 | 23.5 | 690.7 |
| 2000 | 30.2 | 81.2 | 92.6 | 44.7 | 73.7 | 50.0 | 38.6 | 50.0 | 67.2 | 47.3 | 45.5 | 30.9 | 651.9 |
| 2001 | 25.5 | 12.3 | 39.7 | 6.3 | 44.1 | 30.0 | 32.8 | 10.5 | 87.0 | 18.5 | 72.7 | 59.1 | 438.5 |
| 2002 | 17.4 | 4.2 | 51.7 | 139.3 | 98.1 | 86.3 | 21.3 | 24.6 | 47.7 | 68.8 | 36.8 | 56.1 | 652.3 |
| 2003 | 24.6 | 18.7 | 49.2 | 96.0 | 14.9 | 39.8 | 36.8 | 17.4 | 48.8 | 90.2 | 84.5 | 40.9 | 561.8 |
| 2004 | 6.9 | 70.9 | 47.8 | 149.3 | 97.1 | 69.6 | 46.5 | 37.5 | 53.0 | 72.0 | 64.0 | 31.0 | 745.6 |
| SUMA | 586.9 | 831.8 | 2169.9 | 2169.9 | 2228.2 | 1366.3 | 1048.6 | 1088.7 | 1531.1 | 2097.7 | 1867.5 | 885.0 | 17871.6 |
| PROM. | 20.2 | 28.7 | 74.8 | 74.8 | 76.8 | 47.1 | 36.2 | 37.5 | 52.8 | 72.3 | 64.4 | 30.5 | 616.3 |
| % | 3.3 | 4.7 | 12.1 | 12.1 | 12.5 | 7.6 | 5.9 | 6.1 | 8.6 | 11.7 | 10.4 | 5.0 | |

**Tabla 4-2 Valores medios mensuales multianuales de variables climatológicas**

| | ENE | FEB | MAR | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperatura (°C) | 12 | 12 | 13 | 1\|3 | 13 | 12 | 11 | 12 | 12 | 13 | 13 | 12 |

| | ENE | FEB | MAR | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| .Humedad Relativa, (%) | 69 | 70 | 73 | 73 | 77 | 75 | 78 | 75 | 71 | 71 | 73 | 72 |
| Brillo Solar | 194 | 149 | 148 | 131 | 128 | 144 | 129 | 157 | 156 | 148 | 134 | 183 |
| Relación del número de horas de luz en el día | 0.98 | 0.91 | 1.02 | 1.00 | 1.04 | 1.01 | 1.04 | 1.04 | 0.99 | 1.01 | 0.95 | 0.98 |
| Evapotranspiración Potencial | 63 | 57 | 62 | 61 | 54 | 53 | 44 | 54 | 60 | 66 | 58 | 57 |

## 4.2 HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA

Los análisis hidrológicos se encaminaron a determinar los valores de escorrentía para diferentes períodos de recurrencia en el área bajo estudio adyacente al proceso de erosión de la ladera y a la definición de caudales de diferente período de recurrencia para la quebrada Zanjón de la Candelaria, la cual limita el área de estudio en su extremo norte (Ver Figura 4-3).

Para efectos de la determinación de los caudales de una y otra área se emplearon las curvas de Intensidad Duración Frecuencia desarrolladas por la EAAB-ESP para la zona.

Esta selección se llevó a cabo teniendo en cuenta que para efectos de determinación de los valores de escorrentía, dada la magnitud de la cuenca y del área adyacente al talud afectado por la erosión los tiempos de concentración correspondientes son de tan sólo unos pocos minutos, como se aprecia en las memorias de cálculo (Ver ANEXO D).

El tiempo de concentración, $T_c$, de la cuenca de la quebrada se determinó mediante la fórmula desarrollada por el US Corps of Engineers:

$$T_c = 0.3\left(L \diagup S^{0.25}\right)^{0.76}$$

Donde:

L es la longitud de la corriente en Km y S la pendiente de la corriente.

El tiempo de concentración calculado para la cuenca de la quebrada hasta el sitio del problema resultó de 25 minutos.

La ecuación de las curvas IDF utilizadas es de la forma:

$$I = C_1 \left(Duración + X_0\right)^{C2}$$

**Figura 4-3 Cuenca de la quebrada Zanjón de la candelaria (Tomado de UPES, 1999)**

De la aplicación de la anterior expresión se obtuvieron los valores de intensidad en mm/hr que se presentan en la Tabla 4-3.

**Tabla 4-3 Valores de intensidad para diferentes periodos de retorno**

| $T_R$ ( Años) | $C_1$ | $X_o$ | $C_2$ | I (mm/hr) |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 2857.4 | 23.0 | - 1.07 | 45.4 |
| 25 | 4113.4 | 20.9 | - 1.08 | 66.0 |
| 50 | 4651.4 | 20.4 | - 1.08 | 75.5 |
| 100 | 5465.1 | 20.5 | - 1.10 | 82.0 |

Dado que no fue posible determinar la distribución temporal de los aguaceros, ante la carencia de pluviogramas, se optó por obtener los caudales de la quebrada mediante el empleo de la fórmula Racional y a manera de comprobación, mediante la metodología del SCS de USA, para lo cual, dadas las condiciones de tipo de suelo y cubrimiento vegetal del suelo de la cuenca y para condiciones de alta humedad antecedente, se seleccionó la Curva No 85.

Del empleo del primer método se obtuvieron los valores que se muestran en la Tabla 4-4, y empleando un coeficiente de escorrentía del 60%:

**Tabla 4-4 Caudales obtenidos empleando el método racional**

| $T_R$ ( Años) | Q ($m^3/s$) |
|---|---|
| 5 | 2.25 |
| 25 | 3.27 |
| 50 | 3.74 |
| 100 | 4.06 |

Con el método del SCS se obtuvieron los valores que se presentan en la Tabla 4-5:

**Tabla 4-5 Caudales obtenidos empleando el método del SCS**

| $T_R$ ( Años) | Q ($m^3/s$) |
|---|---|
| 5 | 2.01 |
| 25 | 3.27 |
| 50 | 4.02 |
| 100 | 4.53 |

Como se puede apreciar, los valores son similares.

Para el área adyacente al proceso de erosión en la ladera, se obtuvo un caudal, al final de la misma, en el sentido de la pendiente, de 19 l/s.

Los análisis hidráulicos se circunscribieron a adelantar la revisión de las redes de drenaje artificial existentes en el área.

Puesto que existen redes de drenaje de aguas lluvias y de aguas servidas, no se consideró necesario profundizar en el estudio de sistemas de drenaje para el área.

Los planos de las redes de acueducto y alcantarillado se presentan el ANEXO D, y los cuales fueron suministrados por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB-ESP.

De la inspección realizada a los pozos de inspección de alcantarillado existentes, se puede deducir, que en términos generales, presentan un buen funcionamiento de las redes. Sin embargo, en el pozo A4 se pudo apreciar que existen filtraciones hacia el talud, además de estar tapado por basura y tierra, por lo que es necesario reparar el pozo, como una medida de mitigación de los procesos erosivos. La localización de los pozos y su nomenclatura se presenta en la Figura 4-4 y los esquemas de inspección de los mismos se incluyen en **ANEXO D**.

## 4.3 HIDROGEOLOGÍA

Los afloramientos correspondientes a los escarpes, producto de las antiguas explotaciones mineras se observaron totalmente secos (aunque es importante anotar que la campaña de campo se realizó en época seca); en el mismo sentido, no se presentó nivel freático en las perforaciones llevadas a cabo en la parte alta, lo que podría indicar que los niveles freáticos se encuentran muy por debajo de la superficie. Sin embargo, en la parte baja, se observan afloramientos de agua en la interfase coluvión – roca, así como humedad en la parte central de la zona plana. Se concluye que en la ladera objeto de estudio, los niveles freáticos se encuentran muy por debajo de la superficie y que no deben incidir en las condiciones de estabilidad del terreno.

## 4.4 SISMOLOGÍA

De acuerdo con la "Microzonificación Sísmica de Santa Fé de Bogotá", el Barrio Villas de Bolívar se localiza en la Zona 1 que corresponden a la Zona de Cerros. Para efectos de evaluar estabilidad de los taludes se recomienda emplear una aceleración horizontal máxima de $A_{Hmáx}$ = 0.24g.

**Figura 4-4 Pozos de inspección de alcantarillado**

## ANEXO A TOPOGRAFÍA

## ANEXO B
## GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA

## ANEXO C
## GEOTECNIA

## ANEXO D
## HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

# 5. COBERTURA VEGETAL Y USOS DEL SUELO

El uso del suelo y de la cobertura vegetal en una región es el resultado de las características del medio físico (clima, suelo), de la estructura agraria (tendencia de la tierra) y de las actividades económicas. Esto determina que el uso del suelo se constituya en un factor importante en la inestabilidad del terreno.

La cobertura vegetal, en general, constituye un papel fundamental en las condiciones de estabilidad, particularmente en lo referente al control de erosión (interceptación, retención, retardo, infiltración, transpiración), y contribuye a prevenir movimientos en masa (deslizamientos superficiales). Además, la cobertura vegetal juega un papel fundamental en la calidad de vida de los habitantes, pues el manejo sostenible de la cobertura vegetal garantiza la calidad del suelo, agua y aire, entre otros.

Con base en el reconocimiento, fotointerpretación y criterio, en la identificación de la cobertura vegetal y uso actual del suelo, se obtuvo las diferentes categorías de clasificación que se presentan en los siguientes numerales y se muestran en la Figura 5-1.

## 5.1 ÁREAS URBANAS CONSOLIDADAS (ZUP)

Constituye aquellas áreas cien por ciento urbanizadas (construcciones y vías).

## 5.2 ÁREAS URBANAS SIN PAVIMENTAR (ZUSP)

Constituye zonas suburbanas, no pavimentadas, adecuadas con material de relleno.

## 5.3 PASTOS O VEGETACIÓN HERBÁCEA (PN)

Áreas cubiertas por partes naturales. Los pastos hace referencia a la cobertura vegetal caracterizada por vegetación baja (menos de un metro de altura), compuesta por hierbas y gramíneas especialmente.

## 5.4 ERIALES (E)

Corresponde a las áreas de canteras y afloramientos de roca, desprovistos de vegetación, con diferentes grados de erosión. Presentan limitaciones para el crecimiento de la vegetación u otro tipo de cobertura.

**Figura 5-1 Cobertura vegetal y usos del suelo**

# 6. EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO, PRUEBAS DE CAMPO Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Para determinar las características y propiedades mecánicas del subsuelo, en el presente estudio se adelantan una serie de actividades de exploración del subsuelo consistente en perforaciones mecánicas, trincheras, apiques, exploración geofísica y ensayos de laboratorio. En este numeral se describen los resultados alcanzados a la fecha de presentación de este informe.

## 6.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

De acuerdo con las condiciones de la zona de estudio, se estableció el plan de exploración presentado en la Figura 6-1 con el objeto de establecer las principales condiciones del subsuelo en relación con la distribución de los materiales y su comportamiento mecánico.

El programa de exploración contempló la ejecución de dos sondeos mecánicos, cinco trincheras, seis apiques, una línea de refracción sísmica y tres sondeos eléctricos verticales distribuidos en toda el área de estudio.

### 6.1.1 Sondeos Mecánicos, Apiques y Trincheras

Se contempló la ejecución de 2 sondeos con profundidad de 10 y 11m, durante los cuales se recuperaron muestras de los materiales encontrados, que permiten su identificación y la caracterización detallada en el laboratorio. Adicionalmente, se ejecutaran pruebas de campo como el ensayo de penetración estándar con el fin de establecer ordenes de magnitud de la resistencia de los materiales. Además se programaron 5 trincheras y 6 apiques para la inspección de taludes y la toma de muestras.

La distribución de los sondeos mecánicos fue de esta manera: el primero (S-1) se realizó a 70 m de suroccidente de la corona del escarpe de explotación abandonado y sobre la carrera 30; y el segundo sondeo (S-2) a en la intersección transversal 30 con diagonal 68 sur. La ubicación de los sondeos, apiques y trincheras se muestra en la Figura 6-1.

De la Figura 6-2 a la Figura 6-14 presentan los resúmenes gráficos de los registros de cada una de las perforaciones, apiques y trincheras realizadas.

En el sondeo S-1, antes de 1.25m se encuentra un relleno antrópico compuesto por desechos de construcción, gravas, arenas y una fracción fina de baja plasticidad; luego y hasta 5.50m de profundidad se presenta una arcilla de color habano (suelo residual), con oxidaciones de tonos rojizos y rastros de arena, de humedad media, plasticidad media y consistencia firme a dura; finalmente hasta la longitud explorada se encuentran intercalaciones de arenisca y arcillolita, pertenecientes a la conjunto medio de la Formación Guaduas. La arenisca se encuentra muy fracturada en bloques de forma angular a subangular, de tamaños entre 2cm y 12cm, de grano medio a grueso, algo friable y/o fracturada; mientras que la arcillolita es de color gris amarillo humedad media, plasticidad media a alta y consistencia muy firme.

En el sondeo S-2, hasta 0.80m de profundidad se encuentra un relleno antrópico y luego hasta 11.0m se hallan las intercalaciones de arenisca y arcillolita, que fueron detectadas en el sondeo S-1.

### 6.1.2 Líneas Geosísmicas

Adicionalmente, con el fin de complementar la información geotécnica del subsuelo obtenida por métodos de exploración directos, se realizó una línea de exploración geosísmica de refracción. Con exploración se buscó determinar la profundidad de roca y las velocidades de ondas de compresión [$v_p$] de los estratos que conforman el subsuelo.

Luego de la definición y localización en campo de la línea se procedió a la adquisición de datos y posteriormente a la interpretación en la oficina. La adquisición de datos se realizó empleando un sismógrafo marca Geometrics de 12 canales computarizado; geófonos; cables y demás accesorios necesarios. El equipo cuenta con software de recepción de datos, control de calidad e interpretación, por lo que la información es almacenada en medio digital.

La línea de refracción de 110m de longitud se realizó con separación de geófonos de 10m. En la Figura 6-1 se muestra la localización de esta línea de exploración, así como los demás sitios explorados en el presente estudio.

Para la línea de refracción sísmica (o spread) el sistema de activación fue con golpes con martillo sobre una platina metálica y se hizo el proceso de generación de ondas en cuatro puntos (denominados shotpoint) y cada registro tiene los tiempos de llegada de los doce geófonos.

La interpretación se hizo empleando el software SIP (Seismic Interpretation Programs) que cuenta con varios programas para aplicaciones específicas dentro del proceso de interpretación (Rimrock Geophysics, 1995). El método que utiliza el programa es conocido como “Delay Times” ó tiempos de retraso, el cual tiene las siguientes fases de interpretación:

- Tiempos de llegada de las ondas: Estos tiempos se definen con el empleo del programa SIPIK de una manera semiautomática, marcando los tiempos de llegada de las ondas.
- Entrada de datos y creación de archivos: Corresponde al proceso de generación de lo archivos de cada línea sísmica o spread, la cual se compone de cuatro registros correspondientes a cada shotpoint y cada registro tiene los tiempos de llegada de los doce geófonos. El programa utilizado en este proceso se llama SIPIN.
- Tiempos de retraso: Se asignan en forma semiautomática las capas a las que pertenece cada lectura de tiempos de llegada reuniendo los resultados en la gráfica Tiempo-Distancia. En este proceso, el programa estima las velocidades, espesores y profundidades de las capas.
- Revisión: Usualmente es necesario calcular de manera iterativa cada línea sísmica hasta obtener velocidades similares para cada capa. Es de notar, que entre mayor sea la complejidad de los perfiles estratigráficos mayor será el número de iteraciones. Adicionalmente, para este proceso se realiza la consulta de información geológica y

geotécnica con el fin de establecer correlaciones entre velocidades, espesores y materiales.

- Interpretación final: Luego de obtener un modelo matemáticamente satisfactorio en el proceso anterior, nuevamente se realiza una comparación con la información litológica y estructural; y con los registros de perforación cercanos a cada línea. En esta etapa normalmente es necesario reinterpretar y ajustar los modelos previamente definidos.

En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el perfil promedio obtenido a partir de la exploración con la línea exploración geosísmica, en la cual se definieron 3 materiales. En la Tabla 6-1 se presenta un resumen de los rangos de velocidades y espesores obtenidos para cada capa. En general, los resultados muestran que la velocidad aumenta con la profundidad, siendo la capa 3 la correspondiente a la roca, con velocidades mayores a 3000m/s.

**Tabla 6-1 Velocidades y espesores de las capas obtenidos en la exploración geofísica**

| Línea de refracción | | Velocidad, $v_p$ [m/s] | Espesor [m] |
|---|---|---|---|
| LRfra-1 | Capa 1 | 301 | 0.1 – 3.0 |
| | Capa 2 | 926 | 10.0 – 19.0 |
| | Capa 3 | 3357 | - |

La capa 1 que tiene una velocidad compresional de 301m/s, correspondiente a un relleno con espesores muy variables ya que tiene entre 10 centímetros y 3 metros. Para la capa 2, la velocidad aumenta a 926m/s y llega hasta profundidades variables entre 10 y 19 metros, normalmente esta velocidad representa una roca muy fracturada. Finalmente, la capa 3, corresponde al basamento y la velocidad hallada de 3357 m/s es representativa de una roca relativamente sana, tipo arenisca con intercalaciones de arcillositas, pertenecientes a la Formación Guaduas.

### 6.1.3 Sondeos Eléctricos Verticales

Para evaluar las condiciones del agua del subsuelo y determinar la resistividad de los materiales presentes en el subsuelo se ejecutaron 3 sondeos eléctricos verticales.

Dichos sondeos eléctricos verticales se realizaron con una configuración tipo Schlumberger:, en la cual los dos electrodos de corriente (electrodos externos) se mueven alejándose del centro de medida, alcanzando cada vez una mayor profundidad de investigación, mientras que los electrodos de potencial (electrodos internos) permanecen fijos, cerca del centro de medida o estación. La profundidad mínima explorada en los SEV fue de 100m, es decir, que la separación mínima entre los electrodos externos fue de 200m. En la Figura 6-1 se muestra la localización de cada uno de los SEV.

El proceso de ejecución de cada SEV contempló las siguientes actividades: toma de datos en campo; cálculo y dibujo de las curvas de campo; utilización del software de

interpretación y generación de modelos; comparación con la geología local; reinterpretación e interpretación final.

Para realizar los SEV se utilizó un equipo tipo ABEM Terrameter modelo 300C de fabricación Sueca con sus accesorios. El software interpretativo empleado fue: "Programs for the Automatic Processing and interpretation of Schulumberger Soundings", el cual se desarrolló en el U.S. Geological Survey por A. R. Zohdy y R. J. Bisdorf.

Las mediciones efectuadas se encuentran en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en dos hojas (para cada sondeo) denomindas: "FIELD DATA" y "INTERPRETATION". La primera es la curva de campo y la segunda contiene la interpretación de los datos de campo.

En la primera hoja la gráfica muestra resistividades de campo contra distancias electródicas en escalas logarítmicas y puede observarse que la calidad de las curvas es buena en todos los sondeos con algunas pequeñas anomalías normales en estas investigaciones.

La segunda hoja muestra la misma curva de campo con la interpretación realizada y ajustada después de la calibración con la exploración con métodos directos, en dos columnas que contienen la profundidad de la capa en metros (DEPTH) y resistividad eléctrica en Ohm-m (RESIS).

La interpretación de los sondeos que se describe a continuación corresponde a modelos simplificados, los cuales incluyen los grupos principales de capas y no una descripción tan detallada como la que calcula el modelo, la cual proviene de buscar el mejor ajuste matemático posible.

#### 6.1.3.1 Sondeo Eléctrico SEV-1

Muestra cuatro conjuntos principales de capas distribuidas de la siguiente manera de superficie a fondo:

- Conjunto 1: Tiene un espesor de 1 metro y una resistividad de 23.77 Ohm-m y corresponde a la capa superficial del terreno (relleno).
- Conjunto 2: Está localizado entre 1 y 3 metros aproximadamente y tienen resistividades del orden de 6 a 9 Ohm-m, valor que sugiere predominio de materiales arcillosos.
- Conjunto 3: Se ubica entre 3 y 14 metros aproximadamente y tiene una resistividad de 30 a 45 Ohm-m. Este valor es correlacionable con capas o estratos de areniscas.
- Conjunto 4: Corresponde al basamento y se encuentra a partir de los 14 metros y hasta por lo menos 30 metros. Su resistividad es de 4 Ohm-m lo cual indica la presencia de arcillas o arcillolitas saturadas.

#### 6.1.3.2 Sondeo Eléctrico 2

Auque muestra varias capas, esencialmente tiene dos conjuntos principales.

- Conjunto 1: Tiene la capa superficial mencionada en el sondeo anterior de 1 metro aproximadamente de espesor, pero en este caso tiene una resistividad alta, de 390 Ohm-m. Este valor se debe a la poca saturación y además porque se encuentra areniscas cerca. Este conjunto llega hasta unos 20 metros de profundidad y las resistividades son en general altas correlacionables con areniscas.
- Conjunto 2: A partir de los 20 metros, los valores de resistividad caen a 7 Ohm-m valor similar al basamento encontrado en la curva 1, y correlacionable con arcillas o arcillolitas saturadas.

#### 6.1.3.3 Sondeo Eléctrico 3

Esta curva presenta un subsuelo compuesto por tres conjuntos principales de capas.

- Conjunto 1: Es nuevamente la zona superficial con resistividad de 57 Ohm-m y llega hasta 2.26 metros, haciendo la salvedad que entre 1 y 2.26 la resistividad aumenta de 57 Ohm- a 80 Ohm-m aproximadamente.
- Conjunto 2: A partir de los 2.26 m de profundidad y hasta 7 metros aproximadamente la resistividad es menor y baja hasta 15 Ohm-m aproximadamente, valor correlacionable con un subsuelo con intercalaciones de arcillas y arenas, correspondientes a los materiales de la terraza alta de la Formación Sabana.
- Conjunto 3: El basamento encontrado tiene una resistividad de 300 Ohm- correlacionable con areniscas. Este basamento se encuentra entre 7 metros de profundidad y al menos 30 metros.

### 6.1.4 Pruebas de campo

Durante la ejecución de los sondeos se realizaron ensayos in-situ de penetración estándar (SPT) con el fin de obtener estimaciones de la resistencia al corte de los suelos encontrados, los cuales consistían principalmente en suelos finos de consistencia firme a dura. Para cada una de las muestras extraídas por mecanismos de rotación (roca), se determinó el porcentaje de recobro y el RQD (Rock Quality Designation).

Adicionalmente, se realizaron ensayos de percolación (permeabilidad in situ) siguiendo las recomendaciones del método desarrollado por González (1987); con el cual se puede estimar de manera aproximada el valor de la permeabilidad de un suelo que se encuentra por encima del nivel freático y con menos del 100% de saturación. Estos ensayos se realizaron, con el fin de estimar el grado de permeabilidad de los materiales que afloran en el escarpe principal.

#### 6.1.4.1 Ensayos de penetración estándar

Los resultados de la prueba se muestran de manera gráfica para el sondeo S-1 en la Figura 6-2 y numérica en la Tabla 6-2. Adicionalmente, en la Tabla 6-4 se presenta la normalización del ensayo.

**Tabla 6-2 Resultados obtenidos en el ensayo de penetración estándar, SPT**

| Sondeo | Muestra | Profundidad | | 6" | 12" | 18" | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Inicial | Final | | | | |
| S-1 | 2 | 0.70 | 1.15 | 16 | 16 | 10 | 26 |
| S-1 | 3 | 1.15 | 1.60 | 12 | 15 | 10 | 25 |
| S-1 | 4 | 1.60 | 2.05 | 3 | 3 | 6 | 9 |
| S-1 | 5 | 2.05 | 2.50 | 8 | 9 | 12 | 21 |
| S-1 | 6 | 2.50 | 2.95 | 9 | 16 | 23 | 39 |

### 6.1.4.2 RQD y porcentaje de recobro

El registro de los porcentajes de RQD y de recobro se muestran de manera numérica en la Tabla 6-3.

**Tabla 6-3 Porcentajes de recobro y RQD**

| Sondeo | Muestra | Profundidad | | Longitud de muestra recuperada [m] | Longitud de fragmentos > 10cm [m] | Longitud perforada [m] | Recobro [%] | RQD [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Inicial [m] | Final [m] | | | | | |
| S-1 | 7 | 2.95 | 4.00 | 0.60 | 0.10 | 1.05 | 57% | 10% |
| S-1 | 8 | 4.00 | 4.70 | 0.30 | 0.00 | 0.70 | 43% | 0% |
| S-1 | 9 | 4.70 | 5.90 | 1.15 | 0.59 | 1.20 | 96% | 49% |
| S-1 | 10 | 5.90 | 7.40 | 0.55 | 0.00 | 1.50 | 37% | 0% |
| S-1 | 11 | 7.40 | 8.60 | 0.53 | 0.00 | 1.20 | 44% | 0% |
| S-1 | 12 | 8.60 | 10.00 | 0.54 | 0.00 | 1.40 | 39% | 0% |
| S-2 | 1 | 0.00 | 0.80 | 0.00 | 0.00 | 0.80 | 0% | 0% |
| S-2 | 2 | 0.80 | 1.90 | 0.22 | 0.00 | 1.10 | 20% | 0% |
| S-2 | 3 | 1.90 | 3.00 | 0.35 | 0.00 | 1.10 | 32% | 0% |
| S-2 | 4 | 3.00 | 3.90 | 0.42 | 0.15 | 0.90 | 47% | 17% |
| S-2 | 5 | 3.90 | 4.90 | 0.74 | 0.31 | 1.00 | 74% | 31% |
| S-2 | 6 | 4.90 | 5.30 | 0.40 | 0.16 | 0.40 | 100% | 40% |
| S-2 | 7 | 5.30 | 5.80 | 0.40 | 0.24 | 0.50 | 80% | 48% |
| S-2 | 8 | 5.80 | 7.00 | 1.02 | 0.00 | 1.20 | 85% | 0% |
| S-2 | 9 | 7.00 | 8.10 | 1.08 | 0.50 | 1.10 | 98% | 45% |
| S-2 | 10 | 8.10 | 8.50 | 0.31 | 0.00 | 0.40 | 78% | 0% |
| S-2 | 11 | 8.50 | 9.80 | 0.34 | 0.00 | 1.30 | 26% | 0% |
| S-2 | 12 | 9.80 | 11.00 | 0.28 | 0.00 | 1.20 | 23% | 0% |

## Tabla 6-4 Normalización del ensayo de penetración estándar, SPT

| Sondeo | Muestra | Profundidad (m) | | | golpes/pie | | | $N_{45}$ | NF | Tipo | $\gamma$ | $\sigma_v$ (Ton/m²) | $\sigma_v'$ (Ton/m²) | Rs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | de | a | media | 1 | 2 | 3 | | | | | | | |
| S-1 | 2 | 0.70 | 1.15 | 0.925 | 16 | 16 | 10 | 26 | 2.3 | 1 | 1.80 | 1.67 | 1.67 | 0.17 |
| S-1 | 3 | 1.15 | 1.60 | 1.375 | 12 | 15 | 10 | 25 | 2.3 | 2 | 2.11 | 2.51 | 2.51 | 0.25 |
| S-1 | 4 | 1.60 | 2.05 | 1.825 | 3 | 3 | 6 | 9 | 2.3 | 2 | 2.11 | 3.46 | 3.46 | 0.35 |
| S-1 | 5 | 2.05 | 2.50 | 2.275 | 8 | 9 | 12 | 21 | 2.3 | 2 | 2.11 | 4.41 | 4.41 | 0.44 |
| S-1 | 6 | 2.50 | 2.95 | 2.725 | 9 | 16 | 23 | 39 | 2.3 | 2 | 2.11 | 5.36 | 4.94 | 0.49 |

| $C_N$ | | | | | | | | $C_N$ (prom) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Peck | Seed | Meyerhoff-Ishihara | Liao-Whitman | Skemp-ton | Seed-Idriss | Schmert mann | Gonzá-lez | |
| 1.598 | 1.973 | 1.962 | 2.000 | 1.715 | 2.000 | 2.000 | 1.779 | 1.878 |
| 1.461 | 1.750 | 1.787 | 1.995 | 1.598 | 1.846 | 2.000 | 1.600 | 1.754 |
| 1.354 | 1.576 | 1.625 | 1.699 | 1.486 | 1.649 | 1.886 | 1.461 | 1.592 |
| 1.273 | 1.444 | 1.490 | 1.505 | 1.388 | 1.501 | 1.696 | 1.355 | 1.457 |
| 1.236 | 1.383 | 1.424 | 1.423 | 1.339 | 1.432 | 1.607 | 1.307 | 1.394 |

| $\eta_1$ | | $\eta_2$ | $\eta_3$ | $\eta_4$ | Ncorr | | $\phi_{equivalente}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| USA | Japón | | | | USA | Japón | Kishida | Schmert mann | JRB | Shiou & Fukui | JNR | Prom |
| 0.75 | 0.63 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 27 | 22 | 36.0 | 43.2 | 33.2 | 34.9 | 33.6 | 34 |
| 0.75 | 0.63 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 24 | 20 | 35.0 | 42.1 | 32.3 | 34.2 | 33.0 | 34 |
| 0.75 | 0.63 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 8 | 6 | 26.0 | 31.8 | 24.5 | 29.2 | 28.8 | 27 |
| 0.75 | 0.63 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 17 | 14 | 31.7 | 38.7 | 29.5 | 32.0 | 31.2 | 31 |
| 0.75 | 0.63 | 0.75 | 1.00 | 1.00 | 30 | 25 | 37.4 | 44.2 | 34.4 | 36.0 | 34.5 | 36 |

**$N_{45}$** Número de golpes para el 45% de energía del martillo (Estimado para Colombia)

**NF** Nivel freático

**$\sigma_v$** Esfuerzo vertical total
**$\sigma_v'$** Esfuerzo vertical efectivo
**Rs** Parámetro utilizado para el $C_N$, $Rs = \sigma_v'/p_a$
**$C_N$** Factor de corrección por confinamiento efectivo
**$\eta_1$** Factor de corrección por energía del martillo: La enería de USA es el 60% y la de Japón el 72%
**$\eta_2$** Factor de corrección por longitud de la varilla
**$\eta_3$** Factor de corrección por revestimiento interno de tomamuestras
**$\eta_4$** Factor de corrección por diámetro de la perforación
**Ncorr** Número de golpes corregido
**$\phi$** Ángulo de fricción interna
**$\sigma_v'$** Esfuerzo vertical efectivo

| MATERIALES | | | |
|---|---|---|---|
| $\gamma_{mat\ 1}$ | 1 | 1.80 | Relleno heterogeneo, compuesto por desechos de construccion, gravas, arena y arcilla; de compacidad media a compacta. |
| $\gamma_{mat\ 2}$ | 2 | 2.11 | Arcilla de color habano amarillo con algo de arena fina, de humedad baja, plasticidad baja y consistencia muy firme. |

### 6.1.5 Ensayos de laboratorio

Sobre las muestras obtenidas de los sondeos ejecutados se realizaron ensayos de clasificación y resistencia al corte. En la Tabla 6-5 se relacionan las cantidades de ensayos realizados.

**Tabla 6-5 Cantidades de ensayos de laboratorio realizados**

| Ensayo de laboratorio | Cantidad |
|---|---|
| Contenido de humedad natural | 7 |
| Gradación | 2 |
| Análisis granulométrico por hidrometría | 1 |
| Límites de consistencia | 7 |
| Peso unitario | 8 |
| Compresión inconfinada (suelo) | 1 |
| Compresión simple (roca) | 1 |
| Esfuerzo de Tracción | 2 |
| Carga puntual | 5 |
| Bloque deslizante | 4 |
| Corte Directo (en condición saturada) | 2 |
| Corte Directo (en condición de humedad natural) | 2 |
| Determinación de cantidad de materia orgánica | 1 |

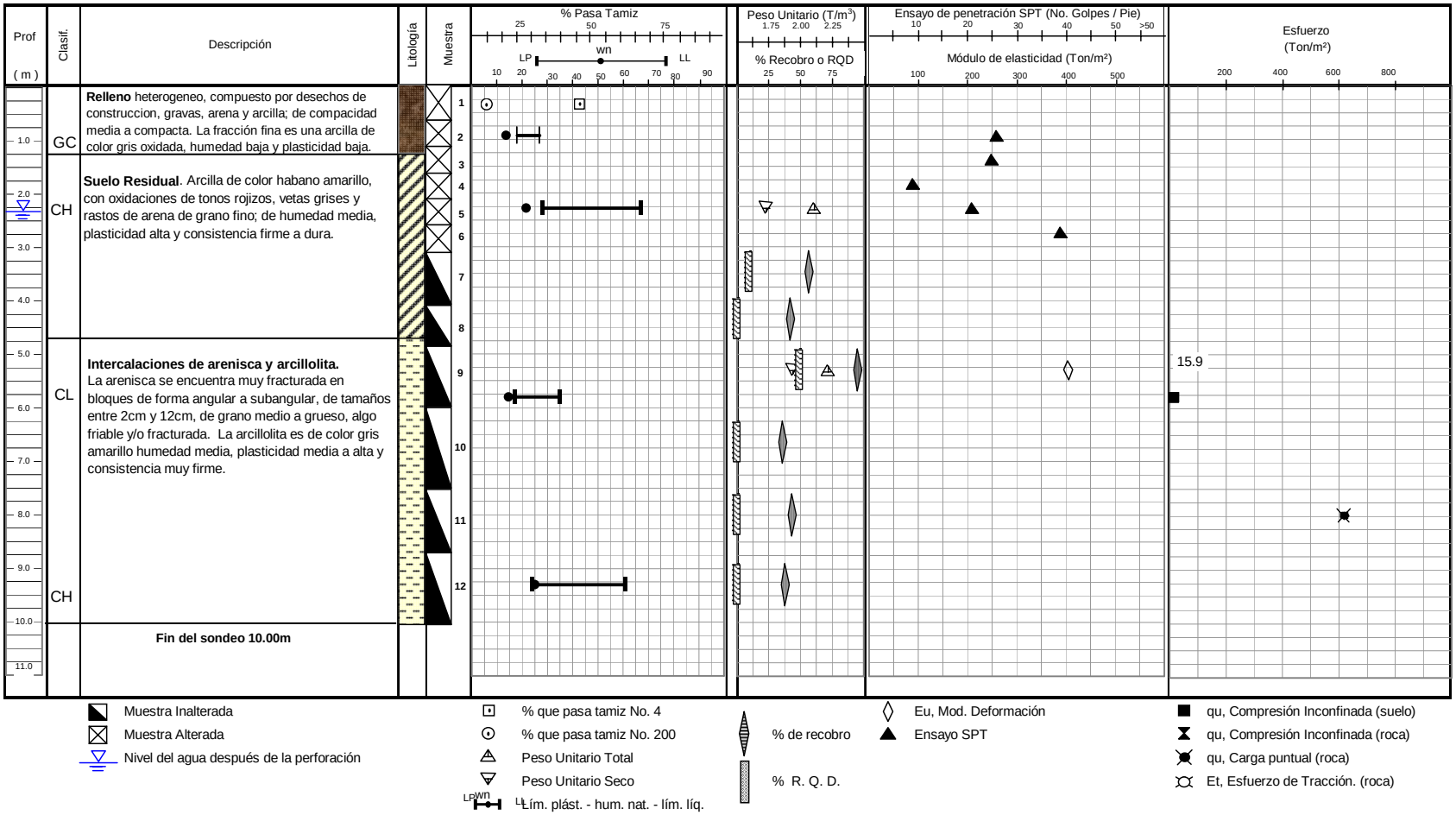
Los resultados de los ensayos de laboratorio muestran en la Tabla 6-6.

**Figura 6-1 Localización de los sitios de exploración del subsuelo**

## Figura 6-2 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Perforación S-1.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **SONDEO No:** S-1

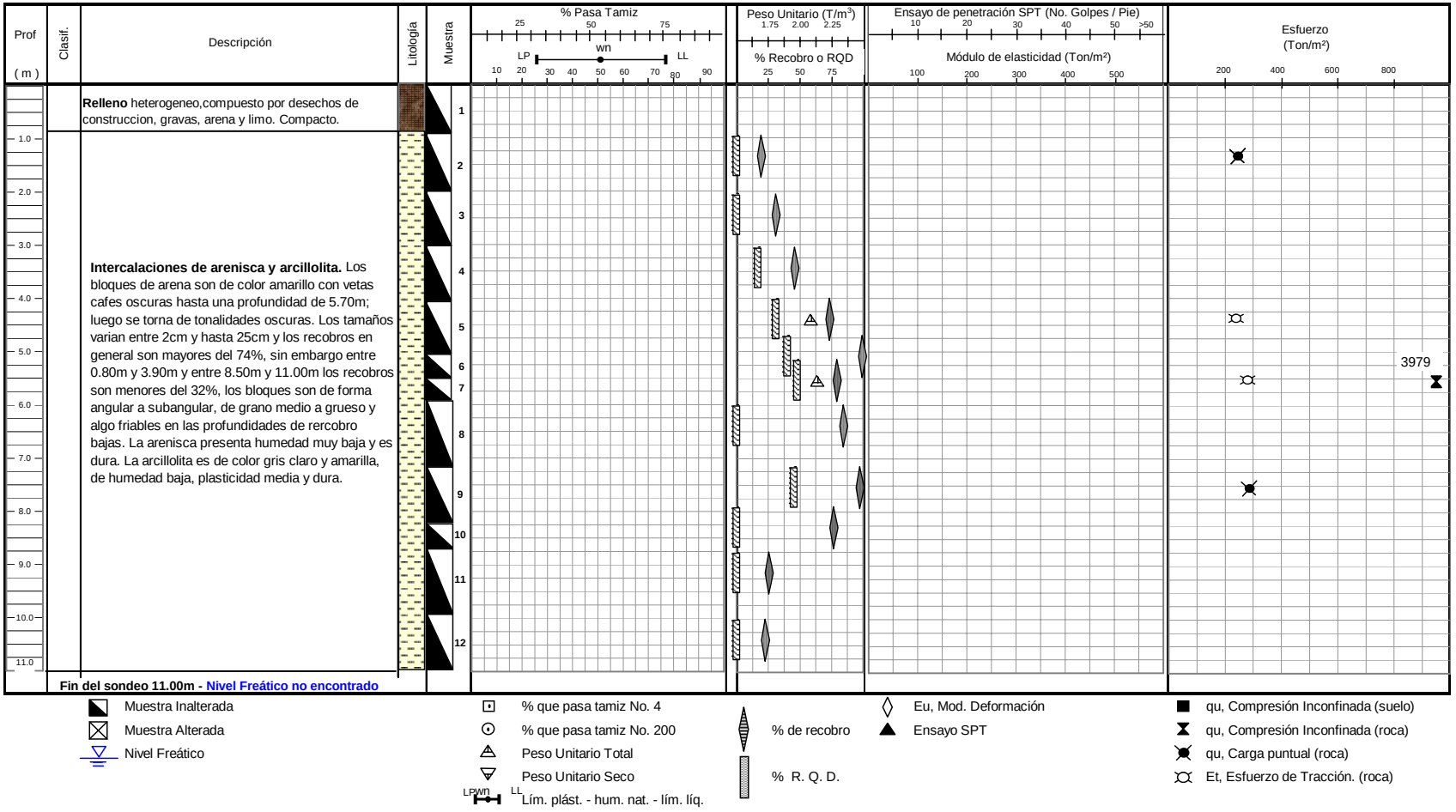
**LOCALIZACIÓN:** CARRERA 31 CON CALLE 68D SUR **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-3 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Perforación S-2

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **SONDEO No:** S-2

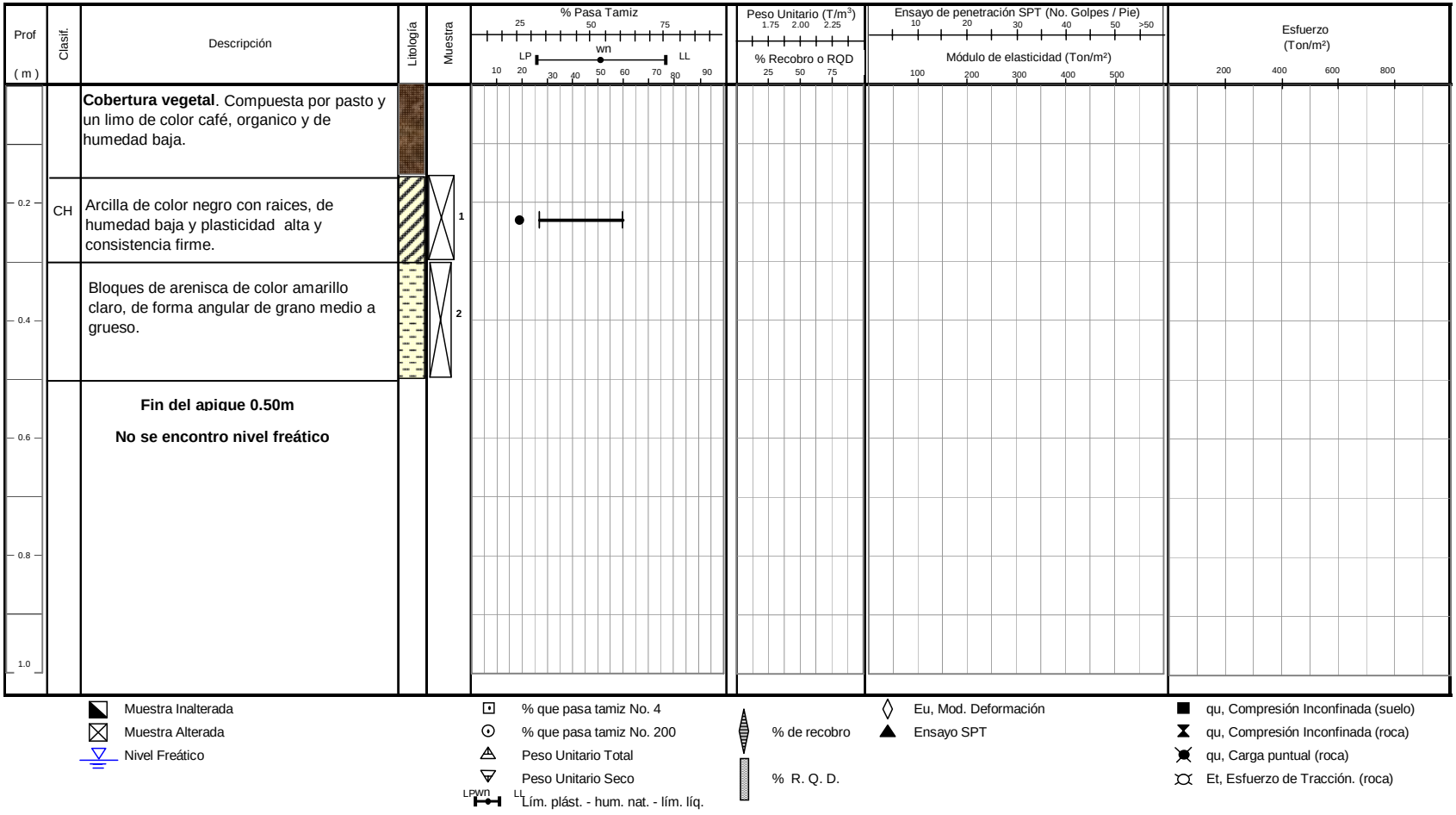
**LOCALIZACIÓN:** TRANSVERSAL 30 CON DIAGONAL 68 SUR **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-4 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-1.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **APIQUE No:** AP-1

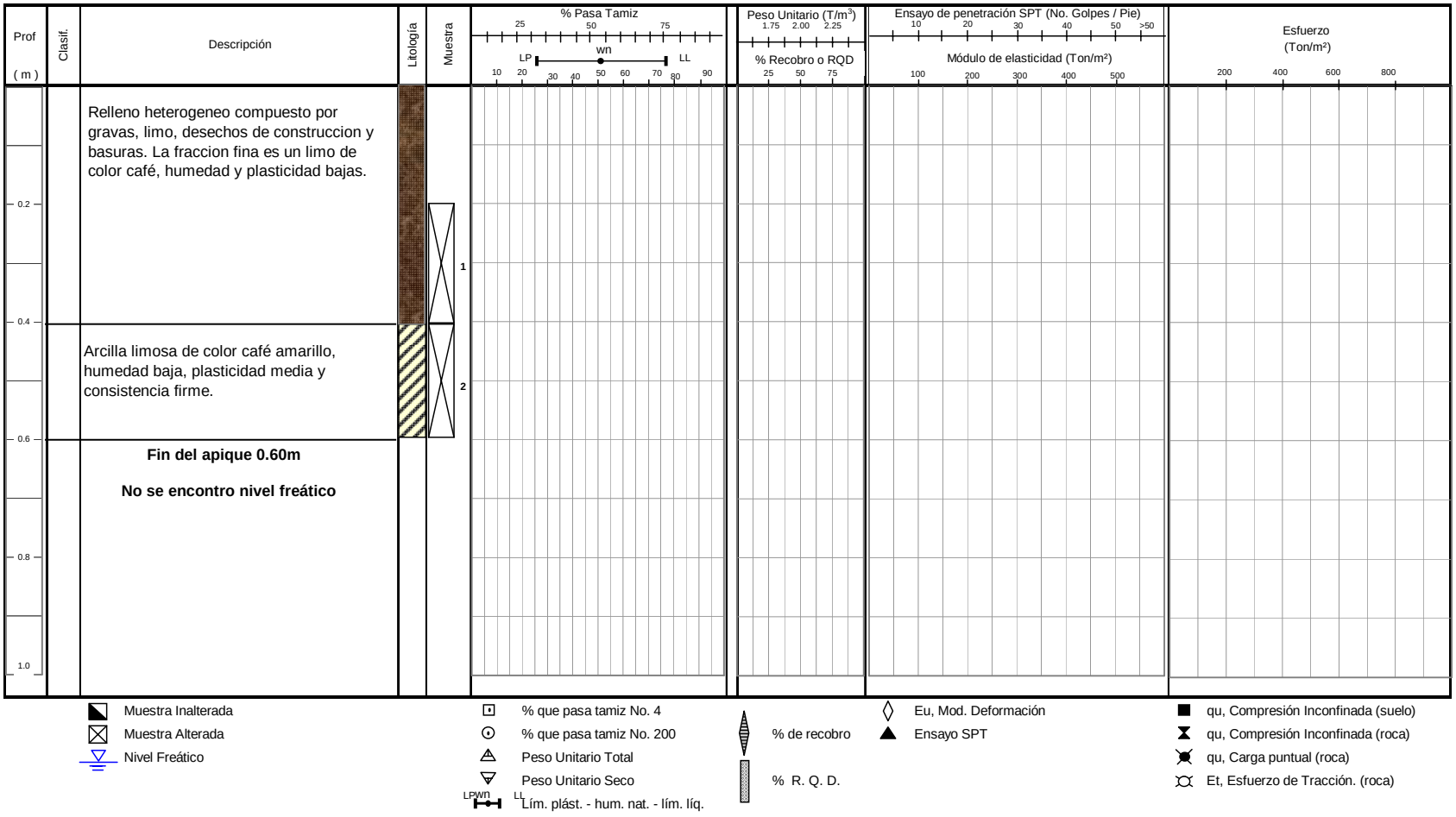
**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORESTE DE LA ZONA DEL PROYECTO. **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-5 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-2.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **APIQUE No:** AP-2

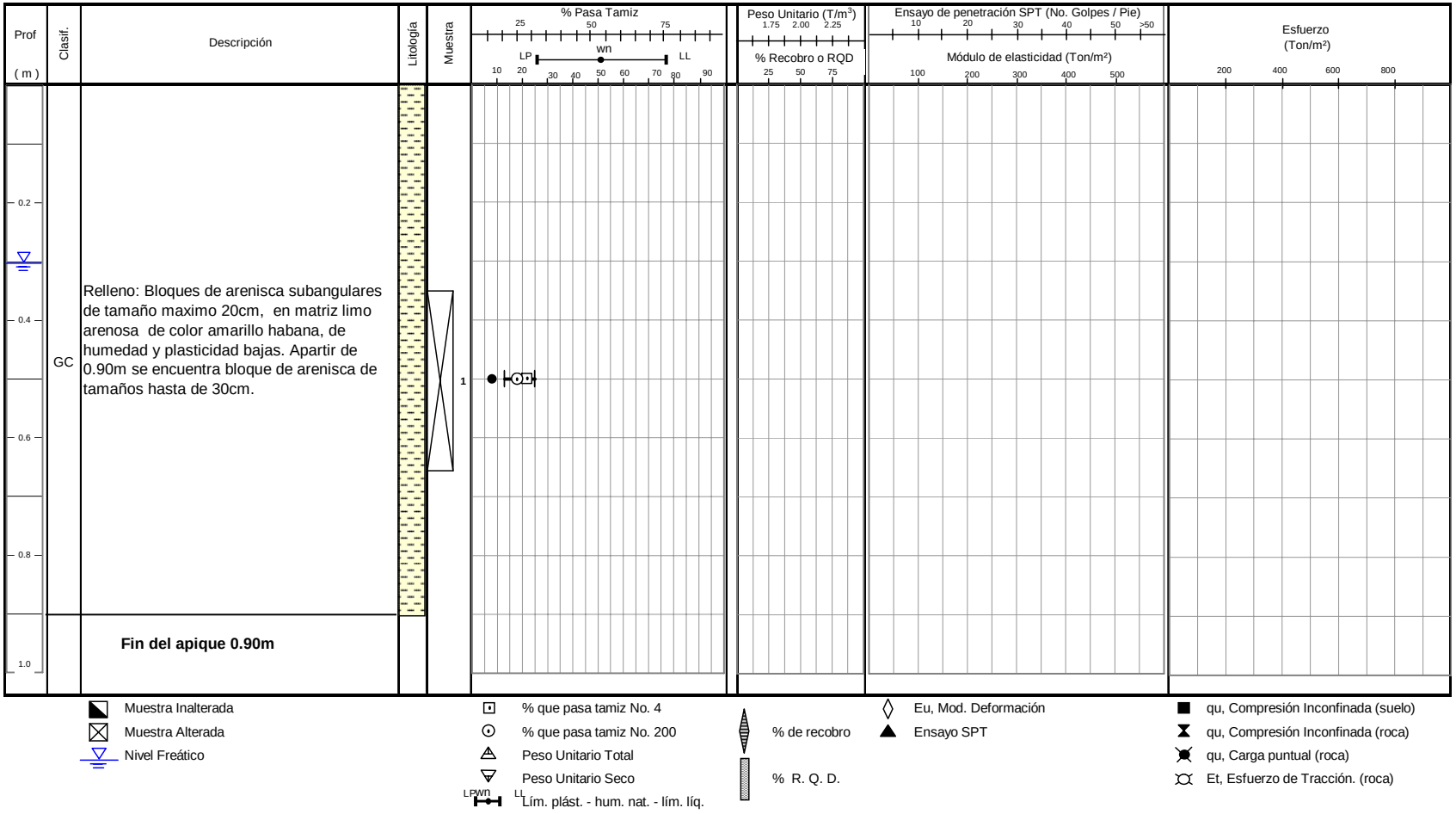
**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORESTE DE LA ZONA DEL PROYECTO. **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-6 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-3.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **APIQUE No:** AP-3

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO ESTE DE LA ZONA DEL PROYECTO. **FECHA:** ENERO DE 2.005



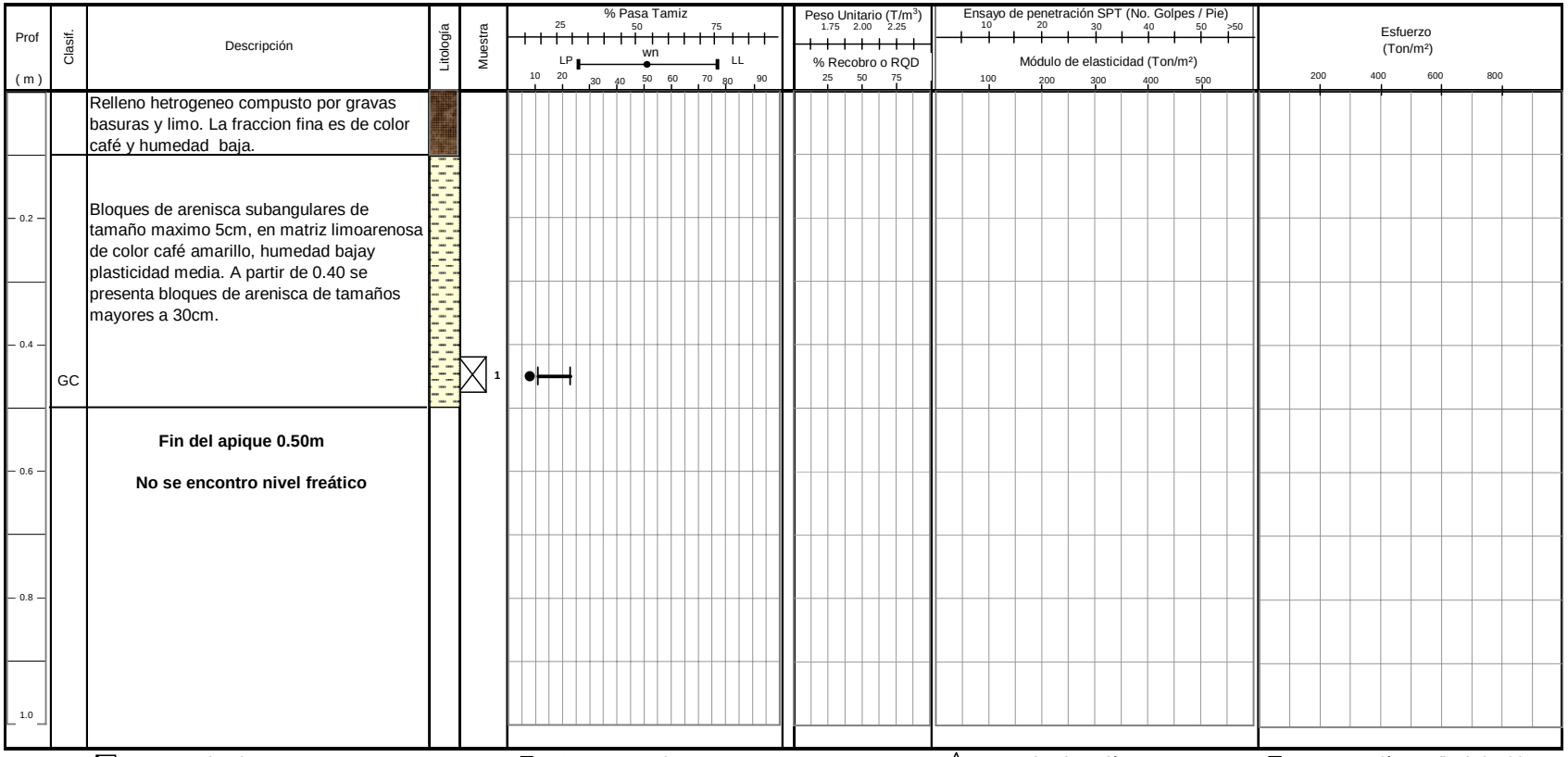
## Figura 6-7 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-4

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C.

**APIQUE No:** AP-4

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO SUR ESTE DE LA ZONA DEL PROYECTO.

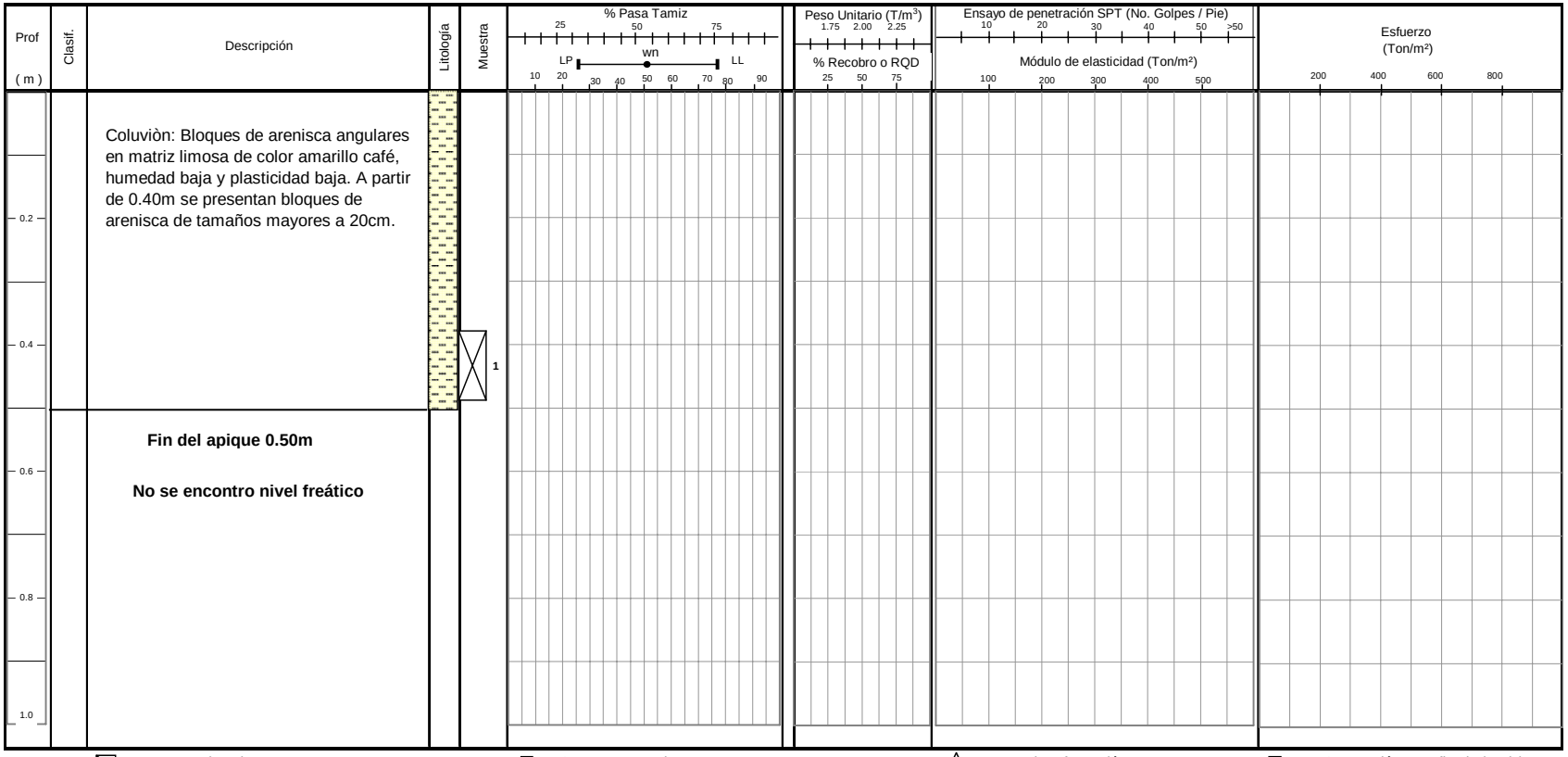
**FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-8 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-5.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **APIQUE No:** AP-5

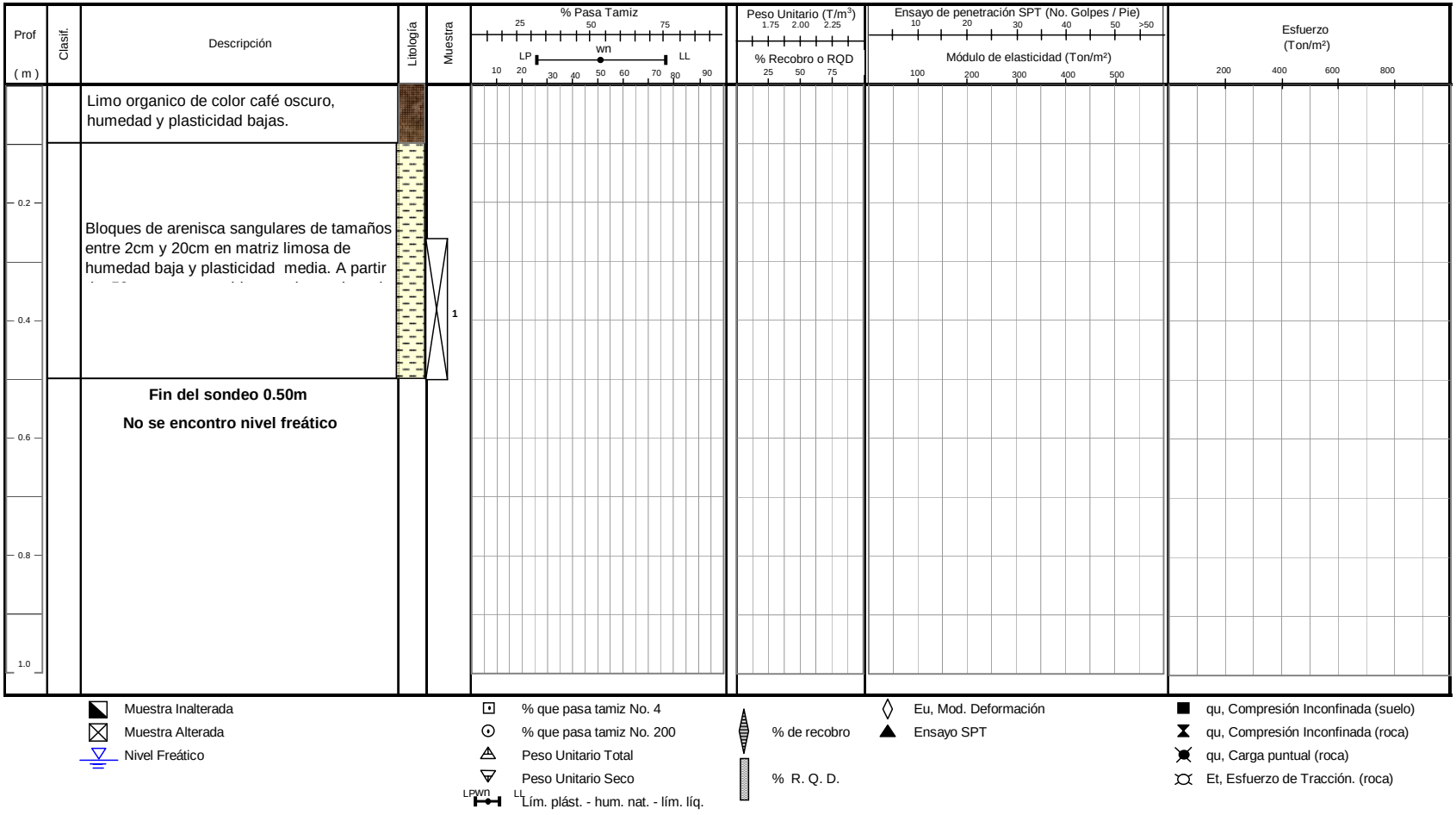
**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NOROCCIDENTAL DE LA ZONA DEL PROYECTO. **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-9 Resumen gráfico de propiedades índices y mecánicas Apique AP-6

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C. **APIQUE No:** AP-6

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORTE DE LA ZONA DEL PROYECTO. **FECHA:** ENERO DE 2.005



## Figura 6-10 Aspecto de la Trinchera TR-1.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORTE DE LA ZONA DEL PROYECTO **FECHA:** FEBRERO DE 2.005

| | Descripción | Aspecto de la Trinchera |
|---|---|---|
| 2.00<br>4.00<br>6.00<br>8.00<br>10.00<br>12.00 | Cobertura vegetal de espesor màximo de 10cm. Luego se encuentra un relleno heterogéneo compuesto por limo orgánico de color café, gravas angulares y basura, con presencia de raices. La fracción fina presenta humedad baja y plasticidad media.<br>El espesor del relleno varía entre 30 y 100cm.<br>Bajo el relleno se encuentran arcillolitas de color gris con intercalaciones capas muy delgadas de arenisca<br>**FIN DE LA TRINCHERA 12 m** |  |

## Figura 6-11 Aspecto de la Trinchera TR-2.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C

**LOCALIZACIÓN:** ESCARPE PRINCIPAL - COSTADO SURESTE **FECHA:** FEBRERO DE 2.005

| | **Descripción** | **Aspecto de la Trinchera** |
|---|---|---|
| 2.5<br>5.0<br>10.0<br>12.5<br>15.0 | Afloramiento de intercalciones de arenisca y arcillolitas en capas de 2 a 10cm de espesor. La arenisca es de color habana amarilla y la arcillolita es de color gris habana con vetas grises y se encuentra muy meteorizada y laminada<br><br>**FIN DE LA TRINCHERA 15 m** |  |

## Figura 6-12 Aspecto de la Trinchera TR-3.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORTE DE LA ZONA DEL PROYECTO **FECHA:** FEBRERO DE 2.005

| | Descripción | Aspecto de la Trinchera |
|---|---|---|
| 5.0<br>10.0<br>15.0<br>20.0<br>25.0 | Relleno hetorogeneo compuesto por gravas, desechos de construcción y basuras de espesor entre 20 y 40cm. Bajo el relleno se presentan bloques y gravas angulares enmbebidos en matriz arcillosa de humedad baja y plasticidad media.<br>**FIN DE LA TRINCHERA 25m** |  |

## Figura 6-13 Aspecto de la Trinchera TR-4.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C

**LOCALIZACIÓN:** COSTADO NORTE DE LA ZONA DEL PROYECTO **FECHA:** FEBRERO DE 2.005

| | Descripción | Aspecto de la Trinchera |
|---|---|---|
| 2.0<br>4.0<br>6.0<br>8.0<br>10.0 | Relleno hetorogeneo compuesto por gravas, desechos de construcción y basuras de espesor superiores a 80cm. La fracción fina es arcillosa de humedad baja y plasticidad media. |  |
| | **FIN DE LA TRINCHERA 10m** | |

## Figura 6-14 Aspecto de la Trinchera TR-5.

**PROYECTO:** ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS RECOMENDADAS PARA ESTABILIZAR EL ESCARPE DEL BARRIO VILLAS DE BOLÍVAR DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR EN BOGOTÁ D. C

**LOCALIZACIÓN:** ESCARPE PRINCIPAL - COSTADO SURESTE **FECHA:** FEBRERO DE 2.005

| | Descripción | Aspecto de la Trinchera |
|---|---|---|
| 2.0<br>4.0<br>6.0<br>8.0<br>10.0 | En la parte superior existe un coluvion de espesor de 1m, conformado por bloques en matriz arcillolimosa.<br>Bajo el coluvòn se encuentra arenisca muy fracturada, en la que se pueden apreciar caídas de bloques de tamaños que varían entre 10 y 90cm. |  |
| | **FIN DE LA TRINCHERA 8m** | |

## Tabla 6-6 Tabla resumen de resultados de ensayos laboratorio

| Nomenclatura | Muestra | | | | USCS | $w_n$ (%) | G (%) | A (%) | F (%) | LL (%) | LP (%) | IP (%) | $\gamma_t$ (Ton/m³) | $\gamma_d$ (Ton/m³) | Compresión Inconfinada | | Esfuerzo de Tracción | Carga puntual | Corte Directo | | | | Bloque deslizante | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | No. | de | a | Prof. Media | | | | | | | | | | | $q_u$ (Ton/m²) | $E_{50}$ (Ton/m²) | $E_t$ (Ton/m²) | Is (Ton/m²) | c' sat (Ton/m²) | ϕ' sat (°) | c' wn (Ton/m²) | ϕ' wn (°) | Ángulo (°) | golpes/ pie |
| S-1 | 1 | 0.00 | 0.70 | 0.35 | | | 51 | 43 | 6 | | | | | | | | | | | | | | | |
| S-1 | 2 | 0.70 | 1.15 | 0.93 | CL | 13.6 | | | | 27 | 18 | 9 | | | | | | | | | | | | 26 |
| S-1 | 3 | 1.15 | 1.60 | 1.38 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25 |
| S-1 | 4 | 1.60 | 2.05 | 1.83 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 |
| S-1 | 5 | 2.05 | 2.50 | 2.28 | CH | 21.7 | | | | 67 | 28 | 39 | 2.11 | 1.73 | | | | | | | | | | 21 |
| S-1 | 6 | 2.50 | 2.95 | 2.73 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 39 |
| S-1 | 9 | 4.70 | 5.90 | 5.30 | CL | 14.6 | | | | 35 | 17 | 18 | 2.22 | 1.94 | 15.9 | 4.04 | | | 4.87 | 16.36 | | | | |
| S-1 | 10 | 5.90 | 7.40 | 6.65 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 34 | |
| S-1 | 11 | 7.40 | 8.60 | 8.00 | | | | | | | | | | | | | | 24.8 | | | | | 58 | |
| S-1 | 12 | 8.60 | 10.00 | 9.30 | CH | 25.1 | | | | 61 | 24 | 37 | | | | | | | | | | | | |
| S-2 | 2 | 0.80 | 1.90 | 1.35 | | | | | | | | | | | | | | 15.6 | | | | | | |
| S-2 | 5 | 3.90 | 4.90 | 4.40 | | | | | | | | | 2.09 | | | | 245 | | 3.27 (0.16) | 39.63 (41.43) | | | 48 | |
| S-2 | 7 | 5.30 | 5.80 | 5.55 | | | | | | | | | 2.14 | | 3978.9 | | 287 | | | | | | | |
| S-2 | 9 | 7.00 | 8.10 | 7.55 | | | | | | | | | | | | | | 28.3 | | | | | | |
| S-2 | 12 | 9.80 | 11.00 | 10.40 | | | | | | | | | 2.17 | | | | | | | | 1.27 (0.89) | 16.73 (16.44) | | |
| AP-1 | 2 | 0.15 | 0.30 | 0.23 | CH | 18.8 | | | | 60 | 27 | 33 | | | | | | | | | | | | |
| AP-3 | 1 | 0.30 | 0.70 | 0.50 | GC | 7.7 | 60 | 22 | 18 | 25 | 13 | 12 | | | | | | | | | | | | |
| AP-4 | 1 | 0.40 | 0.50 | 0.45 | GC | 7.6 | | | | 23 | 12 | 11 | | | | | | | | | | | | |
| TR-2 | 1 | 3.00 | 3.10 | 3.05 | | | | | | | | | 2.36 | | | | | 52.4 | | | | | | |
| TR-5 | 1 | 5.00 | 5.10 | 5.05 | | | | | | | | | 2.38 | | | | | | | | 3.45 (1.35) | 38.78 (27.26) | | |
| TR-5 | 2 | 5.00 | 5.10 | 5.05 | | | | | | | | | 2.43 | | | | | 71.7 | | | | | 36 | |

- **USCS:** Clasificación del material, según el Sistema de clasificación unificado
- **$W_n$:** Contenido de humedad.
- **G:** Porcentaje de grava
- **A:** Porcentaje de arena
- **F:** Porcentaje de finos
- **LL:** Límite líquido
- **LP:** Límite plástico
- **IP:** Índice de plasticidad
- **$\gamma_T$ :** Peso unitario total.
- **$\gamma_d$:** Peso unitario seco.
- **$q_u$:** Resistencia a la compresión uniaxial
- **$E_{50}$:** Modulo de deformación
- **$E_t$:** Esfuerzo de tracción
- **$I_S$:** îndice de carga puntual
- **c' sat:** Intercepto de cohesión en condición saturada, pico (residual)
- **ϕ' sat:** Ángulo de fricción interna en condición saturada (pico) (residual)
- **c' wn:** Intercepto de cohesión a humedad natural (pico) (residual)
- **ϕ' wn:** Ángulo de fricción interna en humedad natural (pico) (residual)
- **Ángulo:** Ángulo de fricción mìnimo obtenido en la prueba de bloque deslizante

# PLANOS

# ANEXO A TOPOGRAFÍA

# ANEXO B
# GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA

# ANEXO C
# GEOTECNIA

# ANEXO D
# HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

# 7. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

La caracterización geomecánica, tanto de los materiales como de las discontinuidades, se hizo con base en los resultados obtenidos en el programa de investigación del subsuelo, ensayos de laboratorio y las condiciones geológicas y geomorfológicas (Ver Capítulos 3 y 6 del Informe Parcial No. 2).

Con el fin de efectuar los análisis de estabilidad posteriores y ampliar los espectros de parámetros de cada uno de los materiales, se recopilaron los resultados de ensayos de corte directo realizados en el estudio elaborado por el Consorcio IGR (2005) en el Barrio Juan José Rondón **(JJR)** para la DPAE. El Barrio JJR se encuentra localizado cerca del Barrio Villas de Bolívar **(VBol)** y, en éste los materiales también pertenecen al conjunto medio de la Formación Guaduas.

La caracterización se realizó a partir de las unidades litológicas del subsuelo y para lo cual se correlacionaron las descripciones geológicas con los resultados de las pruebas de campo y laboratorio ejecutados (tanto en el presente estudio como en el barrio JJR), y se estableció la Zonificación Geotécnica (Ver Figura 7-2).

## 7.1 MATERIALES

En los siguientes numerales se presenta la descripción de cada material detectado en el sitio del proyecto.

### 7.1.1 Coluvión

Es un coluvión matriz - soportado con espesores no superiores a 2m, que se encuentra compuesto por fragmentos de arenisca en matriz areno-arcillosa, de humedad y plasticidad bajas (la fracción fina presenta índices de plasticidad entre 9 y 11%, clasificando en el Sistema de clasificación unificado como CL). El número de golpes registrado en la prueba de penetración estándar, N, fue de 26. Al normalizar el número de golpes se obtuvo un ángulo de fricción de $\phi = 34^o$ (Ver ANEXO C). Es de notar que al no contar con suficientes datos de N, no se puede determinar un valor de intercepto de cohesión, por lo que a éste se le asigna un valor de c=0.

En un ensayo de corte directo, realizado en el estudio del Barrio JJR se obtuvieron valores de parámetros de resistencia al corte (en condición saturada) de 37º y 1.90Ton/m², para el ángulo de fricción interna e intercepto de cohesión, respectivamente.

### 7.1.2 Rellenos antrópicos

Corresponden a los depósitos cuaternarios conformados por fragmentos heterogéneos que clasifican en el Sistema de clasificación unificado como CH, CL y GC y difícilmente diferenciables entre sí, aparecen en la parte superficial de los puntos de exploración, presentan humedades entre baja y media, diferentes distribuciones granulométricas y plasticidad media (Ver ANEXO C). En general los rellenos son derivados de actividades

antrópicas, tales como: actividades mineras, botaderos de material de construcción y basuras.

### 7.1.3 Depósitos aluviales

Son depósitos aluviales sub-recientes, depositados a manera de conos de deyección, en los cuales predominan arenas y limos de colores pardos.

### 7.1.4 Arcillolitas

Estos niveles se catalogan como de arcillas de consistencia media a firme (resistencia a la compresión inconfinada de 15.9Ton/m² y de 9 a 39 golpes en la prueba de penetración estándar, SPT) y peso unitario entre 2.11 y 2.23 Ton/m³. En el Sistema de clasificación unificado clasifica como CL y CH, variando de plasticidad alta a muy alta (índice de plasticidad entre 18 y 37%). Se estimaron un ángulo de fricción de 27.6º y un intercepto de cohesión de 0.23Ton/m², obtenidos en la prueba de penetración estándar, SPT (Ver Anexo C). En ensayos de corte directo sobre muestras inalteradas extraídas en las perforaciones, se obtuvieron parámetros de resistencia tanto en condición de humedad natural como saturada. Un ángulo de fricción interna, $\phi'$ =16.4º e intercepto de cohesión, c' = 4.9Ton/m²; se obtuvieron en una condición saturada (Muestra 9 del sondeo S-1).

En un ensayo de corte directo, realizado en el estudio del Barrio JJR se obtuvieron valores de parámetros de resistencia al corte (en condición saturada) de 26.2º y 2.0Ton/m², para el ángulo de fricción interna e intercepto de cohesión, respectivamente.

### 7.1.5 Areniscas

Las capas de arenisca tienen espesor entre 0.2 y 2.0m, de grano medio a muy grueso, humedad baja, resistencia a compresión y a la tracción en dirección perpendicular a la estratificación altas (resistencia a la compresión simple de 3980Ton/m² y esfuerzo a la tracción entre 245 y 287Ton/m²). El peso unitario varía de 2.09 a 2.43Ton/m³.

No se hicieron ensayos de corte directo sobre el material rocoso.

## 7.2 DISCONTINUIDADES

Las discontinuidades fueron descritas a partir de la información obtenida de los afloramientos, tomando como base los procedimientos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM - 1981. En los afloramientos rocosos se tomaron datos estructurales (azimut de buzamiento y buzamiento) y propiedades de las discontinuidades en dos estaciones. El inventario de los datos obtenidos y las características de las discontinuidades asociadas a ellos, están compilados en formatos de campo de "Levantamiento estructural de Macizos Rocosos" que hacen parte del ANEXO B. En general, los planos de estratificación, son secos; de persistencia de continuidad media a poco continua; con separación que varía de 5cm a 1m; con abertura ligeramente cerrada a abierta y relleno de calcita u otros. La rugosidad de las paredes es ondulada.

Para la determinación de la resistencia al deslizamiento entre discontinuidades, se realizaron pruebas de corte directo en condición de humedad natural y de bloque deslizante en condición seca. Las muestras fueron tomadas de manera que comprendieran en su interior una sección de un plano de discontinuidad. El espécimen para corte directo (Trinchera 5, muestra 1) fue tallado, de una muestra en bloque de arenisca, en sección cuadrada y en su configuración se buscó la mayor coincidencia posible entre la superficie de deslizamiento horizontal provocada por el ensayo de corte y la superficie de discontinuidad presente. Las muestras para bloque deslizante se probaron manteniendo el contacto entre paredes preexistentes.

Los valores de los parámetros de resistencia al corte pico obtenidos en el ensayo de corte directo, para la discontinuidad arenisca-arenisca con abertura ligeramente cerrada, son 38.8º y 3.5Ton/m², para el ángulo de fricción y el intercepto de cohesión, respectivamente; mientras que los parámetros residuales son 27.3º y 1.35Ton/m².

En una prueba de corte directo en una muestra inalterada (Sondeo 2- Muestra 5) sobre una superficie precortada inundada se obtuvieron un ángulo de fricción pico de 39.6º y un intercepto de cohesión pico de 3.3 Ton/m²; mientras que los parámetros residuales son: para el ángulo de fricción 41.3º y para el intercepto de cohesión 0.16 Ton/m³.

En un ensayo de corte directo, realizado en el estudio del Barrio JJR se obtuvieron valores de parámetros de resistencia al corte (en condición saturada y sobre superficie precortada) de 40.6º y 0.50Ton/m², para el ángulo de fricción interna e intercepto de cohesión, respectivamente.

Por otro lado, en las pruebas de bloque deslizante los valores de ángulo de fricción para una discontinuidad seca y sin relleno (contacto arenisca – arenisca) muestran gran variabilidad encontrándose los valores mínimos entre 34º y 36º.

En una discontinuidad precortada de arcillolita a humedad natural se obtuvieron: $\phi$' =16.4º e intercepto de cohesión, c' = 0.9Ton/m² (Muestra 12 del sondeo S-2).

## 7.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE

Como ya se ha mencionado, los parámetros de resistencia al corte, se han obtenido de la prueba de penetración estándar y ensayos de laboratorio de corte directo y bloque deslizante, los cuales se sintetizan en la Tabla 7-1, los realzados en el presente estudio, y en la Figura 7-1, los ejecutados para en el estudio del Barrio Juan José Rondón.

**Tabla 7-1 Parámetros de resistencia al corte obtenidos en los ensayos de campo y laboratorio**

| Material | c' [Ton/m²] | $\phi$' [º] | tan $\phi$' | Fuente |
|---|---|---|---|---|
| Arcillolita | 0.23 | 27.60 | 0.5228 | Normalización del SPT (S-1) |
| Arcillolita | 4.87 | 16.36 | 0.2936 | Corte Directo - inundado (S1-M9) |
| Arcillolita | 1.27 | 16.73 | 0.3006 | Corte Directo - humedad natural – Superficie precortada- (S2-M12)- Pico |

| Material | c' [Ton/m²] | ϕ' [º] | tan ϕ' | Fuente |
|---|---|---|---|---|
| Arcillolita | 0.89 | 16.44 | 0.3006 | Corte Directo - humedad natural – Superficie precortada- (S2-M12)- Residual |
| Coluvión | 0.00 | 34.00 | 0.6745 | Normalización del SPT (S-1) |
| Discontinuidad (Arenisca-Arenisca) | 0.00 | 34.00 | 0.6745 | Bloque deslizante (S1-M10 y TR5-M2) |
| Discontinuidad (Arenisca-Arenisca) | 0.00 | 36.00 | 0.7265 | Bloque deslizante (S1-M10 y TR5-M2) |
| Discontinuidad (Arenisca-Arenisca, con abertura ligeramente cerrada) | 3.45 | 38.78 | 0.8033 | Corte Directo - humedad natural - (TR5-M1) – pico |
| Discontinuidad (Arenisca-Arenisca, con abertura ligeramente cerrada) | 1.35 | 27.26 | 0.5152 | Corte Directo - humedad natural - (TR5-M1) – residual |
| Arenisca | 3.27 | 39.63 | 0.8282 | Corte Directo - inundado - Superficie precortada-(S2-M5) – Pico |
| Arenisca | 0.16 | 41.43 | 0.8826 | Corte Directo - inundado - Superficie precortada-(S2-M5) – Residual |

**Tabla 7-2 Parámetros de resistencia al corte obtenidos en ensayos de corte directo realizados en el estudio del Barrio Juan José Rondón (CONSORCIO IGR, 2005).**

| Material | c' [Ton/m²] | ϕ' [º] | tan ϕ' | Fuente |
|---|---|---|---|---|
| Arcillolita | 2.00 | 26.20 | 0.4921 | Corte Directo – inundado |
| Coluvión | 1.90 | 37.00 | 0.7536 | Corte Directo – inundado |
| Arenisca | 0.50 | 40.60 | 0.8571 | Corte Directo - inundado - Superficie Precortada |

Es de notar que en el ensayo de corte directo en arcillolita en condiciones de humedad natural y sobre superficie precortada, se obtuvo un valor de intercepto de cohesión bajo pero no cercano al origen (1.27Ton/m²) mientras que en un corte inundado en material rocoso alterado, este parámetro es el más alto (4.9 Ton/m²), comparado con los obtenidos

en la prueba SPT y en el ensayo realizado por el CONSORCIO IGR (0.23 y 2.00Ton/m², respectivamente).

De manera similar, para la muestra de arenisca precortada y la discontinuidad, se obtuvieron valores de intercepto de cohesión pico altos (3.27 y 3.45 Ton/m², respectivamente), así como valores positivos de intercepto de cohesión para la condición residual (0.16 y 1.35 Ton/m², respectivamente). Esto se debe a que la envolvente residual en areniscas normalmente es de tipo curvilíneo y difícil de incorporar en análisis corrientes de estabilidad, pero para los análisis de amenaza se toma c´= 0 como mínimo.

En el siguiente capítulo se establece una discusión sobre la adopción de parámetros de resistencia al corte que se emplearan en los análisis de estabilidad, partiendo de todo el espectro de parámetros de resistencia al corte (Ver Figura 7-1).

**Figura 7-1 Variación de los parámetros de resistencia al corte**

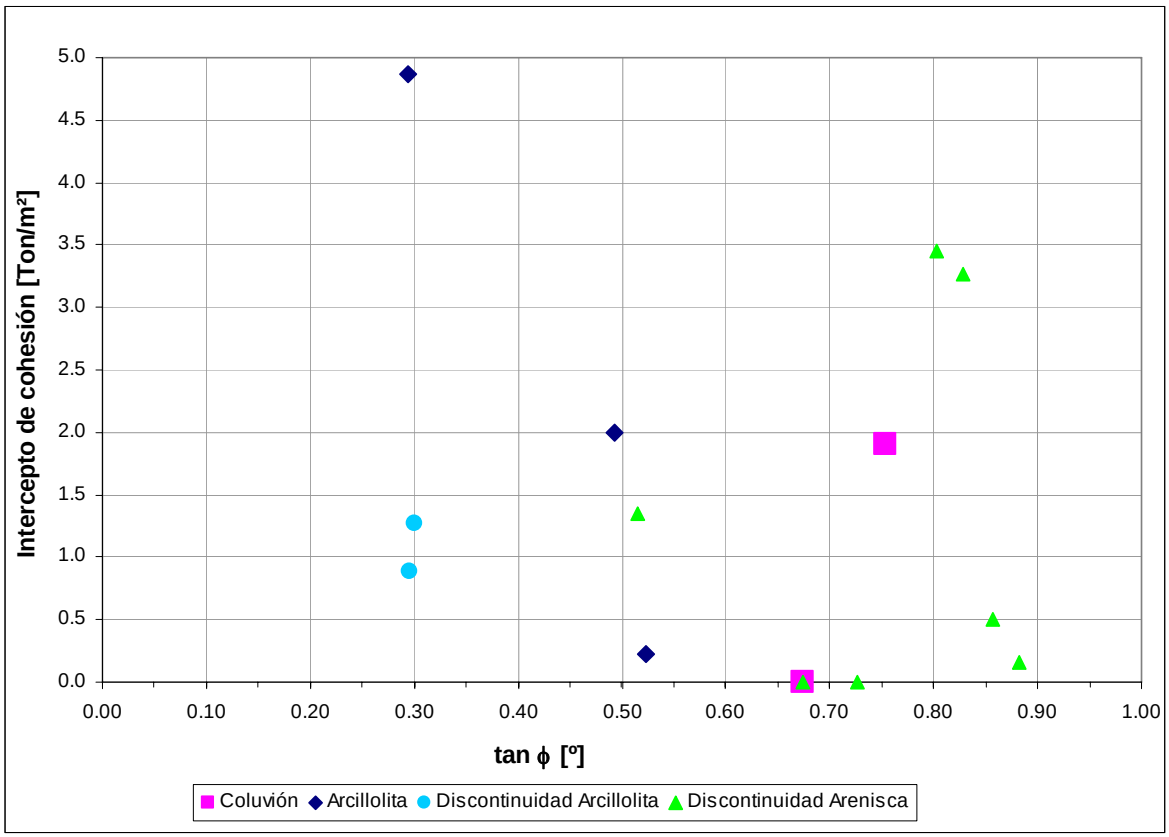


**Figura 7-2 Zonificación Geotécnica**

## 7.4 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN PLUVIAL

La estimación de la pérdida de suelo por erosión pluvial se realizo para el material, en el que presentan procesos de carcavamiento y erosión, y se utilizó el modelo matemático propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), que correlaciona factores de erosión, propiedades del suelo y condiciones que afectan el proceso de erosión. La expresión matemática del modelo EUPS es:

$$E = R * K * L * S * P * C$$

Donde:

E: Pérdida de suelos (ton / ha / año)

R: Factor de la lluvia, en función de su energía cinética (J / m²), si la lluvia se expresa en mm y (MJ / m²), si se expresa en cm.

K: Factor de erodabilidad del suelo (adimensional), con los valores entre 0.1 y 0.001, cuando la lluvia se expresa en mm.

L: Factor de longitud de la ladera, expresada en m.

S: Factor de pendiente del terreno, expresado en porcentaje.

C: Factor de vegetación.

### 7.4.1 Base teórica

#### 7.4.1.1 Factor R, lluvia

Para información pluviométrica se utiliza el modelo de Fournier, para la determinación del factor R, Lluvia.

$$R = \sum_{i=1}^{n} \frac{p^2}{P}$$

Donde

p: precipitación momentánea (horaria, diaria, mensual)

P: precipitación total del período estudiado

N: es el número de años.

#### 7.4.1.2 Factor K, erodabilidad

Entendiendo la erodabilidad como la facilidad o susceptibilidad que tiene el suelo a ser erosionado. Las propiedades físicas del suelo determinan la erosión causada; unas determinan la velocidad de infiltración, otras la resistencia del suelo a la dispersión y arrastre del agua lluvia y de escorrentía.

Para hallar el valor K, se emplean 5 propiedades del suelo, que se relacionan mediante el modelo matemático cuya expresión es:

$$1000K = \left(2.1M^{1.14} * 10^{-4}\right) \cdot (12 - a) + 3.25(b - 2) + (2.5(c - 3))$$

Donde:

M: (%limo + Arena muy fina) (100 - %Arcillas)

a: % de materia orgánica

b: Estructura del suelo

c: Permeabilidad

1000: Factor de conversión cuando la lluvia esta referida en milímetros; 100 cuando la lluvia está en centímetros.

Los componentes de la ecuación para estimar el factor K se obtuvieron de la siguiente manera:

- Granulometría: Sobre muestras obtenidas en campo se realizaron ensayos de granulometría por hidrómetro y por tamizado y con los resultados se obtuvieron las curvas de gradación.
- La materia orgánica se determinó por medio de la prueba de determinación del contenido orgánico en suelos mediante pérdida por ignición.
- La estructura se determino en campo, durante la descripción de perfiles.
- La velocidad de infiltración se determino en campo, por medio de ensayos de percolación (permeabilidad in situ) siguiendo las recomendaciones del método desarrollado por González (1987).

#### 7.4.1.3 Factor L, longitud de la ladera y Factor S, pendiente del terreno

Estos factores determinan la facilidad de escurrimiento y la velocidad y energía cinética alcanzada por la escorrentía. La longitud y la pendiente influyen directamente en la capacidad de arrastre que el agua de escorrentía.

Así a mayor grado de pendiente y mayor longitud corresponde mayor erosión, ya que en longitudes de pendientes muy largas y pronunciadas, la escorrentía aumenta, tanto en volumen como en velocidad y profundidad.

Para la determinación de estos factores se midieron directamente sobre la Sección de Análisis 3-3'.

Para la determinación del factor que mide el efecto de la longitud y grado de pendiente (LS) se calcularon pendientes típicas de la zona de estudio (las cuales son mayores a 9%) y se aplicó la siguiente ecuación:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{0.3}\left(\frac{s}{9}\right)^{1.3}$$

Donde:

λ: Longitud de la pendiente en m

s : Grado de pendiente

#### 7.4.1.4 Factor C, vegetación

Relaciona el tipo de extensión de la cobertura del suelo con la erosión originada por la lluvia en el caso de la cobertura vegetal, el efecto sobre la erosión se observa en cuatro aspectos:

- Intersección de la lluvia por la cubierta vegetal
- Disminución de la velocidad de escurrimiento y acción cortante del agua.
- Aumento de la granulación del suelo por efecto de las raíces, además del aumento de la porosidad y la actividad biótica.
- Incremento de la transpiración, conducente a la desecación del suelo.

La vegetación ejerce un efecto protector sobre el suelo, según sus exigencias en labores culturales (cultivos) y la cobertura vegetal formada; a mayor cobertura vegetal, menor erosión del suelo. Cultivos de ciclo corto causan mayor erosión que vegetación perenne o sistemas boscosos. En el caso de cobertura por construcciones el efecto es anular la erosión en las áreas constituidas, aunque por mal manejo del agua pueden desencadenarse procesos erosivos en áreas aledañas. Cuando el suelo no presenta cobertura, como es el caso de las vías destapadas, lotes vacíos sin vegetación y el área del escarpe, el proceso de erosión no se atenúa, por lo que el factor C es inoperante.

#### 7.4.1.5 Factor P, Prácticas de conservación del suelo

La erosión acelerada o antrópica puede ser disminuida hasta el equilibrio con la erosión geológica con obras que disminuyan la superficie expuesta, como revegetalización y como canales, desagües, etc, que reducen el carácter agresivo del agua. Cuando no se ha realizado, el factor P no es importante.

### 7.4.2 Aplicación y resultados

#### 7.4.2.1 Factor R, lluvia

Para estimar el factor de lluvia se utilizó la información pluviométrica registrada por la Estación Casablanca. Para el periodo 1976 al 2005, resulta un valor de 173 J/m²cm/h (expresada la lluvia en mm).

#### 7.4.2.2 Factor K, erodabilidad

Para la evaluación del factor K, se utilizaron los resultados de los análisis de laboratorio realizados sobre la muestra representativa del material expuesto a la acción de la lluvia, así como el análisis en campo de la infiltración. Se realizaron dos ensayos de infiltración, uno sobre la cárcava de mayores dimensiones y localizada en el corte principal de la zona del proyecto; y otro sobre el material anterior pero en la corona del talud. El resumen de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 7-3.

En la Tabla 7-4 se presenta la distribución porcentual de los contenidos de arena, arcillas y limos del material de la cárcava. El valor de materia orgánica obtenido por ignición es de 2.4%.

**Tabla 7-3 Resultados de ensayos de permeabilidad**

| Ensayo | Tipo de material | Permeabilidad (cm/s) [cm/h] | Apreciación de la permeabilidad | Localización ensayo |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Arcillolita meteorizada y erosionada | $4.3x10^{-5}$ [1.5cm/h] | Moderada | Cárcava en el talud principal |
| 2 | Arcillolita | $1.5x10^{-6}$ [0.054cm/h] | Lenta | Corona del talud principal |

**Tabla 7-4 Resultados del ensayo de granulometría por hidrometría**

| Tipo de material | % arena | % limo | % arcilla |
|---|---|---|---|
| Arcillolita meteorizada y erosionada | 19.8 | 53.9 | 26.3 |

La estructura depende del tipo de material y varía desde granular muy fina hasta masiva, plana o en bloques. Para el suelo se asume un valor de estructura de granular fina 2. A continuación se presentan los valores tenidos en cuenta para el cálculo de K:

**Tabla 7-5 Valores adoptados para hallar el Factor K**

| Propiedad | Valor |
|---|---|
| % materia orgánica | 2.4 |
| % arcillas | 26.3 |
| % limo mas arena muy fina | 73.7 |
| % arena | 19.8 |
| Estructura | Granular fina 2 |
| Permeabilidad | 1.5 cm/hora |
| Factor K | 0.013 |

#### 7.4.2.3 Factor L, longitud de la ladera y Factor S, pendiente del terreno

En la Tabla 7-6 se presenta la variación del las pendientes y longitudes, medida en la Sección de Análisis 3-3' (Ver Figura 7-2).

**Tabla 7-6 Variación de longitud y pendiente del talud**

| FACTOR | VALOR |
|---|---|
| Longitud mínima (m) | 4.6 |
| Longitud máxima (m) | 5.0 |
| Pendiente mínima % | 133 |
| Pendiente máxima % | 184 |
| Factor LS mínimo | 20.7 |
| Factor LS máximo | 32.4 |

#### 7.4.2.4 Factor C, vegetación

En la zona de estudio el Factor C se estimo para las condiciones más críticas con un valor de 1.0 para suelo descubierto y en pendiente alta, es decir, para la condición en la cual el suelo superior carece de cobertura vegetal, de este modo el área se encuentra expuesta directamente a la acción de los agentes erosivos.

#### 7.4.2.5 Factor P, Prácticas de conservación del suelo

No se evidencia prácticas de conservación de suelos ni de manejo del agua de escorrentía en la zona de estudio, por lo que este factor se le asigno el valor de 1.

#### 7.4.2.6 Pérdida de suelo

De acuerdo con los datos y resultados de los numerales anteriores, se obtuvieron valores de perdida de suelo que se muestran en la Tabla 7-7.

**Tabla 7-7 Valores obtenidos de pérdida de suelo**

| Valor de E | VALOR Ton – ha - año |
|---|---|
| Para factor LS mínimo | 49 |
| Para factor LS máximo | 76 |

La pérdida de suelo se clasifica de acuerdo con lo indicado en la siguiente tabla (Soil Survey Staff 1981, citado por Montenegro, 1985):

| Pérdida de suelo (ton/ha/año) | Clasificación |
|---|---|
| 0 | Ninguna |
| Menor de 2.5 | Ligera |
| De 2.5 a 10 | Moderada |
| De 10 a 25 | Severa |
| Mayor de 25 | Muy severa |

En las zonas del talud donde afloran arcillolitas (cercanas a la Sección de Análisis 3-3'), se evidencian pérdidas muy severas de suelo que pueden generar el desconfinamiento de bloques de arenisca localizados en cercanías a estos. El área que afectan es significativa dentro de la exposición del macizo rocoso, por lo que, el efecto que la pérdida de suelo tiene y puede tener como agente contribuyente de la inestabilidad de los bloques.

Además, de que los procesos de erosión colaboran con la inestabilidad, se ha considerado dentro del análisis cinemático, que en estas zonas existe un control estructural en la caída de bloques.

## Plano 7-1 Secciones geotécnicas

# 8. EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FRM

## 8.1 INTRODUCCIÓN

La amenaza se debe entender como la probabilidad de que ocurra la falla para cualquier mecanismo en un determinado lapso de tiempo. Esta amenaza se relaciona con el sitio puntual de donde se desprenden los materiales, bien sea en la caída de bloques o bien en los eventos rotacionales. No obstante, es innegable que por efectos gravitatorios las masas deslizadas pueden avanzar y eventualmente comprometer áreas adicionales. En este capítulo se abordan ambos tópicos: por una parte, la probabilidad de falla de los materiales y por otra, la probabilidad de que ellos avancen. La conjugación de estos dos elementos permite la definición de franjas de amenaza graduales semi-paralelas a los taludes (hacia arriba y hacia abajo) que tienen que ver con las distancias de viaje, eventos retrogresivos o afectación de terrenos de los taludes que involucran los materiales y su resistencia al deslizamiento.

Así pues, la primera etapa para taludes en roca consiste en definir desde el punto de vista cinemático su posibilidad de evento como falla planar, cuña o volcamiento frente a cada uno de los taludes existentes a lo largo del macizo rocoso y donde existe la posibilidad de este fenómeno de acuerdo a la zonificación geomorfológica; para taludes en suelo se requiere definir la o las secciones típicas para análisis dadas en el capítulo de geología y la configuración de suelos y sus propiedades mecánicas. La segunda etapa consiste en definir por mecanismo de falla, la curva de probabilidad de colapso que es función del factor de seguridad, FS para las combinaciones de variables aleatorias extremas como son: parámetros geomecánicos (c y $\phi$) e influencia de los sismos y las lluvias (Rosenblueth, 1975 y Hart, 1987) dentro de la probabilidad total.

La tercera etapa consiste en la definición de las distancias de viaje: como funciones de probabilidad a partir de eventos aleatorios en roca y como valor único en la posible falla rotacional en suelo para valores promedio y valores máximos probables.

Además, con el fin de corroborar el valor de amenaza, fuera del área de influencia de los fenómenos de inestabilidad o fenómenos inventariados a nivel geológico se calcula la amenaza por medio de la susceptibilidad a FRM teniendo en cuenta las diferentes propiedades de los materiales involucrados y las condiciones del macizo rocoso y suelo. Esta delimitación involucra además los límites de la unidad geomorfológica de ladera y los límites del área de estudio, así como un análisis del diseñador con el fin de considerar intervenciones futuras de laderas y control de construcción sin medidas de mitigación adecuadas.

La zona de estudio presenta dos posibles tipos de fenómeno de remoción en masa: 1) Falla por caída de bloques a nivel de roca y 1) movimiento rotacional en suelo residual de arcillolita. Los problemas de erosión existentes en la zona no son considerados dentro de la clasificación sugerida por Varnes como fenómenos de remoción en masa, pero es importante considerar que este efecto genera problemas futuros que degeneran en estos movimientos. Esta variable de

afectación debe ser controlada y se considera en el capítulo de obras de mitigación, así como dentro del análisis geotécnico.

Inicialmente se realizó una sectorización de taludes y áreas teniendo en cuenta la zonificación geomorfológica. Se identificaron 10 zonas así:

- Zona 1, 2 y 3. Taludes con potencial de caída de bloques. Se realiza un análisis cinemático entre los taludes típicos y las discontinuidades existentes teniendo en cuenta aquellas que se encuentran a lado y lado del alineamiento de falla. Al determinar que modelo de falla existe en el área, se calculan los factores de seguridad del movimiento y se evalúa la probabilidad de falla total de los eventos. A partir de esta situación se determina la distancia de viaje probable del evento asociado. Para la zona 1 se identificaron 5 taludes típicos (1.1 a 1.5) para el análisis cinemático y para caída de bloques se utilizó la sección 2-2 geotécnica que corresponde al crítico. Para la zona 2 se identificaron dos taludes (2.1 y 2.2) y se realizo la sección crítica que corresponde al talud 2.2. Para la zona 3 se identificaron tres taludes (3.1, 3.2 y 3.3) y se realizó la sección crítica que corresponde al talud 3.3.

- Zona 4-A y 4-B. Talud en suelo residual y rellenos - depósitos. Se realiza el análisis de estabilidad obteniendo los diferentes factores de seguridad y por ende la probabilidad total la cual condiciona el valor de amenaza del suelo en el área generada por la superficie de falla. Esta zona corresponderá a la amenaza definida por la probabilidad total. A partir de estos bordes se asimila como de amenaza inferior a la encontrada en la zona de falla hasta el contacto de la unidad geomorfológico y/o la distancia de viaje generada por la condición de falla. Se utilizó la sección 3-3 geotécnica para el suelo residual y la sección 2-2 geotécnica para el talud, depósito y relleno existente.

- Zona 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11. Áreas para susceptibilidad. Se determinan zonas homogéneas y se califica cada área de acuerdo a las condiciones existentes y sus parámetros. De acuerdo a los valores obtenidos se califica la amenaza por susceptibilidad.

**Figura 8-1 Sectorización para análisis de amenaza**

## 8.2 INFLUENCIA DE LAS LLUVIAS

Generalmente los fenómenos de remoción en masa están asociados con los periodos lluviosos, pues la precipitación es uno de sus principales detonantes. Por esta razón, es necesario conocer el régimen pluviométrico temporal y espacial, es decir, identificar los meses más lluviosos datos dados en el capítulo 4.

**Lluvia crítica (relación lluvia – deslizamiento)**

La precipitación es el factor que comúnmente se asocia con los fenómenos de remoción en masa, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren en aguaceros de gran magnitud, o durante los periodos lluviosos, ya que al producirse la precipitación, el agua puede ser conducida por la superficie en forma de escorrentía o puede filtrarse a través de ella. El primero de estos dos fenómenos ocasiona problemas de erosión, principalmente en zonas donde no hay cobertura vegetal, donde la presencia de surcos y cárcavas puede hacer al talud susceptible al deslizamiento por medio de la infiltración, el agua procedente de la lluvia puede actuar en el talud o ladera de varias formas:

- Aumentando la presión de poros y por consiguiente disminuyendo los esfuerzos efectivos y la resistencia al corte.
- Originando presiones hidrostáticas en las diaclasas de las masas rocas.produciendo fuerzas hidrodinámicas, especialmente cuando el agua fluye en sentido paralelo a la superficie del talud o ladera.
- Reduciendo la cohesión del material (reblandecimiento)
- Acelerando la meteorización
- Produciendo erosión interna
- Incrementando el peso total de la masa por humedecimiento de la misma.

El efecto adverso de los anteriores procesos en la estabilidad del talud o ladera va aumentando por la ocurrencia de las lluvias, durante varios días consecutivos o con pocos días de diferencia debido a que el talud no ha drenado el agua infiltrada de una lluvia cuando ocurre la siguiente y produce un fenómeno de acumulación progresiva hasta alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o de toda la ladera.

Para determinar la relación precipitación crítica – duración (relación lluvia – movimiento) es necesario disponer de un inventario detallado de movimientos con fecha de ocurrencia y localización del evento, para lo cual aunque la DPAE ha desarrollado bitácoras y registros históricos no se encontró suficiente información para realizar el análisis estadístico local (insuficiencia de datos en el tiempo). Por ello se recurre al estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inestabilidad del terreno de varias localidad de Bogotá ejecutado por Ingeocim en 1998, en donde a partir de un inventario histórico de deslizamiento en toda Bogotá detonados por lluvias y registros históricos de precipitaciones diarias de estaciones en la ciudad, se

encontró que la ciudad se puede dividir en zonas teniendo como ecuación para el suroccidente de Bogotá las siguientes:

| ZONA | LLUVIA CRITICA (mm) | DURACIÓN (DIAS) |
|---|---|---|
| Suroccidental | 0.3609 X LLUVIA ANUAL (mm) | $3.2829*LLCRITICA^{0.4157}$ |

El valor total anual medio multianual es de 616 mm en la estación Casa Blanca, la más cercana al área con una serie valores de longitud suficiente para adelantar estimativos confiables, datos dados en el Capítulo 4.

Para el barrio Compartir con valores de lluvia anual de 616 mm, corresponde una precipitación acumulada crítica de 222.70 mm, con una duración de 31 días. El periodo de retorno en esta zona y para la lluvia crítica esta dado en el estudio de Ingeocim Ltda para 29 años de acuerdo al mapa de periodo de retorno asociados a la localidad Ciudad Bolívar. De acuerdo con estos resultados se puede concluir que el papel del agua, es el servir como agente disparador para períodos de exposición cortos (< 30 años), lo cual sólo podría explicarse por la conjugación de más de una fuente, v.gr. aguas lluvias y aguas servidas.

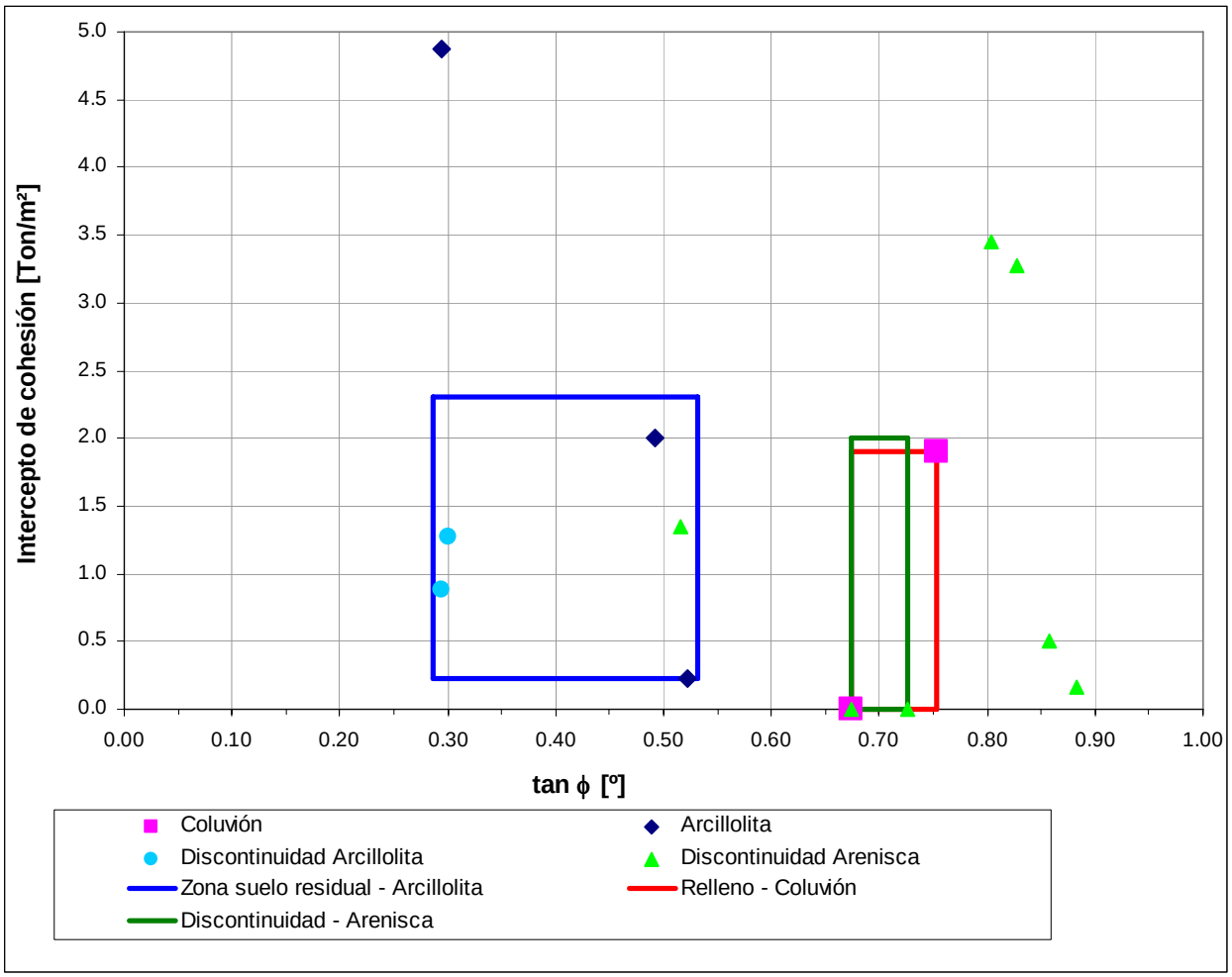
## 8.3 VARIABLES ALEATORIAS: LÍMITES

Se consideran como variables aleatorias o fuentes de incertidumbre: la cohesión, el ángulo de fricción, el grado de reblandecimiento de los materiales (relacionado con la lluvia) o la presencia de presiones de agua y la aceleración sísmica. Las tres primeras, denominadas endógenas, se estimaron para cada material y la última, entendida como evento condicionante o exógeno, recibió tratamiento basado en la Microzonificación Sísmica de Bogotá. Todos los demás parámetros se suponen conocidos y con muy baja variabilidad, es decir, determinísticos. La incorporación de los agentes disparadores de los procesos de inestabilidad en los modelos de análisis, se concentrará en este numeral exclusivamente a la acción de la lluvia y el sismo y no a agentes antrópicos u otros.

Los parámetros de resistencia son producto de la caracterización geomecánica expuesta en el capítulo anterior, la aceleración horizontal del terreno en caso de sismo se tiene en 0.24g, correspondiente a la Zona I, Cerros, lo que por una parte desestima los efectos locales de amplificación en taludes, pero por otra, trabaja con un periodo de retorno de 475, bastante conservador para este tipo de fenómeno.

En la Figura 8-2 se presenta los datos obtenidos de la exploración para cada uno de los materiales involucrados en el modelo. En dicha figura se presenta los intervalos asumidos para el análisis teniendo en cuenta la veracidad del modelo y las condiciones actuales de los procesos dentro de un rango aceptable.

**Figura 8-2 Evaluación de parámetros geomecánicos de materiales**




En la Tabla 8-1 se resumen los valores extremos de los parámetros utilizados: $c_{min}$, $c_{max}$, $\phi_{min}$, $\phi_{max}$, $a_{min}$, $a_{max}$, $agua_{min}$ y $agua_{max}$.

De los valores de parámetros de resistencia al corte, obtenidos sobre muestras de discontinuidades o sobre superficies precortadas, se pueden realizar los siguientes comentarios:

- El valor de intercepto de cohesión obtenido sobre discontinuidad arenisca-arenisca y para la condición de esfuerzos en el talud (Altura de talud entre 3.0 y 5.0 m) es del orden de 6 Ton/m² para el valor residual y de 12 Ton/m² en la condición pico. Estos valores geomecánicos están fuera del rango de parámetros extremos adoptados y fueron excluidos (de manera estadística) ya que sobrestiman los valores de factores de seguridad en los

análisis de estabilidad. El valor superior del rango adoptado fue limitado hasta un valor de c = 2 Ton/m2.

- Se incluyeron en los análisis los valores de intercepto de cohesión iguales a cero (obtenidos en pruebas de bloque deslizante) y cercano a cero (obtenido en el ensayo de corte directo sobre superficie precortada de arenisca).

- El valor de intercepto de cohesión de los materiales de arcillolita y/o suelo residual de arcillolita para el nivel de esfuerzos es similar al obtenido en el ensayo de corte directo, es decir, se encuentra entre valores de 5 Ton/m² y 8 Ton/m². Sin embargo, estos valores sobrevaloran el modelo planteado de amenaza por lo cual fueron descartados, buscando compararlos con valores obtenidos materiales similares (pertenecientes a la misma Formación) en otros estudios de la DPAE. El par de puntos que corresponde al nivel de esfuerzos no esta incluido dentro de los parámetros extremos y es posible que el valor extremo de intercepto de cohesión utilizado como mínimo puede coincidir con una condición residual de estos suelos.

**Tabla 8-1 Valores extremos de las variables aleatorias**

| Material | PARÁMETROS DE ANÁLISIS | | | | Agua | $a_{máx}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\phi_{mín}$ (°) | $\phi_{máx}$ (°) | $c'_{mín}$ ($T/m^2$) (kPa) | $c'_{máx}$ ($T/m^2$) (kPa) | | |
| TKgm – Suelo residual de arcillolita – arcillolita | 16 | 28 | 0.23<br>2.30 | 3.00<br>30.00 | Para simular el efecto del agua se utiliza un nivel freático supuesto cercano a la superficie del terreno | 0.24g |
| TKgm – Arenisca | 35 | | 2.80<br>28.0 | | | |
| Relleno y coluvión | 34 | 37 | 0.00 | 1.90<br>19.0 | Para simular el efecto del agua se utiliza un nivel freático supuesto cercano a la superficie del terreno | |
| Discontinuidad - Arenisca | 34 | 36 | 0.00 | 2.00<br>20 | Se utiliza el valor del 50% de la altura total del bloque inestable. | |

Con el fin de adoptar los valores de resistencia al corte de los materiales en los análisis se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Se tomaron el valor promedio y la desviación estandar de cada material como punto de referencia central de la serie de datos. Con estos valores se genera los rangos máximos y mínimos (bordes) dados tanto para el intercepto de cohesión como para el ángulo de fricción.

- Se evaluaron los bordes superiores de intercepto de cohesión para cada material y se ajustaron como el valor promedio entre el extremo superior y el valor siguiente a la serie de datos. Esto con el fin de no descartar la influencia de valores extremos de la serie de datos, pero sin incluirlo directamente en el análisis y así sobrevalorar los valores de resistencia.

Es importante anotar que los valores de intercepto de cohesión utilizados como bordes mínimo fueron de c=0, anotado anteriormente en el capitulo anterior en el numeral 7.3.

## 8.4 ANÁLISIS CINEMÁTICO PARA TALUDES EN ROCA

En este análisis se evalúan los modos probables de falla (planar, volteo y en cuña) para el conjunto de taludes en los que se expresa el macizo rocoso, contrastándolos con los posibles planos de movilización detectados en el levantamiento estructural. La evaluación persigue dilucidar acerca de los modos que sean probables y detectar los planos involucrados en dichos modos.

El análisis debe llevarse a identificar la distancia de viaje probable del bloque crítico. El análisis permite apoyar el manejo de la amenaza y su valor de probabilidad dentro del área de trabajo.

### 8.4.1 Familia de discontinuidades

En el capítulo de geología se presenta el levantamiento estructural de macizo rocoso de acuerdo a cada una de las estaciones desarrolladas en el trabajo de campo, así como el análisis de las familias de discontinuidades de acuerdo las zonas divididas por el sistema de falla existente en la zona. En la Tabla 8-2 se presenta los datos de las familias típicas para el análisis del macizo rocoso.

### 8.4.2 Taludes de estudio

Se identificaron en la zonificación geomorfológica tres zonas probables de caída de bloques (zona 1, 2 y 3). Para cada una de estas zonas se ubicaron taludes típicos que representaran la posibilidad de caída de bloques dentro del análisis. En la Tabla 8-2 se presentan los datos de los taludes determinados para cada una de las zonas probables. En la Figura 8-1 se presenta la

ubicación de los taludes típicos y las secciones determinadas para el análisis de caída de bloques.

### 8.4.3 Posibilidad cinemática

Una vez se han definido las familias de discontinuidades y los taludes de estudio se puede proceder a la realización del análisis cinemático, cálculo presentando en el ANEXO E 1. En Este análisis se evidencia que bajo las condiciones geométricas mencionadas para los taludes y consecuentemente con las disposiciones de las diaclasas, solo ocurren mecanismos de falla tipo planar y cuña en los diferentes sitios probables de este fenómeno.

**Tabla 8-2Taludes de estudio y discontinuidades**

| ZONA | TALUD | ORIENT. TALUD | | D1 | | D2 | | D3 | | D4 | | E | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | α | β | α | β | α | β | α | β | α | β | | β |
| ZONA 1 | 1.1 | 98 | 75 | 13 | 54 | | | 46 | 80 | 128 | 42 | 306 | 20 |
| | 1.2 | 98 | 78 | 13 | 54 | | | 46 | 80 | 128 | 42 | 306 | 20 |
| | 1.3 | 101 | 71 | 13 | 54 | | | 46 | 80 | 128 | 42 | 306 | 20 |
| | 1.4 | 68 | 42 | 13 | 54 | | | 46 | 80 | 128 | 42 | 306 | 20 |
| | 1.5 | 128 | 71 | 13 | 54 | | | 46 | 80 | 128 | 42 | 306 | 20 |
| ZONA 2 | 2.1 | 49 | 67 | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 293 | 29 |
| | 2.2 | 80 | 78 | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 293 | 29 |
| ZONA 3 | 3.1 | 72 | 69 | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 293 | 29 |
| | 3.2 | 72 | 69 | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 293 | 29 |
| | 3.3 | 145 | 70 | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 293 | 29 |

### 8.4.4 Tipificación de taludes y de mecanismos de falla

De acuerdo con los resultados del análisis cinemático, son factibles fallas de tipo planar y cuña en las tres zonas de análisis. En la tabla siguiente se presenta los resultados obtenidos:

**Tabla 8-3 Resumen de taludes y tipos de falla existentes**

| ZONA | TALUD | MOVIMIENTO | | | D1 | | D2 | | D3 | | D4 | | CUÑA | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | PLANAR | CUÑA | VOLCAM. | α | β | α | β | α | β | α | β | β1 | β2 | δ1 | δ2 |
| ZONA 1 | 1.1 | | D1D4 | | 13 | 54 | | | | | 128 | 42 | 85 | 30 | 54 | 42 |
| | 1.2 | | D1D4 | | 13 | 54 | | | | | 128 | 42 | 85 | 30 | 54 | 42 |
| | 1.3 | SIN POSIBILIDAD CINEMÀTICA | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1.4 | | D1D4 | | 13 | 54 | | | | | 128 | 42 | 55 | 16 | 54 | 42 |
| | 1.5 | D4 | | | | | | | | | 128 | 42 | | | | |
| ZONA 2 | 2.1 | | D3D4 | | | | | | 46 | 80 | 128 | 42 | | | | |
| | 2.2 | | D1D3 | | 104 | 66 | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 76 | 24 | 92 | 66 |
| | 2.2 | | D2D3 | | | | 142 | 64 | 184 | 88 | | | 76 | 62 | 92 | 64 |
| ZONA 3 | 3.1 | SIN POSIBILIDAD CINEMÁTICA | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3.2 | SIN POSIBILIDAD CINEMÁTICA | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3.3 | D2 | D1D2 | | 104 | 66 | 142 | 64 | | | | | 41 | 3 | 66 | 64 |

## 8.5 ANÁLISIS DE FACTORES DE SEGURIDAD

La evaluación de estabilidad se efectúa para el talud rocoso y para los mecanismos mencionados anteriormente. Para el talud en suelo se modelo de acuerdo a los métodos de equilibrio límite.

### 8.5.1 Taludes en roca

De acuerdo con los resultados del análisis cinemático, son factibles fallas de tipo planar y cuña en Las tres zonas de estudio. Los párrafos siguientes se destinan a una breve descripción de dichos tipos de falla que se presentan en el sitio.

#### 8.5.1.1 Mecanismo de falla en cuña

Los factores de seguridad se obtienen mediante el empleo de una hoja de cálculo que sistematiza la expresión propuesta por Low (1996) cuyo desarrollo matemático se muestra en el ANEXO E 2. Low parte de la geometría de la cuña, las consideraciones mecánicas de cada discontinuidad y el manejo del parámetro de agua. Las consideraciones de sismo no descritas en el artículo fueron resueltas por el consultor de acuerdo a la definición del problema y las consideraciones dadas en el artículo.

El desarrollar esta programación facilita al consultor el control de datos y el análisis del problema, así como la validación de todas las cuñas generadas en un tiempo prudencial de análisis.

Se utilizó como altura de la cuña para la zona 1 de 5,0 m que corresponde a 3,0 m de escarpe de arenisca y 2 m dentro del talud existente de talus. Se utilizo una altura de la cuña de 6,0 m y de 5,0 m para la zona 2 y 3 que corresponde al frente libre de explotación de arenisca existente. Se utilizó una altura de agua del 50% de la altura total de la cuña.

De acuerdo a las consideraciones sísmicas dadas para la zona, las condiciones de agua y la geometría de la cuña, es posible que se presenten valores de factores de seguridad de cero (Low, 1996).

En la Tabla 8-4 se presenta el resumen de factores de seguridad.

Tal y como se observa y utilizando las propiedades mencionadas anteriormente el potencial de falla en cuña es evidente.

#### 8.5.1.2 Mecanismo de falla planar

Los factores de seguridad se obtienen mediante el empleo de una hoja de cálculo que sistematiza la expresión propuesta por Hoek y Bray (1981).

La altura utilizada de generación de bloques fue de 5.0 m para la zona 1 y 3 donde se presenta este tipo de falla. La altura de agua utilizada fue de 2.5 m, es decir el 50% de la altura del bloque de falla probable. En la tabla siguiente se presenta el resumen de factores de seguridad obtenidos.

## Tabla 8-4 Factores de seguridad para falla en cuña

| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 1.1 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 1.17 | 1.48 | PLANOS | D1D4 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 1.26 | 1.60 | % H | 50.00 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 2.81 | 3.12 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 2.90 | 3.24 | H | 5 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 1.2 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 1.18 | 1.48 | PLANOS | D1-D4 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 1.27 | 1.60 | % H | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 2.76 | 3.06 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 2.85 | 3.17 | H | 5 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 1.4 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.86 | PLANOS | D1-D4 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.93 | % H | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.21 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 20.28 | H | 5 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 2.2 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | PLANOS | D1D3 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | % H | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.42 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.45 | H | 6 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 2.2 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.37 | 1.04 | PLANOS | D2D3 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.40 | 1.12 | % H | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 3.55 | 4.22 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 3.58 | 4.30 | H | 6 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 3.3 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | PLANOS | D1D2 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.39 | % H | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.04 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 5.07 | H | 5 |

## Tabla 8-5 Factor de seguridad por falla planar

| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 1.5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.02 | 0.46 | 0.75 | PLANO | D4 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.02 | 0.50 | 0.80 | % AGUA | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.51 | 0.73 | 1.28 | 1.78 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.52 | 0.73 | 1.32 | 1.84 | H | 5 |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | TALUD 3.3 | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.00 | 0.00 | 0.15 | 0.33 | PLANO | D4 |
| Cmin - ϕmax | 0.00 | 0.00 | 0.16 | 0.35 | % AGUA | 50 |
| Cmax - ϕmin | 0.21 | 0.33 | 1.55 | 1.89 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.15 | 0.27 | 1.56 | 1.91 | H | 5 |

Es importante mencionar que se obtienen valores negativos, producto de que las fuerzas generadas por la carga de agua existente y el sismo que son mucho mayores a la resistencia que se puede generar con los parámetros del material y la configuración geométrica del modelo. El análisis planteado por Hoek y Bray (1981) no limita los valores de carga de agua y la fuerza sísmica. Para resolver el problema desde el punto de vista lógico se trabaja con valores de FS iguales a 0 tal y como el caso de falla en cuña.

#### 8.5.1.3 Taludes en suelo

Con ayuda de la sección 2-2 geotécnica para rellenos y coluviones y con la sección 3-3 geotécnica para el suelo residual de arcillolita se realizó la modelación. La evaluación de estabilidad se planteó con métodos de equilibrio límite: falla rotacional sobre superficie crítica, empleando como herramienta de trabajo el programa PCStable 6, método de Bishop, corrida modelo que se muestra en el ANEXO E-3. Se calculo los factores de seguridad críticos generados en el talud teniendo en cuenta las condiciones de espesores de suelo residual, rellenos y continuidad de la roca.

**Tabla 8-6 Factores de seguridad para Mecanismo de Falla rotacional**

| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | SECCIÓN 3-3 SUELO RESIDUAL DE ARCILLOLITA | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.17 | 0.27 | 0.26 | 0.39 | | |
| Cmin - ϕmax | 0.27 | 0.44 | 0.41 | 0.62 | NIVEL FREÁTICO | |
| Cmax - ϕmin | 0.67 | 0.93 | 0.85 | 1.17 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 0.82 | 1.17 | 1.06 | 1.46 | | |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | SECCIÓN 2-2 TALUS | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.10 | 0.27 | 0.67 | 1.08 | | |
| Cmin - ϕmax | 0.11 | 0.30 | 0.75 | 1.20 | NIVEL FREÁTICO | |
| Cmax - ϕmin | 1.14 | 1.70 | 1.78 | 2.59 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 1.16 | 1.73 | 1.85 | 2.69 | | |
| VALORES PARA EL FS | CON AGUA | | SIN AGUA | | SECCIÓN 2-2 RELLENO PARTE INFERIOR | |
| | CON SISMO | SIN SISMO | CON SISMO | SIN SISMO | | |
| Cmin - ϕmin | 0.27 | 0.58 | 0.91 | 1.58 | | |
| Cmin - ϕmax | 0.30 | 0.65 | 1.02 | 1.77 | NIVEL FREÁTICO | |
| Cmax - ϕmin | 1.84 | 3.24 | 2.57 | 4.43 | SISMO | 0.24 |
| Cmax - ϕmax | 1.88 | 3.32 | 2.68 | 4.67 | | |

La evaluación de estabilidad se planteó con métodos de equilibrio límite: falla rotacional sobre superficie crítica, empleando como herramienta de trabajo el programa PCStable 6, método de Bishop.

Se analizaron dos secciones (área referida en la Figura 8-1 como zona 4-A y 4-B) con tres situaciones de análisis:

- Sección 2-2 geotécnica – ZONA 4-A. Corresponde a la parte media y baja del talud con dos puntos de análisis para el talus (arriba) y rellenos antrópicos (abajo)

- Sección 3-3 geotécnica – ZONA 4-B. Suelo residual y arcillolita. Se modelo teniendo en cuenta una superficie de falla circular amplia, sin involucrar mayores espesores de suelo residual y roca y la integridad de la arenisca por la calidad y condición de buzamiento desfavorable. Por ello para este material no fue necesario involucrarlo en el análisis con los valores de tendencia máximos y mínimos

## 8.6 PROBABILIDAD DE FALLA TOTAL

La amenaza, entendida como la probabilidad de excedencia de un parámetro específico durante un tiempo de exposición determinado, puede describirse en el caso de fenómenos de remoción en masa, mediante la evaluación del Factor de Seguridad *FS* como parámetro específico de estabilidad (Sánchez, 2000). Pero para estimar la probabilidad de falla es necesario conocer la distribución estadística del factor de seguridad (González, 2001). La solución a la relación existente entre estas dos variables y la obtención de las mismas, se plantea aquí siguiendo los lineamientos metodológicos de los Estimativos Puntuales, PEM (Rosenblueth, 1975 y Hart, 1987). Por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de un evento particular (*FRM*) se evalúa en términos de sus eventos condicionantes a través de la ley de probabilidades totales, en donde la probabilidad de ocurrencia de un FRM está definida por la siguiente ecuación:

$$p(D) = P(D/LS)p(LS) + P(D/L\bar{S})p(L\bar{S}) + P(D/\bar{L}S)p(\bar{L}S) + P(D/\bar{L}\bar{S})p(\bar{L}\bar{S})$$

Dicha probabilidad, como lo expresan sus términos, es función de las probabilidades condicionales de que se presente el FRM para todas las posibles combinaciones de lluvia y sismo, así:

. $p(D)$: Es la probabilidad de ocurrencia de un FRM.

$P(D/LS)$: Es la probabilidad condicional de que tenga lugar el FRM dado que haya lluvia y sismo.

$p(LS)$: Es la probabilidad de que se presenten la lluvia y el sismo simultáneamente.

$P(D/L\bar{S})$: Es la probabilidad condicional de que se genere el FRM dado que haya lluvia y no se presente sismo.

$p(L\bar{S})$: Es la probabilidad de que haya lluvia y no se produzca sismo.

$P(D/\bar{L}S)$: Es la probabilidad condicional de que ocurra el FRM dado que se presente el sismo y que no haya lluvia.

$p(\overline{L}S)$: Es la probabilidad de que se presente sismo, pero no lluvia.

$P(D/\overline{LS})$: Es la probabilidad condicional de ocurra el FRM dado que no haya lluvia ni sismo.

$p(\overline{LS})$: Es la probabilidad de que no se presenten ni el sismo ni la lluvia.

El PEM permite, conocidas las distribuciones estadísticas de los *n* parámetros que intervienen en el problema combinados en un algoritmo que resulta en un factor de seguridad, obtener el promedio y la desviación estándar de dicho *FS* y por ende, la probabilidad condicional.

Bajo el marco teórico expuesto, la evaluación de amenaza requiere entonces como insumos: los mecanismos de falla; en este sentido, se recurre a los tratados en el numeral anterior y a la probabilidad de las variables involucradas como sismo y lluvia tratado también anteriormente. Estos elementos, coligados con los resultados del análisis de estabilidad para las distintas combinaciones permiten determinar las curvas de probabilidad de falla para cada uno de los taludes en estudio.

La probabilidad de falla de los distintos mecanismos, se obtiene mediante el cálculo del factor de seguridad para las 16 diferentes combinaciones de variables extremas y su ajuste a funciones de probabilidad Normal y/o Weibull.

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia de todas las combinaciones de sismo y lluvia críticos se calculó con base en su periodo de retorno (*T*) únicamente y teniendo en cuenta dos escenarios, el actual (un año) y a mediano plazo (10 años) según las expresiones que aparecen a continuación.

$$P^{+} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{n}$$

$$P^{-} = 1 - P^{+}$$

donde:

$P^{+}$ = probabilidad de ocurrencia del evento crítico

$P^{-}$ = probabilidad de no ocurrencia del evento crítico

*T* = período de retorno

*n* = período de análisis

El análisis para los agentes exógenos se presenta a continuación:

**Tabla 8-7. Probabilidades de agentes exógenos**

| **Periodo de análisis** | **Actual (1 año)** | | **Mediano plazo (10 años)** | |
|---|---|---|---|---|
| **Agente exógeno** | **Ocurrencia** | **No ocurrencia** | **Ocurrencia** | **No ocurrencia** |
| Agua, T=29 años | 0.035 | 0.965 | 0.292 | 0.708 |
| Sismo, T=475 años | 0.002 | 0.998 | 0.020 | 0.979 |

Finalmente, para cada mecanismo de falla se calculó la probabilidad total para amenaza actual y mediano plazo (10 años) para la condición más desfavorable, resultados que se presentan en el ANEXO E 3.

Los niveles de amenaza se definen de acuerdo al siguiente rango dado por la DPAE para estudios de amenaza:

- Amenaza alta: Probabilidad de falla entre 1.00 y 0.40
- Amenaza media: Probabilidad de falla entre 0.40 y 0.12
- Amenaza baja: probabilidad de falla entre 0.12 y 0.01

De acuerdo a los valores obtenidos de probabilidad se tienen en la siguiente tabla los valores de probabilidad total asociada a los diferentes eventos:

## TALUDES EN ROCA

| FALLA EN CUÑA TALUD 1.1 | | |
|---|---|---|
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.05 | 0.30 |
| **NORMAL** | 0.08 | 0.33 |
| **WEIBULL** | 0.03 | 0.29 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 1.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.05 | 0.30 |
| **NORMAL** | 0.08 | 0.33 |
| **WEIBULL** | 0.03 | 0.29 |
| **FALA EN CUÑA TALUD 1.4** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.21 | 0.43 |
| **NORMAL** | 0.19 | 0.42 |
| **WEIBULL** | 0.04 | 0.31 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 2.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.49 | 0.63 |
| **NORMAL** | 0.31 | 0.50 |
| **WEIBULL** | 0.25 | 0.46 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 2.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.16 | 0.63 |
| **NORMAL** | 0.18 | 0.50 |
| **WEIBULL** | 0.06 | 0.46 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 3.3** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.42 | 0.59 |
| **NORMAL** | 0.26 | 0.47 |
| **WEIBULL** | 0.14 | 0.38 |
| | | |
| **FALLA PLANAR TALUD 1.5** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.36 | 0.51 |
| **NORMAL** | 0.31 | 0.49 |
| **WEIBULL** | 0.27 | 0.41 |
| **FALLA PLANARTALUD 3.3** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.61 | 0.71 |
| **NORMAL** | 0.46 | 0.60 |
| **WEIBULL** | 0.46 | 0.59 |

## TALUDES EN SUELO

| SECCIÓN 3-3 SUELO RESIDUAL DE ARCILLOLITA | | |
|---|---|---|
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.67 | 0.74 |
| **NORMAL** | 0.59 | 0.70 |
| **WEIBULL** | 0.58 | 0.65 |
| **SECCIÓN 2-2 TALUS** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.12 | 0.26 |
| **NORMAL** | 0.13 | 0.23 |
| **WEIBULL** | 0.04 | 0.16 |
| **SECCIÓN 2-2 RELLENO PARTE INFERIOR** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.03 | 0.20 |
| **NORMAL** | 0.08 | 0.19 |
| **WEIBULL** | 0.01 | 0.14 |

## 8.7 DISTANCIA DE VIAJE

### 8.7.1 Taludes en roca

El evento de caída de bloques se presenta a lo largo de tres secciones de talud delimitados y mostrados en la Figura 8-1 donde existe la presencia de arenisca y como se mencionó arriba, mediante mecanismos de falla en cuña o planar. Indistintamente del mecanismo, los bloques caen y recorren alguna distancia antes de detenerse: convierten su energía potencial en energía cinética y ésta se va disipando en el recorrido. Con el fin de identificar el alcance de los bloques inestables en la caída se hace necesario: 1. Conocer las dimensiones del bloque; 2. Establecer la topografía del terreno en la trayectoria; 3. Establecer las posibles condiciones de caída y 4. Emplear un simulador aleatorio de trayectorias pues es ése el tipo de comportamiento de este tipo de eventos.

En lo que se refiere al primer aspecto, de acuerdo con las observaciones de campo, los bloques caídos son de diferentes dimensiones pero predominan los bloques alargados (dos dimensiones mayores a la tercera) geometría que se relaciona con la separación y la persistencia de las discontinuidades. El análisis con este tipo de bloques brinda datos conservadores para el análisis y por ello con el fin de considerar la situación más crítica se puede figurar mediante bloques esferoidales que de acuerdo a la evaluación en campo pueden darse del orden de 1.00 m de diámetro.

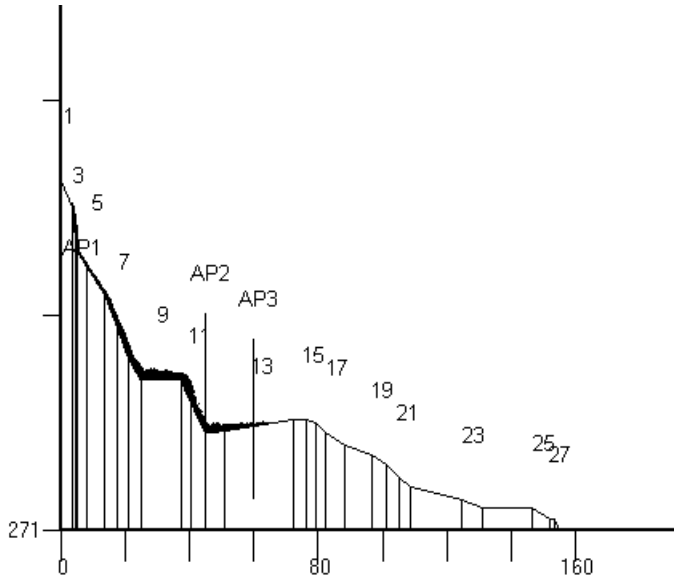
Este diámetro de bloque y su forma (esférica) es la más crítica generando mayores distancias y valores de velocidad y energía cinética, es decir se considera bloque crítico.

Con respecto a la topografía del terreno se utiliza la sección 2-2 geotécnica y las secciones correspondientes al talud 3-3 y 2-2 elaboradas con este fin y mostrada en la Figura 8-5 y en la Figura 8-6.

El tercer asunto, las condiciones de caída, pueden ser por caída libre o mediante la acción de un agente externo como un sismo, lo que se puede representar con una velocidad inicial, cálculo que se presente adelante. Finalmente, como simulador se utiliza el programa de computador CRSP (Colorado Rock Fall Simulation Program) que permite el ingreso de las dimensiones y forma del bloque, la topografía que se simula por medio de coeficientes de rugosidad normal y tangencial, así como diferentes condiciones iniciales de velocidad. Como resultado se obtienen la distancia máxima alcanzada por el bloque, su velocidad y energía cinética en el trayecto.

No obstante, con el fin de que el análisis sea representativo, se hizo un tratamiento estadístico de varios bloques cayendo aleatoriamente desde la corona del talud y/o desde alguna zona dada de la sección, se combinaron dos condiciones iniciales de velocidad, nula y de 2.17 m/s que corresponde a sismo y una geometría crítica posible, esferoidal, en cada caso se corrieron 1000 bloques para un total dentro del análisis de como mínimo de 2000 bloques.

**Figura 8-3 Sección 2-2 geotécnica –Generación de caída de bloques**




En el anexo se presentan los análisis y corridas para cada una de las secciones de análisis.

La velocidad de 2.17 m/s se deduce de acuerdo a la ecuación de movimiento uniformemente acelerado:

$$a = \frac{V^2 - Vo^2}{2X}$$

Donde:

X: Desplazamiento

V: Velocidad final

Vi: Velocidad inicial

a: aceleración

Asumiendo valores de X: distancia o desplazamiento una vez el diámetro del bloque, la aceleración de 0.24 de la gravedad y la velocidad inicial de 0 m/s se obtiene una velocidad final de 2.17 m/s.

Los resultados se tabularon para obtener curvas de probabilidad de llegada *Probabilidad de D*, vs *Distancia a la corona del talud*. En la Figura 8-4 se presenta los datos obtenidos de distancia de viaje para las secciones de estudio.

**Figura 8-4 Análisis de probabilidad – Sección 2 Geológica**

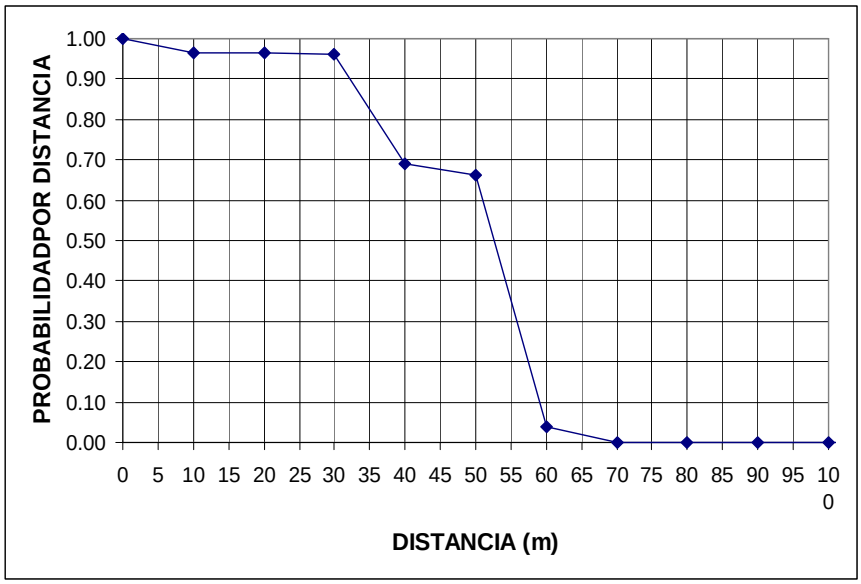


**Figura 8-5 Análisis de probabilidad. Talud 2.2**

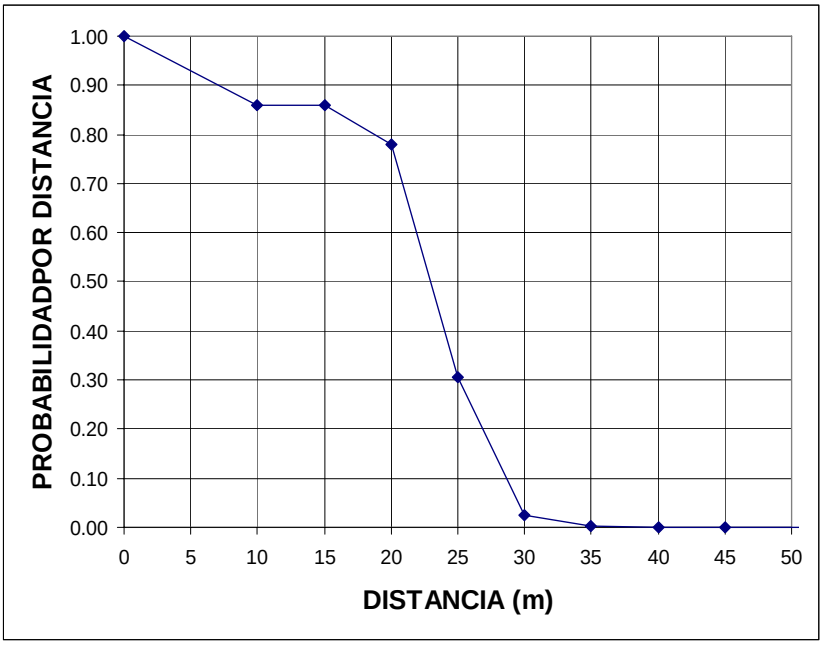
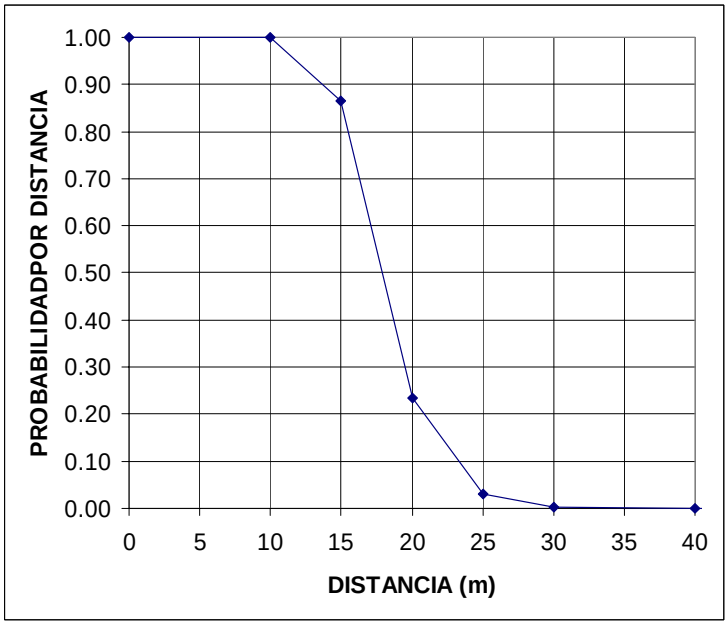



**Figura 8-6 Análisis de probabilidad Talud 3.3**




La selección de la distancia con el fin de realizar la sectorización para amenaza se realiza teniendo en cuenta los siguientes rangos:

Probabilidad alta de distancia: $1.0 < P(D) < 0.40$

Probabilidad media de distancia: $0.12 < P(D) < 0.40$

Probabilidad baja de distancia: $0.01 < P(D) < 0.12$

Es importante mencionar que la probabilidad de distancia esta asociada a la probabilidad del evento como tal. Para eventos de amenaza media, la probabilidad alta de distancia será asociado a amenaza media, la probabilidad media y baja de distancia a amenaza baja. Para amenaza alta por mecanismo de falla, la probabilidad alta de distancia estará asociado a la amenaza alta, la probabilidad media de distancia a amenaza media y la probabilidad baja de distancia a amenaza baja por mecanismo de falla.

### 8.7.2 Taludes en suelo

La trayectoria de viaje de una masa inestable depende del tipo de material y del mecanismo en tanto que su alcance es función de las características topográficas del sitio y de las dimensiones de la masa.

Para deslizamientos el cálculo de la distancia de viaje se puede llevar a cabo aplicando las expresiones formuladas por Finlay, Mostyn y Fell, 1999, que permiten obtener la distancia de viaje, L, en función de las dimensiones de la masa potencialmente inestable. En este caso se requieren entonces: las dimensiones de la masa potencialmente inestable y la topografía del talud. Ambas incertidumbres se despejan interpretando el talud de suelo con ayuda de la sección, cuya topografía se muestra en el plano topográfico y la sección geológica. Las dimensiones de la masa potencialmente inestable se obtienen de los análisis de estabilidad donde se establece una superficie crítica.

Los valores adoptados para el análisis provienen de los datos analizados por el autor mencionado, teniendo en cuenta el comportamiento de una serie de taludes y su potencial de falla. En la Tabla 8-8 se presentan los datos parametrizados por el autor mencionado de donde se obtienen los valores para el análisis de distancia de la masa inestable de suelo de acuerdo a las dimensiones dadas en la Figura 8-7.

**Tabla 8-8 Datos de variables. Finlay et all (1999).**

| Variable dependiente | Tipo de ecuación | Componentes de la ecuación VD = C0 + C1*I1 + C2*I2 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C0 | C1 | I1 | C2 | I2 |
| **CUT SLOPE** | | | | | | |
| log L | LCI | 0.062 | 0.965 | log H | -0.558 | log (tan A) |
| | Mean | 0.109 | 1.01 | | -0.506 | |
| | UCI | 0.156 | 1.055 | | -0.454 | |
| H4 | LCI | 0.453 | 0.525 | D | 0.0217 | H |
| | Mean | 0.678 | 0.695 | | 0.0537 | |
| | UCI | 0.903 | 0.866 | | 0.0858 | |
| **FILL SLOPE** | | | | | | |
| log L | LCI | 0.269 | 0.325 | log H | 0.166 | log (V/W) |
| | Mean | 0.453 | 0.547 | | 0.305 | |
| | UCI | 0.693 | 0.768 | | 0.443 | |
| **RETAINING WALL** | | | | | | |
| log L | LCI | 0.037 | 0.35 | log H | 0.108 | log (V/W) |
| | Mean | 0.178 | 0.587 | | 0.309 | |
| | UCI | 0.319 | 0.825 | | 0.15 | |
| **BOULDER FALL** | | | | | | |
| log L | LCI | 0.041 | 0.515 | log H | -0.629 | log (tan A) |
| | Mean | 0.253 | 0.703 | | -0.417 | |
| | UCI | 0.466 | 0.891 | | -0.206 | |

LCI and UCI are the lower and upper 95% confidence intervals, respectively

Variables

L: Distancia de viaje
H4: Espesor de la masa al caer
D: Espesor del deslizamiento
H: Altura del talud
V: Volumen del deslizamiento
W: Ancho en planta del deslizamiento

La zona analizada corresponde a la 4-A. Para esta zona se puede establecer que en caso de falla del talud de suelo, éste podría avanzar hasta 12 m en promedio que marca el nivel de amenaza media y 37,0 m como máximo que marca el nivel de amenaza baja.

**Figura 8-7 Dimensiones para el cálculo de la distancia de viaje de deslizamientos**

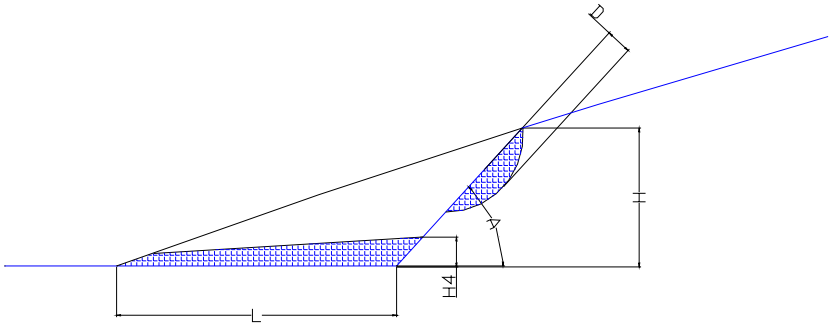



**Tabla 8-9 Determinación de la distancia de viaje**

| Altura del Talud | Longitud talud | Angulo del Talud | Coeficientes | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H (m) | L(m) | A (°) | Estados | Co | C1 | C2 |
| 11 | 7.44 | 56 | Promedios | 0.453 | 0.547 | 0.31 |
| 11 | 7.44 | 56 | Máximos | 0.693 | 0.768 | 0.44 |
| Variables | | | | Distancia de viaje | | |
| I1 | TAN (A) | I2 | Log L | DV (m) | | |
| 1.04 | 1.48 | 0.170 | 1.07 | 11.87 | | |
| 1.04 | 1.48 | 0.170 | 1.57 | 36.98 | | |
| Espesor de la masa (STABLE) | Coeficientes | | | | Altura Masa | |
| D (m) | Estados | Co | C1 | C2 | H4 (m) | |
| 5 | Promedios | 0.453 | 0.547 | 0.31 | 6.54 | |
| 5 | Máximos | 0.693 | 0.768 | 0.44 | 9.41 | |

Esto se conjuga entre cada una de las diferentes análisis de amenaza o niveles y se traslapa si es el caso tal como se mencionara adelante.

## 8.8 SUSCEPTIBILIDAD DE AMENAZA

Con el fin de realizar la zonificación de amenaza por FRM en aquellos sitios donde no se evidencian actividad o potencial por intervención antrópica del talud, tal como sucede hacia la parte superior del área de estudio es necesario considerar la susceptibilidad de ocurrencia de fenómenos de dichas áreas dentro del análisis de amenaza. Para considerar la susceptibilidad de amenaza se tendrá en cuenta los siguientes aspectos dados por la metodología planteada por Cantillo (1998):

1. **Relieve**: Referente a la pendiente del terreno.

2. **Tipo de materiales**: referente al levantamiento geológico, reconocimiento geotécnico y a la información de exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.

3. **Procesos degradacionales** existentes: de acuerdo a su carácter activo y potencial de los eventos y la ponderación de la tasa de movimiento.

4. **Susceptibilidad ante la erosión**: referente a la erosionabilidad.

5. **Susceptibilidad ante lluvias**: por precipitación o potencial de infiltración.

6. **Susceptibilidad ante sismos**: análisis de estabilidad y actividad sísmica

7. **Susceptibilidad por efectos antrópicos**: densidad de vivienda y efectos de explotación de áreas adyacentes.

De acuerdo a estos parámetros se desarrolla la siguiente matriz de análisis de susceptibilidad para las áreas de estudio:

**Tabla 8-10 Matriz de susceptibilidad de amenaza**

| FACTOR | CALIFICACIÓN | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| **RELIEVE (Pendiente)** | <15 | 15-25 | 25-30 | 30-60 | >60 |
| **MATERIAL** | Bueno | Regular a bueno | Regular | Regular a mal | Malo |
| **DEGRADACION** | No evidencia | Supone potencial | Potencial | Supone actividad | Activo |
| **EROSIÓN** | Baja | Media a baja | Media | Media a alta | Alta |
| **LLUVIAS** | Baja | Media a baja | Media | Media a alta | Alta |

| FACTOR | CALIFICACIÓN | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| **SISMOS** | Baja | Media a baja | Media | Media a alta | Alta |
| **ANTRÓPICO** | Baja | Media a baja | Media | Media a alta | Alta |
| **SUMATORIA** | 7 | 14 | 21 | 28 | 35 |

Es importante mencionar que el análisis es cualitativo, de acuerdo a la información ejecutada en discusión con los profesionales involucrados con el estudio. Los análisis de estabilidad desde el punto de vista mecánico explicados en los numerales anteriores contemplan la comparación con un talud de corte (ingenieril) con el cual se compara la información y se realiza el análisis para obtener la probabilidad de falla.

En este caso referente a la susceptibilidad, la probabilidad de ocurrencia esta asociada al modelo más probable obtenido del análisis anterior y a los factores de seguridad asociados a dicho análisis. De esta forma podemos obtener un rango de valores de probabilidad asociada y un rango de calificación asociado al modelo de acuerdo a la matriz anterior:

| SUSCEPTIBILIDAD | CALIFICACIÓN | PROBABILIDAD DE FALLA |
|---|---|---|
| **ALTA** | >28 | 1 – 0.40 |
| **MEDIA** | 15 – 27 | 0.40 – 0.12 |
| **BAJA** | <14 | 0.12– 0.01 |

Utilizando la matriz anterior y con el fin de ajustar el modelo se realiza la evaluación a lo largo de toda la zona de estudio teniendo en cuenta las zonas contempladas anteriormente (sectores para roca y suelo – zonas 1 a 4) con fines de ajuste.

Con la calibración del modelo se procede luego a calificar la zona de la parte superior del lote de estudio y demás zonas dadas en la Figura 8-1 tales como las zonas 5 a 10 tales como se presenta en la tabla siguiente:

**Tabla 8-11 Evaluación de susceptibilidad**

| PARÁMETRO | ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4-A | ZONA 4-B | ZONA 4-B | ZONA 5 | ZONA 6 | ZONA 7 | ZONA 8 | ZONA 9 | ZONA 10 | ZONA 11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CAÍDA DE BLOQUES | | | SUELO RESIDUAL | TALUS | RELLENO | ÁREAS POR SUSCEPTIBILIDAD DE AMENAZA | | | | | | |
| LONGITUD | - | - | - | 7.44 | 7.78 | 7.78 | 65.79 | 51.66 | 99.91 | 83.17 | 23.40 | 74.75 | 28.52 |
| DELTA COTA | - | - | - | 11 | 5.00 | 5.00 | 20.00 | 5.00 | 24.00 | 10.00 | 9.00 | 9.00 | 14 |
| TAN (PENDIENTE) | - | - | - | 1.48 | 0.64 | 0.64 | 0.30 | 0.10 | 0.24 | 0.12 | 0.38 | 0.12 | 0.49 |
| PENDIENTE (RAD) | - | - | - | 0.98 | 0.57 | 0.57 | 0.30 | 0.10 | 0.24 | 0.12 | 0.37 | 0.12 | 0.46 |
| PENDIENTE (GRADOS) | 42-78 | 67-78 | 69-70 | 55.93 | 32.73 | 32.73 | 16.91 | 5.53 | 13.51 | 6.86 | 21.04 | 6.87 | 26.15 |
| RELIEVE | 5 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| MATERIAL | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| DEGRADACIÓN | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| EROSIÓN | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| LLUVIAS | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| SISMOS | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| ANTRÓPICO | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 |
| SUMATORIA | 28 | 28 | 28 | 27 | 24 | 24 | 19 | 14 | 14 | 17 | 19 | 13 | 20 |
| SUSCEPTIBILIDAD | ALTA | ALTA | ALTA | MEDIA | MEDIA | MEDIA | MEDIA | BAJA | BAJA | MEDIA | MEDIA | BAJA | MEDIA |

En esta tabla se incluye el análisis desarrollado en las demás áreas con fines de calibración y adopción del modelo. La pendiente en las zonas 1 a 3 obedece a los rangos determinados de los taludes de análisis. Las pendientes de las zonas 4, obedece a la configuración topográfica del análisis.

Es necesario mencionar que el efecto de calibración en la zona de suelo residual de arenisca por susceptibilidad se obtienen valores de amenaza media a alta, diferentes a los esperados desde el análisis de mecanismo de falla (alta). Esto obedece al peso dado por el relieve en el análisis. Se considera adecuado desde el punto de vista de la calibración.

## 8.9 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA

Los pasos para realizar la zonificación son los siguientes:

1. Ubicar la zona de aferencia del talud de estudio.

2. Identificar el área de influencia de la superficie crítica de análisis.

3. Dentro del área inestable se considera con valor de amenaza de acuerdo al valor calculado anteriormente. La distancia de viaje evalúa la distancia hasta donde se debe dibujar el valor de amenaza.

4. Hacia atrás de la corona de la superficie crítica de movimiento se determina las condiciones retrogresivas y su posible avance, para lo cual en este caso se tomo la distancia de 5,0 m y 10,0 m, adoptado de acuerdo al potencial erosivo del material y la perdida de soporte por eventos detonantes.

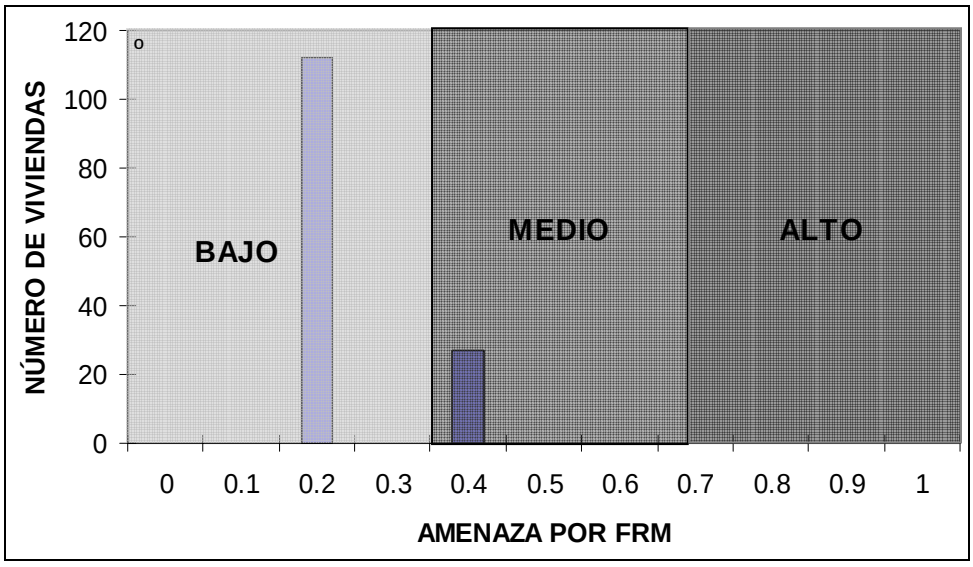
5. El mapa geomorfológico será limite del suelo en movimiento o crítico.

Esta información fue trasladada al plano topográfico y según la ubicación de los taludes de estudio.

Es importante mencionar que la vía existente en la parte inferior y que hace parte del plano catastral se encuentra en zona de amenaza alta. Es necesario que las medidas de mitigación sean tendientes también a proteger esta área.

De acuerdo al Estudio de Ingeocim las zonas delimitadas como altas se mantienen a excepción de la zona en la quebrada. Hacia la parte superior e inferior del talud minero esta consultoría obtiene zona de amenaza baja a diferencia del estudio de Ingeocim que obtiene zona de amenaza media y parte baja. En general sobre el borde del escarpe minero se obtiene la misma amenaza alta, limitada por la distancia de viaje.

En el Plano 8-1 Amenaza por FRM se presentan los resultados finales en donde se identifica en color rojo amenaza alta, en color amarillo amenaza media y en color verde amenaza baja. En total no se encuentra ningún predio en zona de amenaza alta y se presentan 112 predios en amenaza baja y 27 en zona de amenaza media.



# ANEXO E 1 ANÁLISIS CINEMÁTICO DE TALUDES

# ANEXO E 2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

# ANEXO E 3 PROBABILIDAD DE FALLA TOTAL

**Plano 8-1 Amenaza por FRM**

# 9. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

## 9.1 INTRODUCCIÓN

La vulnerabilidad se puede definir como una condición existente en la sociedad o un grupo social, implicando población, entorno urbano e infraestructura urbana los cuales pueden verse afectados y sufrir daño o pérdida en caso de materialización de una amenaza. La vulnerabilidad puede generarse como social, física, económica, institucional, etc.

La vulnerabilidad física de esta forma puede definirse en función del grado de exposición de cada uno de los elementos del entorno y de su nivel de resistencia ante la ocurrencia de un evento.

La evaluación de la vulnerabilidad tiene como objetivo analizar la condición existente de las viviendas frente a la amenaza por los diferentes fenómenos de remoción en masa existentes en la zona de estudio y, conjugada con la evaluación de la amenaza traducirla en riesgo. Este análisis permitirá determinar las medidas y tratamientos que se pretendan desarrollar en la zona, disminuyendo el grado de exposición o incrementando la resistencia de un elemento.

La vulnerabilidad de las viviendas se optó por evaluar la vulnerabilidad de las viviendas a partir del grado de exposición de éstas ante el fenómeno amenazante (Índice de exposición, IE) y del comportamiento de las construcciones en tal circunstancia (Índice de resistencia, IR). Finalmente se conjugaran los índices antes descritos para estimar la vulnerabilidad física. La base teórica del análisis que a continuación se expone se obtuvo en el Estudio de Riesgo por FRM para el barrio Casaloma de la Localidad Ciudad Bolívar elaborado por la firma Hidrogeología y Geotecnia Ambiental Ltda. para la DPAE, el cual se basa en conceptos dados en el estudio de Ingeocim Ltda en 1999, así como ajustes desarrollados por este consultor de la metodología para diferentes proyectos para la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá – DPAE.

### 9.1.1 Tipos de vulnerabilidad

Las sociedades expuestas a diferentes eventos de origen natural pueden presentar problemas de índole social por su dificultad para recuperarse pues entre otros pierden sus lazos familiares, vecinales y de ciudad o hasta la vida; de índole institucional por la poca respuesta o la incapacidad de gobernar al generarse el problema; de carácter económico por la dificultad para volver a invertir o recuperar lo existente y de carácter físico que involucra las pérdidas tangibles y directas por la ocurrencia del evento.

Para este estudio el análisis estará enfocado a los siguientes tipos de vulnerabilidad:

- Vulnerabilidad social - VS: Es presentada por el nivel de ingresos y las condiciones económicas existentes en la población de la zona. Se relaciona directamente con parámetros como la resilencia, el cual mide el poder de recuperación por si misma de una comunidad luego de ocurrido el evento. La evaluación es meramente cualitativa y basada en la descripción de campo, sin ser introducido en la valoración de vulnerabilidad física de viviendas.

- Vulnerabilidad física - VF: presentada por los elementos expuestos principalmente las viviendas.

La vulnerabilidad institucional que mide el papel del Estado y las posibles consecuencias que atraería a la localidad, la ciudad y la región la ocurrencia de un evento y cuál sería la capacidad de respuesta de los entes de gobierno no es tenida en cuenta en este estudio. Se relaciona con la confianza existente actualmente hacia el gobierno, del papel ejecutado a nivel de mejoramiento de la conciencia pública y la solución pronta de los problemas urbanos los cuales son una percepción meramente subjetiva.

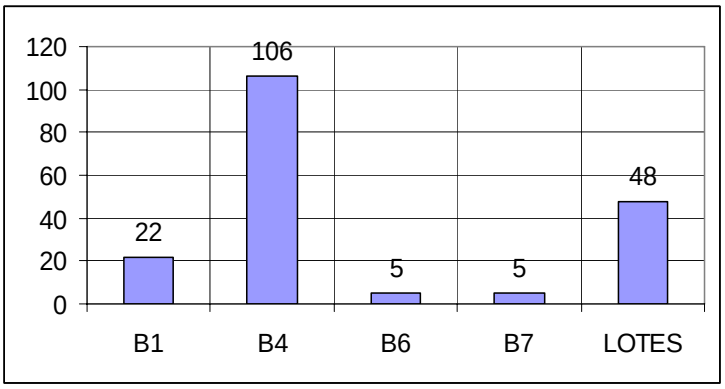
### 9.1.2 Línea base para el análisis

Con el fin de determinar la "línea base", conocida como aquellas variables iniciales de una sociedad que pueden verse afectadas por la ocurrencia de un evento, en este caso de fenómeno de remoción en masa, se encuestaron en campo los residentes de cada uno de los predios existentes aferentes y de importancia en el área de estudio mediante el "Formulario para el inventario de viviendas" desarrollado por la DPAE. Dicho formulario se diligenció con base en las respuestas de las personas interrogadas o con las observaciones de las condiciones existentes

En el ANEXO F 1 se presenta la relación de predios inspeccionados en el campo. En total se inspeccionaron 187 predios de los cuales 48 son lotes vacíos.

En la figura siguiente se presenta el resumen de tipología existente.

**Figura 9-1 Tipología de vivienda**



En el Plano 9-1 se presenta la tipología de viviendas del área de estudio y hace referencia al tipo de tipología utilizado en este estudio de la siguiente forma:

| SÍMBOLO | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
| B1 | Viviendas de uno y/o dos pisos de mamposteria confinada en columnas de concreto reforzado, vigas de amarre y continuidad de elementos. |
| B4–B5 | Edificaciones construidas con mamposteria y columnas de concreto sin continuidad de pórticos, o vigas de amarre , o muros sin confinamiento de uno o dos niveles. Tipo mixto. |
| B6 | Casas prefabricadas con plaquetas delgadas de concreto, unidas por secciones de aluminio de un piso. |
| B7 | Viviendas construidas con madera, aluminio o tejas de zinc de un piso |
| | Lote |

La tipología B4 y B5 fue agrupado de acuerdo a los datos obtenidos en campo, siendo no importante desagruparlo en cada una de estas tipologías.

## 9.2 VULNERABILIDAD SOCIAL

La vulnerabilidad social corresponde a las características psicológicas, sociales, económicas, políticas y culturales que condicionan el comportamiento preventivo y la capacidad de respuesta del grupo social para atender la emergencia, la rehabilitación y la recuperación. La VS es consecuencia directa del empobrecimiento, del incremento demográfico, de la urbanización acelerada y sin planificación.

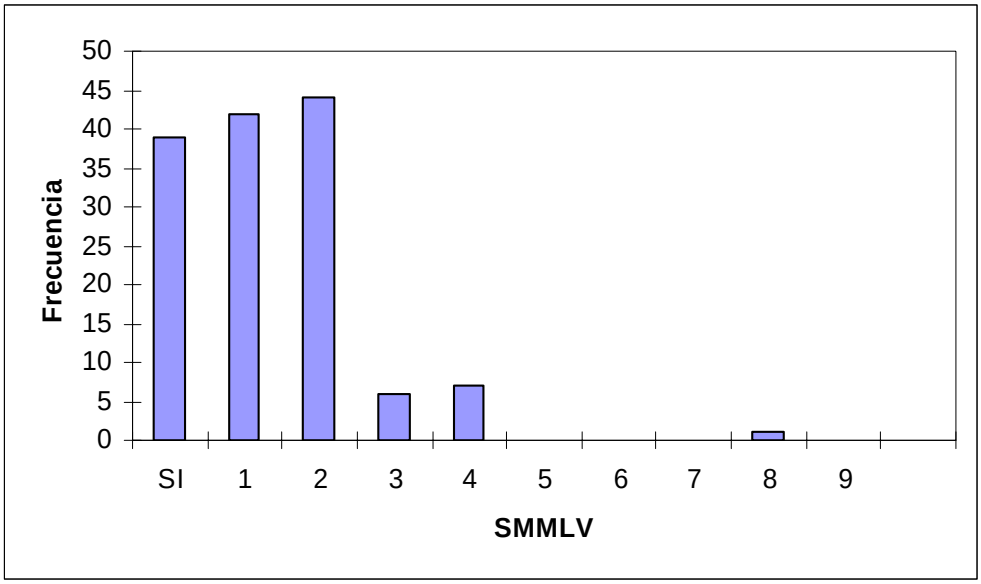
Existen comunidades que presentan una respuesta inmediata en condiciones aceptables pero a mediano o largo plazo no continúan dentro del proceso de consolidación de su línea base. De forma inversa pueden existir comunidades que pueden responder poco en forma inmediata pero a mediano y largo plazo pueden llegar nuevamente a su línea base en forma coherente y sin contratiempos. Más aun, comunidades pueden volver a su condición original o línea base, sin necesidad de recurrir a elementos externos o sin haber adoptado un programa lógico de retorno a la normalidad.

Para permitir evaluar este tipo de vulnerabilidad se recurre a los siguientes componentes:

- Capacidad económica: ingresos familiares
- Valor de bienes y enseres
- Valor de bienes inmuebles
- Cobertura de servicios
- Densidad poblacional - disgregación adulto - niño
- Percepción del riesgo
- Organizaciones cívicas

De acuerdo con los resultados de la encuesta ejecutada y los habitantes que respondieron los datos, se tiene que el ingreso mensual promedio de la población es del orden de 0.96 salarios mínimos mensuales, es decir aproximadamente $ 366.000 pesos. Los muebles y enseres en promedio cuestan del orden de $4.000.000 de pesos y la propiedad puede estar costando alrededor de $20.000.000 de pesos, según datos de la encuesta.

**Figura 9-2 Ingreso económico**




La densidad de población en el área de trabajo es del orden de 3.72 habitantes por vivienda, valor promedio para el existente en la ciudad y aceptable para el área habitable de las

viviendas. En general las comunidades residentes en el sector son familias con su núcleo familiar formado por padre, madre y de uno a tres hijos.

## 9.3 VULNERABILIDAD FÍSICA

La vulnerabilidad física se puede evaluar tomando en consideración aspectos sobre tipología de las viviendas, la cobertura de servicios públicos y la calidad de la construcción, en este último aspecto se puede incluso hablar de mantenimiento de construcción.

Con fines prácticos, para la elaboración de este trabajo, se optó por evaluar la vulnerabilidad de las viviendas a partir del grado de exposición de éstas ante el fenómeno amenazante (Índice de exposición IE) y del comportamiento de las construcciones en tal circunstancia (índice de resistencia).

Finalmente se conjugaron los índices antes descritos para estimar la vulnerabilidad física de las viviendas. Estas condiciones además deben tener un ajuste de las condiciones reales en el terreno y tácitamente el consultor debe evaluar los niveles de vulnerabilidad y considerarlos aceptables desde el punto de vista del análisis.

A continuación se realiza una descripción de cada uno de ellos y los valores asumidos en cada caso.

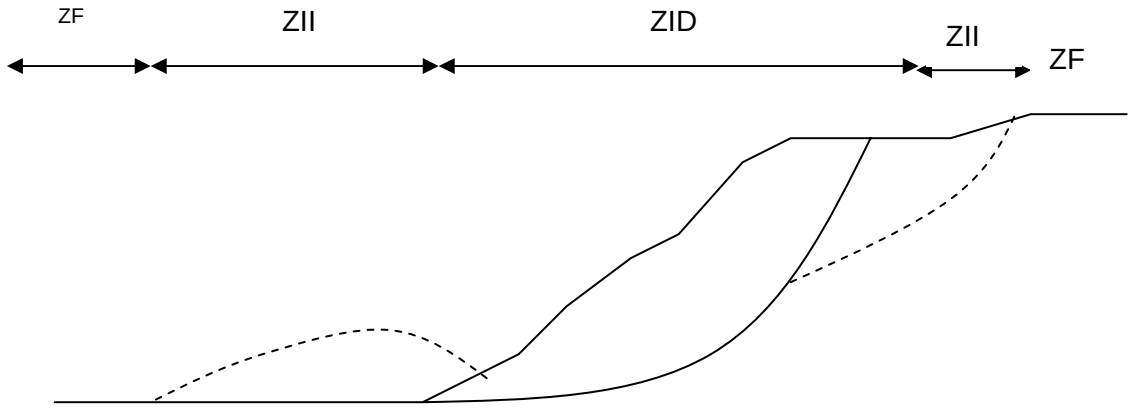
### 9.3.1 Índice de exposición

La determinación del índice de exposición involucró conocer el tipo de fenómeno a estudiar y su distribución espacial, en este último sentido todo movimiento está compuesto por tres grandes zonas que son: la zona de influencia directa (ZID) definida como aquella área en la que tiene lugar el movimiento, la zona de influencia indirecta (ZII) que corresponde a aquella que puede estar afectada por la masa deslizada por distancia de viaje o avance retrogresivo y una última denominada fuera de la zona de influencia (ZF) en donde no se espera ningún tipo de afectación.

De la evaluación geotécnica mencionada en capítulos anteriores y en función del análisis de estabilidad se determinaron las zonas críticas y que corresponden espacialmente de acuerdo a los niveles de amenaza planteados anteriormente. Es decir dentro de la zona del movimiento se califica como ZID, hacia atrás en una distancia asumida y coherente de avance retrogresivo del fenómeno como ZII y un avance hacia adelanta según los lineamientos dados por Finlay et all (1999) y caída de bloques y fuera de esta zona como ZF. Es importante mencionar que por la caida de bloques no se ve afectada ninguna vivienda y solo se considero su efecto por avance retrogresivo y franja de protección, dejando como ZID, 10 m arriba de la corona y 20 m ZII. Fuera de este margen no se considera influencia alguna de los fenómenos encontrados.

Las zonas de exposición de una vivienda se pueden evaluar siguiendo la condición dada en la Figura 9-3.

**Figura 9-3 Zonas de exposición para movimientos rotacionales**



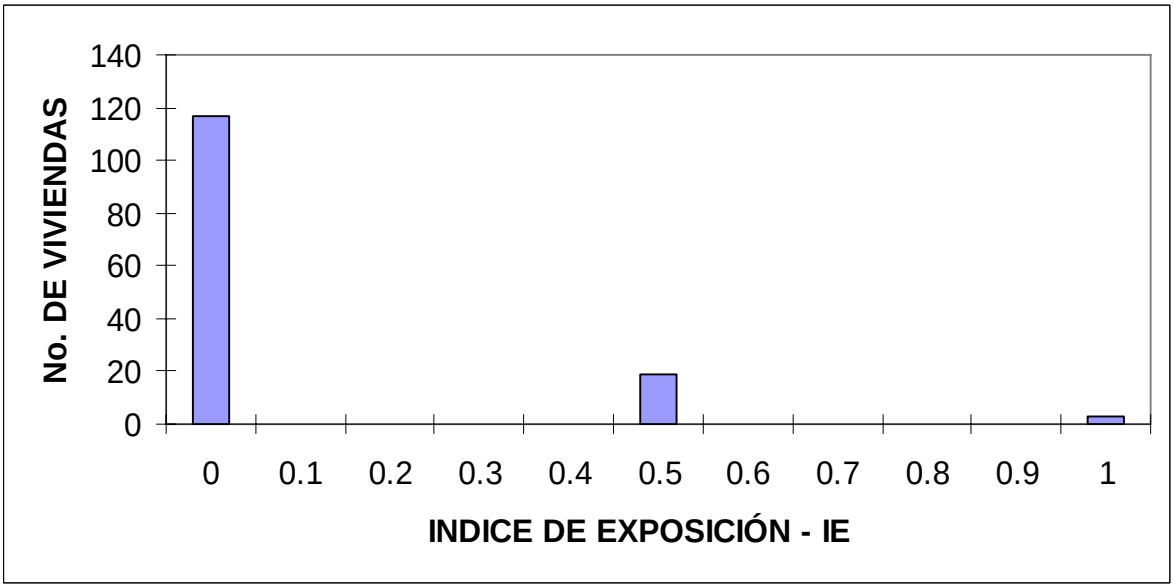

Finalmente, con base en la localización de las viviendas dentro de las área espacial de los movimientos se asignó el índice de exposición teniendo en cuenta que para un valor de IE=0 no existe influencia del movimiento y como IE=1.0 para viviendas ubicadas exactamente y con influencia directa sobre el movimiento. En la tabla siguiente se presenta el valor adoptado para cada área mencionada anteriormente.

**Tabla 9-1 Índice de exposición en función de la zona de influencia**

| Zona de influencia | IE (Índice de Exposición) |
|---|---|
| ZID | 1.00 |
| ZII | 0.50 |
| ZF | 0.0 |

En la Figura siguiente se presenta el análisis para las diferentes viviendas de estudio y su asignación del valor de exposición:

**Figura 9-4 Índice de exposición**




### 9.3.2 Índice de resistencia (IR)

La resistencia de una vivienda se entenderá como su competencia estructural, CE, la cual es función a su vez de algunas variables indicadoras de calidad. Dichas variables debidamente calificadas de acuerdo con los criterios señalados como 1 para la condición más favorable y 3 para la más desfavorable), permiten su conjugación mediante las pautas expuestas para la determinación de CE. En la tabla siguiente se presentan los indicadores para calcular el valor de CE.

**Tabla 9-2 Criterios para la calificación de los indicadores de competencia estructural**

| VARIABLE | PARAMETRO | DESCRIPCIÓN | CALIFICACIÓN |
|---|---|---|---|
| V-1 | Edad de la construcción | 1. Posterior a 1998 | 1 |
| | | 2. Entre 1984 y 1998 | 2 |
| | | 3. Anterior a 1984 | 3 |
| V-2 | Tipo de cimentación | En general buena calidad | 1 |
| V-3 | Estructura de la placa de piso | 1. Concreto reforzado | 1 |
| | | 2. Mortero | 2 |
| | | 3. Madera | 3 |
| | | 4. Tierra | 3 |
| | | 5. otro | 3 |
| V-4 | Estructura de soporte de la cubierta | 1. Concreto reforzado | 1 |
| | | 2. Metálica | 1 |
| | | 3. Madera | 3 |
| | | 4. Recuperación | 3 |
| | | 5. Mampostería u otro | 3 |
| V-5 | Cubierta | 1. teja de barro | 3 |
| | | 2. Asbesto – cemento | 2 |
| | | 3. Zinc | 2 |
| | | 4. Recuperación | 2 |
| | | 5. Otro | 2 |
| V-6 | Sistema estructural | B1 - Pórtico | 1 |
| | | B3 - Mampostería estructural | 1 |
| | | B4 - Muro no estructural de bloque | 2 |
| | | B5 - Muro no estructural de ladrillo | 2 |
| | | Sistema estructural diferente | 3 |
| V-7 | Daños en elementos estructurales. Sumatoria de las evaluaciones en cada elemento | Menor que 10 | 1 |
| | | Entre 10 y 20 | 2 |
| | | Mayor que 20 | 3 |

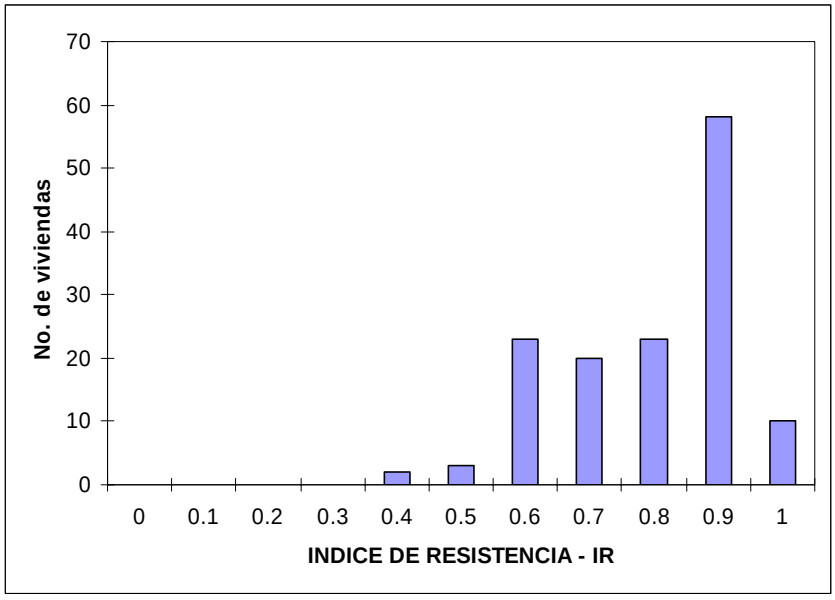
| VARIABLE | PARAMETRO | DESCRIPCIÓN | CALIFICACIÓN |
|---|---|---|---|
| V-8 | Condición del suelo de fundación | 1. Roca | 1 |
| | | 2. Firme | 1 |
| | | 3. Medio | 2 |
| | | 4. Blando | 3 |
| | | 5. relleno | 3 |

El valor del índice de resistencia se calcula como:

$$IR = 1 \text{ para } CE < 10$$
$$IR = -0.07 * CE + 1.65 \text{ para } 11 < CE < 24$$
$$IR = 0 \text{ para } CE = 24$$

El análisis de viviendas y al análisis de campo desarrollado según el formato de inventario de viviendas de la DPAE se presenta en la Figura siguiente:

**Figura 9-5 Índice de resistencia – IR**



### 9.3.3 Índice de Vulnerabilidad física

Con los Índices de resistencia y exposición encontrados anteriormente, se calculó la resistencia movilizada (RM) que es una expresión de los posibles daños provocados al elemento expuesto por un fenómeno, para lo cual se buscó una ecuación que cumpliera con las siguientes condiciones:

- Cuando IE= 0, RM=0
- Cuando IE= 1, RM=1
- Para cualquier valor de IR e IE, 1>RM>0

Pueden existir innumerables funciones que cumplan con las anteriores condiciones, sin embargo para fines prácticos se adaptó la ecuación propuesta por INGEOCIM (1998), reemplazando el índice de vulnerabilidad por deslizamientos IVD, por RM y el índice de vulnerabilidad física IVF por el índice de exposición IE:

$$RM = \left[1 - (IR)^{IE}\right]^{1-IE}$$

Donde:

RM: resistencia movilizada

IR: Índice de resistencia

IE: índice de exposición

De esta manera se estableció un paralelo entre la RM y la matriz de daño presentada por el DRM (Delégation aux Risques Majeurs) que se presenta en la Tabla 9-3 y que involucra el tipo y la magnitud del evento y la solicitación de los elementos, mediante la ecuación:

$$InD = 1 + 4 \times RM$$

En la que definiendo como índice de daño InD=1 equivale a daños leves (I) y una InD=5 (V) que es la máxima, corresponde a daños severos. Las descripciones de la intensidad de daños del DRM se dan en la tabla siguiente:

**Tabla 9-3 Evaluación del nivel de daño**

| CALIFICACIÓN | TIPO DE DAÑO | % DE DAÑO | InD |
|---|---|---|---|
| I | Daños ligeros no estructurales. Estabilidad no afectada | 0.055 | 1 |
| II | Fisuración en paredes. Reparaciones no urgentes | 0.115 | 2 |
| III | Deformaciones importantes. Daños en elementos estructurales | 0.500 | 3 |
| IV | Fracturación de la estructura | 0.750 | 4 |
| V | Desplome parcial o total de la estructura | 0.950 | 5 |

Con esta tabla se estableció el índice de daño, ID que sería un equivalente del Índice de Vulnerabilidad Física si la confiabilidad de los datos fuera del 100%. De acuerdo a las condiciones propias del presente estudio, se asumió que ésta es del 90%, lo cual índica que:

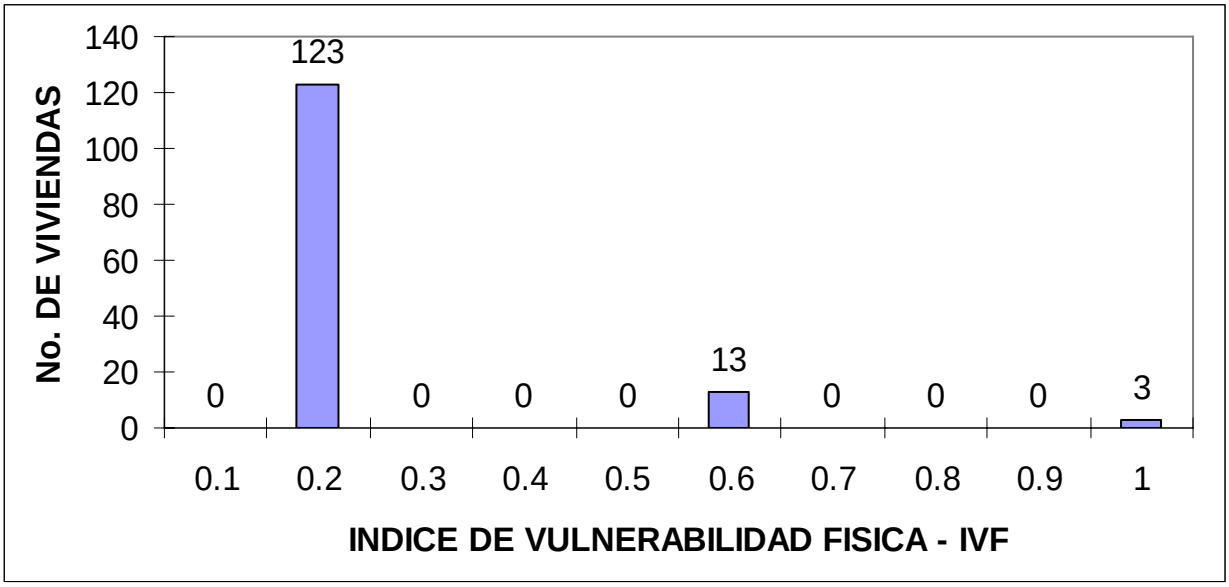
$$IVF = ID / CfF$$

Donde:

CfF: coeficiente de confiabilidad = 0.9

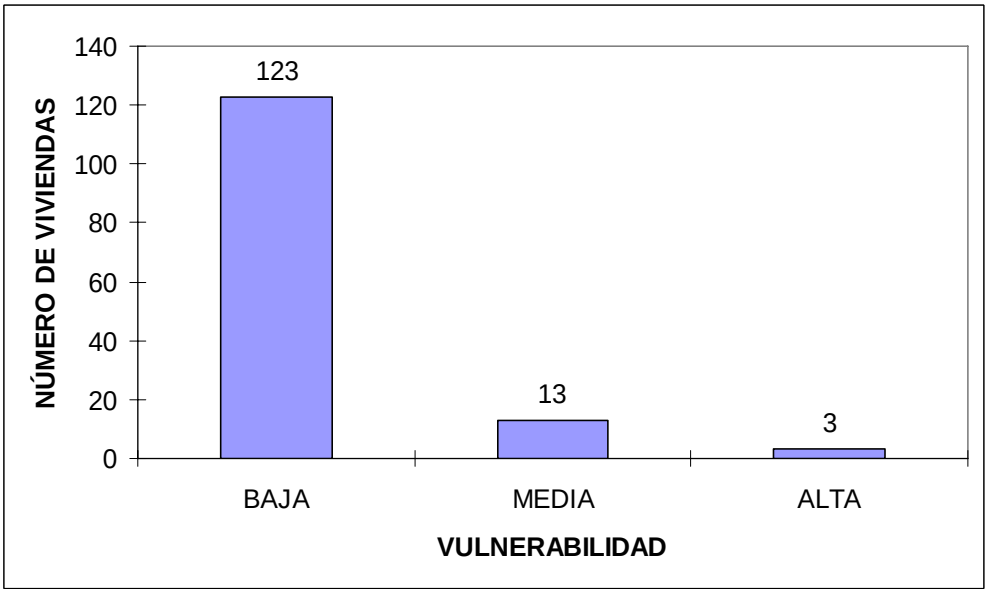
Así el IVF, grado de vulnerabilidad se dividió en tres grupos como se presenta en la figura siguiente y que define el nivel de vulnerabilidad de las viviendas:

**Figura 9-6 Índice de vulnerabilidad física**




En el Plano 9-2, se presenta los niveles de vulnerabilidad obtenidos para el área de estudio. En total son 123 en vulnerabilidad baja, 13 en vulnerabilidad media y 3 son de vulnerabilidad alta.

**Figura 9-7 Vulnerabilidad en viviendas**



# ANEXO F 1 INVENTARIO DE CAMPO DE VIVIENDAS

**Plano 9-1 Tipología de viviendas**

**Plano 9-2 Vulnerabilidad por FRM**

# 10. ANÁLISIS DE RIESGO

## 10.1 INTRODUCCIÓN

El riesgo puede definirse como el conjunto de daños y perdidas que pueden presentarse en caso de ocurrir un desastre o una emergencia. A continuación se presentará una valoración del riesgo desde el punto de vista de pérdidas económicas.

Para el cálculo de los valores comparables de costos y beneficios se utiliza el valor medio probable, en función de la esperanza matemática de ocurrencia de los fenómenos potencialmente destructivos que generarían más daños "d" y la probabilidad respectiva asociada "p" de modo que el valor estimado sería:

$$PE = d \times p$$

En donde:

PE: porcentaje de perdida esperada en la ventana de tiempo (escenario actual).

d: porcentaje de daño asociado a la resistencia y exposición del elemento.

p: probabilidad asociada al FRM potencialmente destructivo

## 10.2 ANÁLISIS

De acuerdo a esto, se realiza los cálculos respectivos teniendo en cuenta los rangos dados de probabilidad de amenaza, así como los % de daño.

**Tabla 10-1 Matriz de valoración del riesgo (perdida esperadas %)**

| InD | % DE DAÑO | PROBABILIDAD DE AMENAZA | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1.00 - 0.40 | 0.40-0.12 | 0.12-0.00 |
| 1 | 0.055 | 0.055 | 0.022 | 0.0066 |
| 2 | 0.115 | 0.115 | 0.046 | 0.0138 |

| InD | % DE DAÑO | PROBABILIDAD DE AMENAZA | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1.00 - 0.40 | 0.40-0.12 | 0.12-0.00 |
| 3 | 0.500 | 0.50 | 0.20 | 0.060 |
| 4 | 0.750 | 0.75 | 0.20 | 0.090 |
| 5 | 0.950 | 0.95 | 0.38 | 0.114 |

InD: Índice de daño definido en capítulo 9.

De acuerdo a esta matriz y manteniendo los valores con coherencia de solicitación de la vivienda existentes se asignan los siguientes valores de pérdida asociada a las viviendas de acuerdo a la valoración planteada anteriormente.

Riesgo bajo 0.00 – 0.11

Riesgo medio 0.11 – 0.30

Riesgo alto: 0.30 – 1.00

Para estos valores dados y teniendo en cuenta el valor del elemento expuesto (vivienda), se calcula el riesgo para las viviendas como:

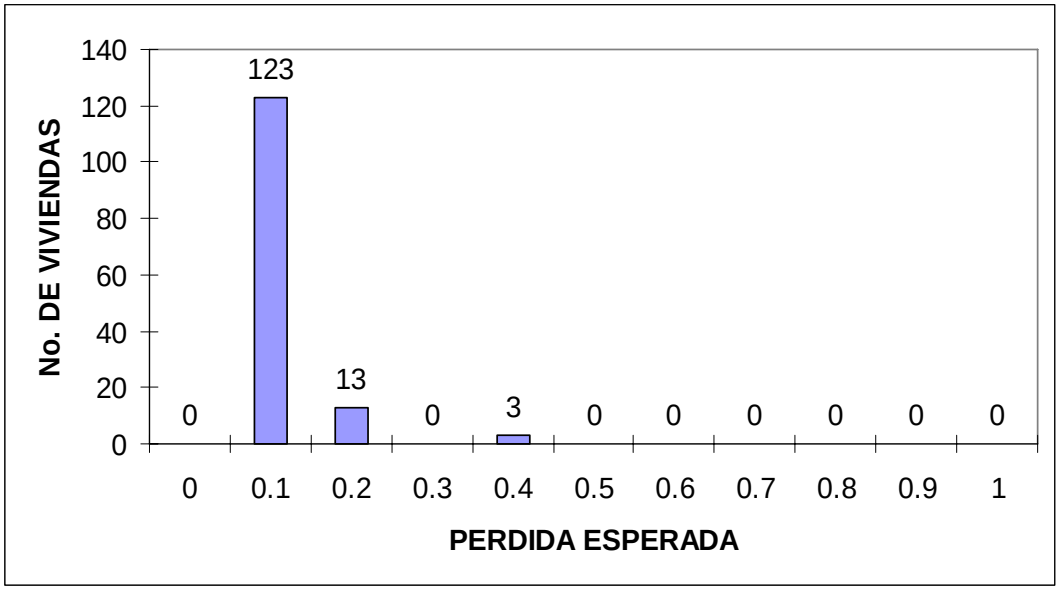
$$RIESGO = PEV \times Vs$$

PEV: Perdida esperada de una vivienda.

Vs: Valor de las vivienda en pesos (millones)

La aplicación de la matriz anterior sobre las viviendas resulta los siguientes resultados presentados en la Figura siguiente:

**Figura 10-1 Pérdida esperada (%) – viviendas**




En total se calcularon 123 predios en riesgo bajo, 13 predios en riesgo medio y 3 predios en riesgo alto los cuales son:

| MANZANA | LOTE |
|---|---|
| B | 3 |
| B | 4 |
| E | 7 |

En el Plano 10-1 Riesgo por FRM se presenta la sectorización por riesgo.

Aun cuando en el análisis no se incluyó elementos de infraestructura, es necesario mencionar que existen hacia la parte superior elementos como tuberías de drenaje y postería los cuales se ubican en riesgo alto por la pérdida esperada si el talud falla. Así como hacia la parte inferior, para la vía existente si existen el elementos móviles como personas o la misma vía.

## Plano 10-1 Riesgo por FRM

# 11. ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN

## 11.1 ALTERNATIVAS PLANTEADAS

El análisis planteado anteriormente de amenaza, vulnerabilidad y riesgo presenta como resultado la existencia de tres viviendas en alto riesgo, las cuales son afectadas bajo el siguiente esquema:

- Vivienda E-7. Se ubica en la parte superior del área de estudio. La afectación existente hace parte de la posibilidad de pérdida de soporte por caída de bloques, ya que se ubica en la parte superior del escarpe. La altura de este escarpe y su entorno genera distancias de desplazamiento bajas a medias. El sitio de estudio de escarpe se encuentra ubicado en un predio privado y su intervención o mitigación del problema debe ser realizado por el propietario del lote. Este propietario debe contemplar la construcción de un muro en concreto, eliminando potenciales bloques y confinando la posibilidad de perdida de soporte y posterior caída de bloques. Las entidades distritales de control deben verificar las condiciones del muro de confinamiento y su aprobación bajo el esquema de la resolución 364 emanada por el distrito si es el caso. En el plano catastral se incluye este sitio como amenaza alta. Este punto no fue tratado en este capítulo.

- Vivienda B-3 y B-4. El problema de esas viviendas esta orientado hacia el movimiento rotacional probable sobre suelos residuales de arcillolita (Zona 4-A). Aunque la superficie de falla generada es superficial y su avance retrogresivo considerado es bajo a medio, el consultor contempló una franja importante de afectación teniendo en cuenta que hacia el escarpe existen lotes no urbanizados los cuales deben controlarse desde el punto de vista de la intervención antrópica del talud como puede ser aguas servidas, cimentación incompletas o rotura de suelo – roca para cimentación que pueden inestabilizar el talud. Estos lotes no incluidos dentro del análisis de riesgo (vulnerabilidad nula) tácitamente son incluidos en el análisis con el fin de que posteriormente puedan ser construidos. La principal variable actualmente de inestabilidad es el agua, parámetro que ha venido afectando el escarpe minero con procesos de erosión en surcos y cárcavas. Hacia la Zona – 1 y Zona -2 se presenta caída de bloques, situación que afectaría hacia la parte inferior del talud a personas que transitan por esta área. Estas zonas deben ser protegidas con el fin de evitar procesos retrogresivos posteriores y/o afectación directa a las personas del barrio. Estas zonas serán intervenidas y controladas con medidas de mitigación.

Finalmente, las obras de mitigación están orientadas a proteger esta ladera en cuanto al desplazamiento de bloques, manejo de drenaje superficial y protección de taludes para evitar procesos erosivos adicionales a los existentes.

A continuación se hace una descripción de las diferentes alternativas de mitigación que pueden reducir el riesgo por fenómenos de remoción en masa en el sitio de estudio las cuales se presentan en la Figura 11-1.

- ALTERNATIVA 1: Convivir con el problema.

LA DPAE puede asumir el riesgo y no construir ninguna obra de mitigación. Involucra el costo de daño en este caso de 2 viviendas y de personas que transiten en la zona, valor que es difícil de cuantificar. Por ello se considera para el análisis como el 100% del daño del valor probable de la estructura (valor promedio de estructura de $20.000.000), una inversión en obras de recuperación estimada en un 75% del promedio de las obras civiles planteadas inicialmente como alternativas.

Para todas las alternativas que a continuación se detalla se diseñara en la parte superior del talud una cuneta la cual debe entregar hacia la parte inferior de la ladera, drenando las aguas de escorrentía superficial que vienen de la parte superior de la ladera. De la misma forma en todas las alternativas debe incluirse la construcción de subdrenes en el contacto de arenisca – arcillolita con el fin de drenar las aguas infiltradas evitando la saturación de la masa.

- ALTERNATIVA 2: Obras de drenaje superior+malla con cespedón+muro en gavión.

Esta medida será compartida con la construcción de un muro en gavión de 2,0 m de alto que protegerá de la posibilidad de avance de bloques caídos. En la zona de suelo residual se protegerá con malla, cespedón y taches largos que confinen la caída de bloques y/o material de suelo más no impedir el movimiento.

- ALTERNATIVA 3 Obras de drenaje superior+malla con cespedón+arborización

Similar a la alternativa anterior pero se cambiaria la construcción del muro en gavión por arborización de protección. Es importante mencionar que a pesar de que se siembren árboles que tengan una dimensión en su tronco de más de 1,0 m el proceso de crecimiento puede conllevar a asumir un riesgo adicional en el tiempo frente a la vía y las personas que transiten en el área, además de incluir el mantenimiento en el tiempo de los árboles.

- ALTERNATIVA 4 Obras de drenaje superior+malla con cespedón / mortero+arborización

Similar a la alternativa anterior pero se incluiría a lo largo del talud la construcción de la malla con cespedón en la zona 4-A y malla con mortero en la zona 1 y 3. En la parte inferior solo se colocaría arborización de protección.

En la tabla siguiente se presenta el análisis de costos de cada una de las alternativas planteadas (valores y cantidades aproximados para el análisis).

Es importante mencionar que no se incluye el costo de mantenimiento de las obras en razón a que la DPAE no tiene un programa sistemático de este tipo. Actualmente se realiza un proyecto de diagnóstico de obras realizadas por la DPAE para valorar el estado y realizar el diseño de las obras de mantenimiento.

**Tabla 11-1 Estimativo de costos de alternativas**

| ALTERNATIVA | ITEM | Unidad | Cantidad | Valor unitario | Valor total |
|---|---|---|---|---|---|
| **1. Convivir con el problema** | Daños en las estructuras | Vivienda | 2 | $ 20,000,000 | $ 40,000,000 |
| | 75% obras de mitigación por reconstrucción de la zona | Global | 1 | $ 29,940,000 | $ 29,940,000 |
| | TOTAL | | | | $ 69,940,000 |
| **2. Obras de drenaje+malla cespedon y muro en gavión** | Muro en gavión | $m^3$ | 120 | $ 130,000 | $ 15,600,000 |
| | Arborización | un | 20 | $ 100,000 | $ 2,000,000 |
| | Caja de inspección | un | 3 | $ 220,000 | $ 660,000 |
| | Cuneta en concreto | ml | 150 | $ 35,000 | $ 5,250,000 |
| | Malla cespedón | $m^2$ | 400 | $ 35,000 | $ 14,000,000 |
| | Subdrenes cortos | ml | 25 | $ 250,000 | $ 6,250,000 |
| | TOTAL | | | | $ 43,760,000 |
| **3. Obras de drenaje+malla cespedón y arborización** | Arborización | un | 100 | $ 100,000 | $ 10,000,000 |
| | Caja de inspección | un | 3 | $ 250,000 | $ 750,000 |
| | Cuneta en concreto | ml | 150 | $ 35,000 | $ 5,250,000 |
| | Malla cespedón | $m^2$ | 400 | $ 35,000 | $ 14,000,000 |
| | Subdrenes cortos | ml | 25 | $ 250,000 | $ 6,250,000 |
| | **TOTAL** | | | | $ 36,250,000 |
| **4. Obras de drenaje+malla cespedón / mortero** | Arborización | un | 100 | $ 100,000 | $ 10,000,000 |
| | Caja de inspección | un | 3 | $ 250,000 | $ 750,000 |
| | Cuneta en concreto | ml | 150 | $ 35,000 | $ 5,250,000 |
| | Malla cespedón | $m^2$ | 400 | $ 35,000 | $ 14,000,000 |
| | Malla mortero | $m^2$ | 100 | $ 35,000 | $ 3,500,000 |
| | Subdrenes cortos | ml | 25 | $ 250,000 | $ 6,250,000 |
| | **TOTAL** | | | | $ 39,750,000 |

**Figura 11-1 Alternativas de mitigación**

## 11.2 ANÁLISIS DE AMENAZA CON OBRAS

Con el fin de evaluar las condiciones esperadas de amenaza con la ubicación de las alternativas de mitigación mencionadas anteriormente, se menciona que las alternativas 2 a 4 buscan impedir el drenaje hacia el escarpe y además contener la caída de materiales. Para esto se tienen los siguientes comentarios:

**Alternativa 2 y 3.**

Contempla la ubicación de un muro en gavión y/o arboles en los sitios de caída de bloques, Zona 1 y 2 y malla con cespedón en la zona 4-A. Esta alternativa permitirá el desplazamiento del bloque hasta una distancia tal que no permita la afectación. Se chequeo la validez de la alternativa desde el punto de vista de probabilidad de número de bloques caídos, la distancia de viaje con el programa CRSP y altura de salto del bloque determinándose que ningún bloque logra continuar fuera de la obra de retención. La altura máxima esperada en este punto es del orden de 50 cm. Además, la obra se ubica en promedio dentro de la zona calculada como amenaza alta, que concluye como la zona donde la probabilidad de caída de bloques es mayor y la probabilidad por FS es más alto.

Es decir, aun cuando el mecanismo de falla es posible y se mantiene la probabilidad por tipo de falla, la distancia de viaje obtenida máxima será solo hasta la ubicación de la obra.

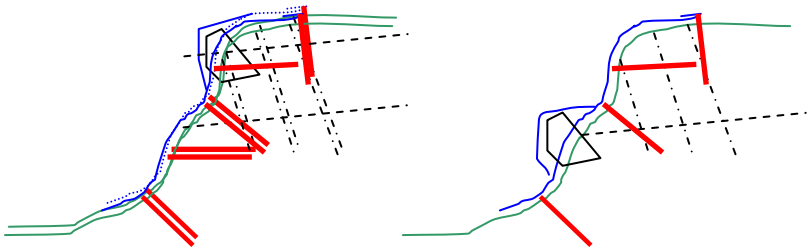
Hacia fuera de esta obra en el sentido estricto no se debe considerar la existencia de la amenaza, es decir amenaza nula (no existe posibilidad de que algún bloque pueda continuar ya que el 100% del total de bloques no pasa). Pero el consultor considera que la estructura pueda perder su integridad debido a excavaciones de la gente o por ausencia de mantenimiento y de esta forma fuera del área de la obra, la probabilidad de que pase un bloque pede existir pero sigue siendo baja, por lo tanto se ubica en zona de amenaza baja y hasta la distancia máxima calculada en el capítulo de amenaza.

En la zona 4-A que corresponde a malla con cespedón se colocará subdrenes que permitirá evitar la saturación del material de suelo residual. Hacia la parte superior se evitará procesos erosivos con la colocación de la cuneta la cual se ubica en el borde superior de la amenaza alta. Con esta nueva condición pasara a amenaza media. La posibilidad de desprendimientos de material se verá reducida con la colocación de un sistema de taches que confinaran el material con la malla. El factor de seguridad aumenta en razón a que los parámetros geomecánicos mantienen sus propiedades sin degradación por el agua.

**Alternativa 4**

Se considera que el diseño contemplado permitirá el movimiento de un bloque con una probabilidad de falla de 0.30 (dado en la sección siguiente) para la malla triple torsión en la zona de caída de bloques. Esta probabilidad permite determinar que los bloques pueden desplazarse hasta cierta distancia que corresponde en este caso hasta el borde inferior de ubicación de la

malla, el cual considera la pérdida continua de anclaje desde la parte superior hasta el anclaje diseñado en la parte inferior del talud. El mecanismo de falla puede presentarse pero la distancia de viaje se limita hasta el borde inferior por el diseño de la obra alrededor de la malla eslabonada. Además con el recubrimiento se impide en un gran porcentaje el corte por vandalismo.



(a) Talud con anclajes y malla mortero.

(b) Pérdida del primer anclaje y desconfinamiento del primer bloque. La malla soporta el bloque con el primer y tercer anclaje

(c) Perdida del cuarto anclaje y desconfinamiento del bloque. La malla soporta el bloque con el tercero y último bloque.

**Figura 11-2- Esquema de perdida de soporte de la malla triple torsión**

En la Figura 11-4 se presenta la zonificación de amenaza para la alternativa 4 seleccionada y de acuerdo al análisis dado anteriormente.

## 11.3 MODELO DE DECISIÓN

La implementación de un modelo de decisión probabilístico, permite al diseñador seleccionar entre múltiples alternativas de solución, sin caer en un marco subjetivo donde predomine el juicio del experto. Dichos modelos están basados en un análisis comparativo entre el nivel de riesgo alcanzado por una medida de mitigación y el costo esperado en pesos para la misma.

De esta forma se adoptó como modelo de decisión el propuesto por Wu et al (1996) el cual establece:

$$R = Pf * Cf$$

Donde:

R: riesgo asumido

Pf: amenaza o probabilidad de falla de un talud y

Cf: Consecuencia o costo de falla.

Finalmente, se calcula el beneficio obtenido de cada alternativa, tomando como referencia el riesgo asumido ante la solución "convivir con el problema así:

$$BE = RACP / RA$$

Donde:

BE: Beneficio obtenido

RA: Riesgo Asumido

RACP: Riesgo asumido alternativa "convivir con el problema.

El cálculo del beneficio se calcula para cada tipo de riesgo asumido, es decir si falla o no falla el sistema con el fin de poderlo comparar y obtener el beneficio particular. En este caso si el beneficio para la condición de falla es superior al 100% se mejora la condición. Es decir si llega a fallar el valor total de daños esperados por esta falla generara un beneficio superior al respecto de la alternativa de convivir con la situación. Entre más se aleje de la condición del 100% la alternativa a ejecutar presenta mejores beneficios para el sitio.

COSTO DE FALLA

El costo de falla referido en el ítem anterior se obtiene como la sumatoria de todos los costos probables en los que se puede incurrir en el evento en que se presente la falla, se halla o no aplicado la obra de mitigación.

En este caso particular, la ocurrencia de un FRM dará lugar a los siguientes costos:

- Pérdida de la inversión inicial
- Retiro de material deslizado
- Reconformación de taludes
- Aplicación de obras civiles cuando estas aun no ha sido aplicadas.
- Reparación y/o ejecución de obras de ejecutados.

Para establecer el costo de cada uno de los ítems anteriores se adoptaron los siguientes criterios:

- Involucra el costo de daño de la edificación en caso de falla del talud, considerado como el 50% del valor probable de la estructura

- Inversión en obras de recuperación estimada en un 75% del promedio de las obras civiles planteadas inicialmente como alternativas.

## 11.4 PROBABILIDAD DE FALLA

Se analiza de la siguiente forma:

- Para la alternativa 2, 3 y 4 que consta de obras de drenaje se consideró que el factor de seguridad mínimo será en condición de parámetros de cohesión y fricción sin agua. Es decir para las condiciones sin agua la situación de parámetros mínimos que obedecen a una condición saturada residual no se presenta. El análisis de probabilidad bajo este concepto tuvo en cuenta que los factores de seguridad obtenidos con agua no existirán y que el valor de obtenido de probabilidad estará condicionado a una condición de $c_{max}$-$\phi_{max}$ y $c_{max}$ - $\phi_{min}$.

- Para el valor de probabilidad de las alternativas 2 y 4 se tomo el mayor valor de los diferentes procesos existentes en la zona 1, 4-A y 2 y que oscilaba ente 0.25 y 0.30 incluyendo los eventos de caída de bloques y movimiento rotacional. Los factores de seguridad con agua son los mismos obtenidos sin agua y de esta forma se calcula la probabilidad total del fenómeno.

- Para el caso de la alternativa 3, en donde la protección con árboles no es infalible se asume un valor de 0.50 de efectividad de la obra y un valor de probabilidad de falla de 0.50 teniendo en cuenta el tiempo de crecimiento, el proceso de mantenimiento y la permanencia en la zona, lo que podría aumentar la probabilidad de 0.30 a 0.50, mayor al obtenido para la alternativa 2 y 4.

En la Tabla 11-2 se presenta los valores de probabilidad total obtenidos para cada tipo de FRM ejecutando las obras planteadas en la alternativa 2 y 4.

**Tabla 11-2Probabilidades de falla total**

| FALLA EN CUÑA TALUD 1.1 | | |
|---|---|---|
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.03 | 0.29 |
| **NORMAL** | 0.03 | 0.29 |
| **WEIBULL** | 0.03 | 0.29 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 1.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.03 | 0.29 |
| **NORMAL** | 0.03 | 0.29 |
| **WEIBULL** | 0.03 | 0.29 |
| **FALA EN CUÑA TALUD 1.4** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **NORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **WEIBULL** | 0.04 | 0.31 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 2.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **NORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **WEIBULL** | 0.04 | 0.31 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 2.2** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.03 | 0.31 |
| **NORMAL** | 0.03 | 0.31 |
| **WEIBULL** | 0.03 | 0.31 |
| **FALLA EN CUÑA TALUD 3.3** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **NORMAL** | 0.04 | 0.31 |
| **WEIBULL** | 0.04 | 0.31 |
| | | |
| **FALLA PLANAR TALUD 1.5** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **NORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **WEIBULL** | 0.00 | 0.00 |
| **FALLA PLANAR TALUD 3.3** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **NORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **WEIBULL** | 0.00 | 0.00 |

TALUDES EN ROCA

| SECCIÓN 3-3 SUELO RESIDUAL DE ARCILLOLITA | | |
|---|---|---|
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.01 | 0.27 |
| **NORMAL** | 0.03 | 0.28 |
| **WEIBULL** | 0.00 | 0.25 |
| **SECCIÓN 2-2 TALUS** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **NORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **WEIBULL** | 0.00 | 0.00 |
| **SECCIÓN 2-2 RELLENO PARTE INFERIOR** | | |
| **DISTRIBUCIÓN** | **TOTAL** | ***LARGO PLAZO*** |
| **LOGNORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **NORMAL** | 0.00 | 0.00 |
| **WEIBULL** | 0.00 | 0.00 |

TALUDES EN SUELO

Los valores de probabilidad obtenidos finalmente para el análisis se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 11-3 Probabilidades de falla total**

| Alternativa | Probabilidad de falla total, Pft |
|---|---|
| 1 | 0.74 |
| 2 | 0.30 |
| 3 | 0.50 |
| 4 | 0.30 |

Es importante mencionar que para el análisis de costo de falla para la alternativa 2 a 4 se tuvo en cuenta un valor de 0.10 de probabilidad de falla por efectividad de la alternativa teniendo en cuenta que el sistema no es infalible y por ello el consultor adopta en forma conservadora para el análisis un valor de efectividad de la medida de 0.90 a implementar.

## 11.5 RESULTADOS

De acuerdo a los beneficios obtenidos sumando el cálculo para condición en falla en cada alternativa y comparando con la alternativa No. 1 se tienen los siguientes resultados:

| Alternativa | Beneficio (%) |
|---|---|
| 1 | 100 |
| 2 | 394 |
| 3 | 286 |
| 4 | 434 |

Se puede observar que la alternativa que genera mayores beneficios a la zona es la alternativa No. 4 con malla cespedón y malla con mortero. Es importante anotar que aunque el evento esta confinado a la malla, la probabilidad asumida es adecuada al limitarse por las condiciones de drenaje, obras que son contempladas en todas las alternativas. Las alternativas 2 y 4 presentan un beneficio similar, pero la construcción de un muro en gavión limitaría el espacio de movilidad de las personas ubicadas en el área de estudio.

La Figura 11-3 presenta los resultados del árbol de decisión para cada una de las alternativas y análisis planteado anteriormente.

## Figura 11-3 Árbol de decisión. Alternativas de mitigación

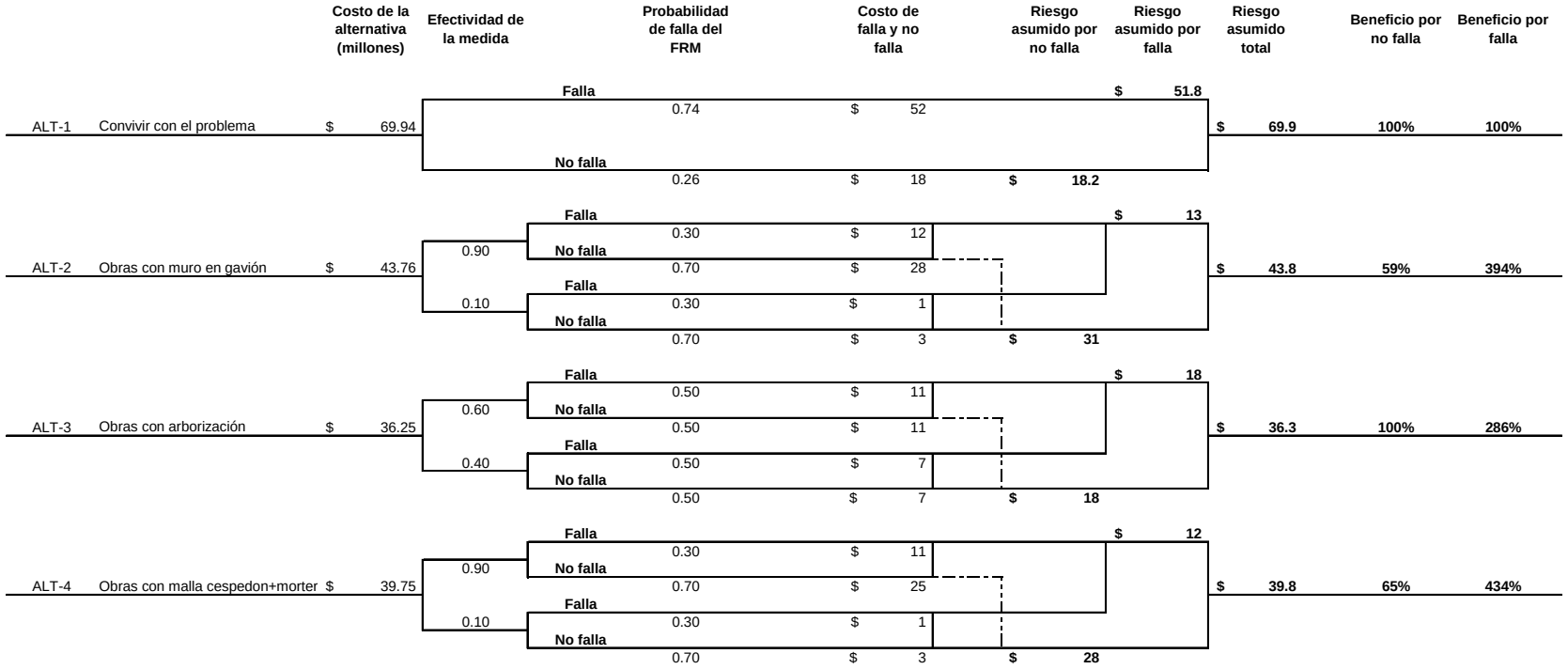


**Figura 11-4 Zonificación de Amenza por FRM con obras**

# 12. OBRAS DE MITIGACIÓN

## 12.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

De acuerdo a la elección de la alternativa de diseño dada en el capítulo 11 que corresponden a malla pernada con mortero y malla con cespedón, se realizó visita de campo con el fin de ajustar las cantidades de obra y los detalles que deben ser considerados en el diseño final. De acuerdo a la zonificación por amenaza, se desarrollaran las obras en tres zonas: zona 1 y 2 que corresponde a caída de bloques y zona 4-A que corresponde a movimiento rotacional en suelos residuales de arcillolita y arcillolita. Cada tipo de obra de mitigación corresponde al tipo de fenómeno enunciado.

Para cada una de estas zonas se realizó una sección de detalle que permitiera calcular en forma más acertada las cantidades de obra y definiera en campo el manejo constructivo de la obra.

Para la longitud y orientación de los anclajes se tuvo en cuenta la distancia máxima de discontinuidad dada por el geólogo de acuerdo a los trabajos de campo (1,0 m), la geometría de la falla típica obtenida de los análisis (la falla en cuña y planar es la típica a lo largo de la zona 1 y zona 2) así como la orientación conveniente a nivel constructivo. De acuerdo a estas consideraciones la longitud de anclaje considerada de 3,0 m generará soporte a dos superficies de discontinuidad, suficiente para las consideraciones de la zona.

El diseño se acompaño además de la ubicación de obras de drenaje, arborización (los cuales incorporarían la zona urbanisticamente y servirían de apoyo a posibles caídas de bloque en el evento de que se rompa la malla o se degrade por falta de mantenimiento).

Los análisis y cálculos hidráulicos se encaminaron al diseño de la cuneta que impida la llegada del agua de escorrentía generada por la lluvia hasta el talud erosionado. La alternativa seleccionada consiste en un canal interceptor localizado a 3 metros, aproximadamente del borde del barranco, el cual entrega las aguas a un sumidero desde el cual se conduce mediante tubería de gres al pozo de inspección del alcantarillado pluvial, tal como se muestra en el Plano.

Los cálculos realizados llevaron a la selección de un canal rectangular en concreto, de sección 0,20 por 0,20 metros, con pendiente constante de 0,4 %, el cual, con borde libre de 0,08 metros permite conducir el caudal calculado antes, de 19 l / s.

Igualmente se calculó la capacidad del sumidero y de la tubería de conducción desde éste hasta el pozo de inspección de la red de alcantarillado.

## 12.2 PRECIOS UNITARIOS

En el ANEXO G se presenta los precios unitarios calculados que incluyen:

Localización y replanteo

Retiro de bloques

Empradización con malla

Plantación de árboles

Cuneta en concreto

Sumidero

Tubería de gres de 6”

Excavación manual en material común (acarreo 10 km)

Anclaje con varilla

Malla hexagonal de triple torsión de 10x 12” diámetro 2.7 mm, mortero 1:6

Mortero de recubrimiento

Dren horizontal $\phi$=6”

Aseo general

## 12.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En el ANEXO G se presenta las especificaciones técnicas de la obra que incluye:

Cunetas en concreto

Empradización

Arborización

Malla hexagonal de triple torsión

Localización y replanteo

Excavación en material común

Anclajes con varillas

Plantación de árboles

Sumidero

Drenes horizontales

## 12.4 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO

En la Tabla 12-1 se presenta el presupuesto para la alternativa de diseño. Las obras planteadas se muestran en el Plano 12-1.

## Tabla 12-1 Presupuesto

| DESCRIPCION | UNID | CANT. | VALOR UNITARIO $ | VALOR/TOTAL $ |
|---|---|---|---|---|
| **ZONA 1** | | | | **9,892,029.00** |
| LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO | M2 | 140.00 | 821.00 | 114,940.00 |
| RETIRO DE BLOQUES | M3 | 28.00 | 25,083.00 | 702,324.00 |
| MALLA HEXAGONAL DE TRIPLE TORSIÓN DE 10 X 12" DIAMETRO 2.7 mm +MORTERO 1:6 | M2 | 140.00 | 19,958.00 | 2,794,120.00 |
| ANCLAJE CON VARILLA | ML | 105.00 | 57,033.00 | 5,988,465.00 |
| ASEO GENERAL (incluye retiro de escombros) | M2 | 140.00 | 2,087.00 | 292,180.00 |
| **ZONA 4-A** | | | | **9,449,640.00** |
| LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO | M2 | 360.00 | 821.00 | 295,560.00 |
| EXCAVACIÓN MANUAL EN MATERIAL COMUN (acarreo 10 km) | M3 | 360.00 | 10,992.00 | 3,957,120.00 |
| EMPRADIZACIÓN | M2 | 360.00 | 14,436.00 | 5,196,960.00 |
| **ZONA 2** | | | | **7,220,483.00** |
| LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO | M2 | 110.00 | 821.00 | 90,310.00 |
| MALLA HEXAGONAL DE TRIPLE TORSIÓN DE 10 X 12" DIAMETRO 2.7 mm +MORTERO 1:6 | M2 | 110.00 | 19,958.00 | 2,195,380.00 |
| ANCLAJE CON VARILLA | ML | 82.50 | 57,033.00 | 4,705,223.00 |
| ASEO GENERAL (incluye retiro de escombros) | M2 | 110.00 | 2,087.00 | 229,570.00 |
| **OTROS** | | | | **12,850,877.00** |
| CUNETA EN CONCRETO | ML | 129.00 | 22,661.00 | 2,923,269.00 |
| SUMIDERO | UN | 1.00 | 187,063.00 | 187,063.00 |
| TUBERÍA GRES ALCANTARILLADO 6 " | ML | 7.50 | 28,234.00 | 211,755.00 |
| PLANTACIÓN DE ÁRBOLES | UN | 25.00 | 40,050.00 | 1,001,250.00 |
| DREN HORIZONTAL f 6" | ML | 70.00 | 121,822.00 | 8,527,540.00 |
| **SUBTOTAL** | | | | **$ 39,413,029** |
| **ADMINISTRACION** | 8% | | | $ 3,153,042 |
| **IMPREVISTOS** | 7% | | | $ 2,758,912 |
| **UTILIDADES** | 10% | | | $ 3,941,303 |
| **IVA SOBRE UTILIDADES** | 16% | | | $ 6,306,085 |
| **TOTAL PRESUPUESTO** | | | | **$ 55,572,371** |

## Plano 12-1 Obras recomendadas

# 13. CONCLUSIONES

El barrio Villas de Bolívar se ubica al noroccidente de la localidad Ciudad Bolívar, limitando al nororiente con la urbanización Candelaria La Nueva, al norte con la urbanización Arborizadora Alta, al sur con el barrio Juan José Rondón y al occidente con la Avenida Bacatá. El área de estudio del escarpe del barrio Villas de Bolívar tiene una longitud aproximada de 300 y un ancho medio de 215 m, para un área total aproximada de 6.52 ha que involucra el escarpe del costado norte junto con el canal natural de drenaje y el escarpe oriental. De acuerdo con el estudio de "Zonificación por inestabilidad del terreno en diferentes localidades de Santa Fe de Bogotá" elaborado por INGEOCIM LTDA en 1998 para el Fondo de Atención y Prevención de Emergencias de Bogotá (FOPAE), se definió para el sector una categoría de amenaza por fenómenos de remoción en masa entre media y alta.

La zona de estudio se ubica en el flanco occidental del Sinclinal de Usme y se encuentra sobre una secuencia sedimentaria (la parte media de la Formación Guaduas - KTgm) en la cual se intercalan arcillolitas grises poco fisibles con areniscas cuarzosas dispuestas en capas gruesas (1 a 3 metros de espesor). Otro grupo litológico esta compuesto por areniscas cuarzosas en bancos, intercaladas con secuencias en las que predominan arcillolitas rosadas; los grupos litológicos están separados por una falla de cabalgamiento, con componente de rumbo. La ladera se encuentra cubierta parcialmente por pequeños depósitos de origen coluvial y materiales antrópicos de menos de 1 metro de espesor. Además, la zona de interés se encuentra en la parte baja de una ladera de tipo denudacional que conforma un Piedemonte colinado, sin un control estructural claro. La ladera tenia una inclinación promedio de 25º, pero fue intervenida por labores extractivas (como fuente de materiales de construcción) mediante cortes sub-verticales. Como consecuencia de estas actividades, se crearon condiciones cinemáticas para la desestabilización de pequeñas porciones de macizo rocoso mediante el mecanismo de caída de bloques y detritos en las zonas de taludes de extracción que fueron abandonadas con una reconfiguración morfológica inestable, tanto por los mencionados procesos de caídas, y por la disminución de las características de resistencia del macizo rocoso, ya naturalmente afectadas por procesos de tectonismo intenso, por haber sido sometidas a voladuras.

Se desarrolló el análisis de amenaza para los tipos de fenómenos de remoción en masa: caída de bloques y movimiento rotacional en suelo residual de arcillolita. Los resultados obtenidos afectan dos viviendas ubicadas en el escarpe principal, producto de la evaluación retrogresiva del fenómeno. No existe ninguna vivienda ubicada directamente sobre el área de influencia de los fenómenos enunciados. Otra vivienda ubicada sobre un escarpe hacia la parte superior del área de estudio se ve afectada por le fenómeno de caida de bloques. Este punto al obedecer a un problema de FRM de un vecino no ha sido contemplado en los análisis de obras.

Se realizó un análisis de susceptibilidad en las áreas que no presentan desde el punto de vista geomorfológico FRM. Estas zonas deben incluirse dentro de un control del Distrito para que no sea intervenido en forma desordenada y teniendo en cuenta criterios constructivos adecuados tales como construir cimentaciones en roca, la ejecución de rellenos con criterios de drenaje y compactación adecuados. Para el consultor es imposible evaluar la existencia de rellenos puntuales en vivienda construidas y la posibilidad de ejecución de malas construcciones. Debe tenerse en

cuenta estos aspectos especialmente en las zonas de amenaza baja en la parte superior e inferior del área de estudio. De este análisis ninguna vivienda se encuentra ubicada directamente en zona de amenaza alta.

El análisis de vulnerabilidad conllevo a obtener 3 viviendas con vulnerabilidad alta. Estas viviendas están afectadas especialmente por su resistencia e influencia con el área de amenaza.

La evaluación de riesgo en viviendas determino que tres predios están afectados por los fenómenos de FRM. Una de estas viviendas ubicada en la parte superior se ubica en zona de riesgo alto en razón a la mala intervención de un vecino generando la posibilidad de caída de bloques y pérdida de soporte de la vivienda. Para esta vivienda no se realizo diseño de obras de mitigación. Para los otros dos predios y las zonas de amenaza alta por FRM (excluyendo la zona de vecinos) se desarrollan cuatro alternativas cuyo concepto es controlar el drenaje, el proceso erosivo existente y la posibilidad de caídas de bloque.

La alternativa seleccionada corresponde a la construcción de malla con cespedón en la zona de suelo residual y malla con anclajes en la zona de caída de bloques acompañado de una cuneta superior. El valor de las obras es de $ 55’572.371.

# 14. LIMITACIONES

El presente estudio se basó en la información obtenida en la exploración del subsuelo (sondeos mecánicos, trincheras, apiques y pruebas geofísicas) y los ensayos de laboratorio de muestras representativas.

Los análisis de estabilidad realizados son aproximados y la totalidad de los resultados obtenidos se han incluído en el informe. Debe entenderse que los materiales térreos son materiales inelásticos, heterogéneos y no isotrópicos, en los cuales su comportamiento no es fácilmente predecible, ni independiente del entorno climático y antrópico en el cual se encuentran.

En consecuencia, aunque se ha realizado el mejor trabajo posible, de todas formas los modelos, especialmente los probabilísticos, son limitados tanto intrínsecamente como por el factor escala del trabajo (1:500) y es de esperar que durante la implantación de las obras o el desarrollo de la evolución del terreno, se presenten discrepancias localizadas con los modelos y los planos que los representan.

## 15. BIBLIOGRAFÍA


- INGEOMINAS - UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. (1997). Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá. Agosto.
- AIS, INGEOMINAS, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (1996), "Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia", Comité AIS 300 – Amenaza Sísmica, Bogotá.
- Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente
- INGEOCIM LTDA (1998), "Zonificación por inestabilidad del terreno en diferentes localidades de Santa Fe de Bogotá".
- González A. J., Zamudio E. y Castellanos R. (1999). "Relaciones de Precipitación Crítica-Duración Lluvias que Disparan Movimientos en Masa en Santa Fe de Bogotá – Colombia". Bogotá D.C.
- INGEOMINAS (2003). "Estudio de evaluación de amenaza por deslizamiento para los Barrios El Espino y El Cerro El Diamante, e instalación y monitoreo de instrumentación geotécnica".
- Consorcio IGR (2005), "Elaboración de Diseños de Obras en Sitios Afectados por Emergencia debido a la Temporada de lluvias - Sitio 2 Barrio Juan José Rondón".
- ACHILLEOS, Eftychos. User Guide for PCSTABL 5 M. Purpue University – West Lafayette, Indiana. Diciembre de 1988.
- ARANGO CARLOS. Estudio de suelos. Conjunto camino del Cerro. Avenida Carrera 7 No. 151-90. Estudio de Suelos. Agosto de 2004.
- ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SISMICA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES – INGEOMINAS. Estudio general de amenaza sísmica de Colombia. Bogotá. Octubre de 1996.
- COLORADO ROCKFALL SIMULATION PROGRAM. Version 4 . Colorado Department of Transportation. March 2000.
- DUNCAN, Michel en TURNER, A. Keith y SHUSTER, Robert. Landslides, Investigation and Mitigation – Special Report 247. National Academy Press – Washington, D.C. 1996. Chapter 13.
- FINLAY, P.J., MOSTYN, G.R. y FELL, R. Landslide Risk Assessment – Prediction of Travel Distance. Australia. Julio de 1998.
- GONZÁLEZ, Álvaro (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT en X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Sociedad Colombiana de Ingenieros – Sociedad Colombiana de Geotecnia. Bogotá. 1999.

- GOODMAN, R.E. Introduction to rock mechanics. John Wiley and sons. 1989. Cap. 8. Pp 293 – 335.
- HARR. Reliability based design in civil enginnering. Dover. Pp. 187 – 222. 1987.
- HOEK. Evert y BRAY, John. Rock slope Enginnering. Institution of Mining an Metalurgy. Great Britain University Press. Cambridge. 1974.
- INGEOCIM. Estudios de remoción en masa en varias localidades de Bogotá. Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inestabilidad del terreno para las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe, San Cristóbal, Santa Fe, Chapinero, Usaquén y Suba de Santa Fe de Bogotá. Octubre de 1998.
- INGEOMINAS – UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. 1997.
- INGEOMINAS. Zonificación geotécnica de Santafé de Bogotá. Convenio 200-86 (Departamento Administrativo de Planeación Distrital), Informe 2081. 1993.
- INGENIERIA Y GEOTECNIA LTDA. Concepto geotécnico sobre el proyecto de remodelación morfológica de la cantera el Cedro. Enero 2004.
- ISRM. Rock characterization testing and monitoring – suggested methods. ET Brown pergamon press. 1981.
- JULIVERT, M. Léxico estratigráfico internacional. Vol V, fasc. 4ª Colombia. 1968.
- KOEFOED. Otto. Geosounding principles publicado por el servicio geológico holandés (TNO).
- LOBOGUERRO Alberto. Proyecto de remodelación morfológica y evaluación de amenaza pr remoción en masa de la Cantera el Cedro (Localidad Usaquen). Octubre 2003.
- LOW, B. K. Reliability analisys of rock wedges in Journal of geotechnical and geoinveronmental engineering. June 1997.
- PROSPECCIÓN, SONDEOS E INSTRUMENTACIÓN PSI LTDA. Estudio de Riesgo Barrio Madrid. Localidad Rafael Uribe Uribe. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá Abril de 2004.
- UNION TEMPORAL RIESGOS URBANOS Germán Darío Tapia Muñoz – Edgar Rodríguez Granados. Estudio de Riesgo Barrio San Isidro. Localidad Ciudad Bolívar. Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá. Octubre de 2003.