ESTUDIO DE RIESGOS POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS MEDIDAS RECOMENDADAS EN EL BARRIO VILLA NIDIA (GRUPO 1), UBICADO EN LA LOCALIDAD DE USAQUEN, EN BOGOTA D.C.

INFORME FINAL

CONSORCIO GIA-GEOCING
(Conformado por GEOCING LIMITADA Y GIA LIMITADA)

CONSULTORIA

CONTRATO: No. 226 de 2006

FONDO PARA PREVENCIÓN Y ATENCION DE EMERGENCIAS - FOPAE

BOGOTA D.C. NOVIEMBRE de 2006

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
FONDO PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS - FOPAE

TITULO: Estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las medidas recomendadas en el barrio Villa Nidia, ubicado en la localidad de Usaquén, en Bogotá D.C.

AUTORES: Consorcio GIA-GEOCING (conformado por GEOCING LIMITADA, GIA LIMITADA)

RESUMEN: En este informe se presentan los estudios necesarios para evaluar los riesgos por fenómenos de remoción en masa del barrio Villa Nidia, ubicado en la localidad de Usaquén, en Bogotá D.C., presentando las medidas de mitigación posibles, y diseñando las obras de prevención y/o control propuestas.

PALABRAS CLAVE: Amenaza, Vulnerabilidad, Riesgo, Fenómenos de Remoción en Masa, Deslizamientos, Caída de Rocas, Barrio Villa Nidia, Localidad de Usaquén.

TÉRMINOS PARA GLOSARIO E ÍNDICE:

Fenómenos de remoción en masa: Deslizamientos de tierra, Caída de Rocas.

Amenaza: Probabilidad de excedencia de un fenómeno dado.

CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD:	CONTRATO:	IDIOMA:	NÚMERO DE PÁGINAS:	NÚMERO DE COPIAS:
Clasificado	No. 226 de 2006	Español	194	3

NOTAS Y OBSERVACIONES:

El informe está dividido en cuatro partes, a saber:

- Resumen ejecutivo.
- Volumen I – Informe Final.
- Volumen II – Anexos (son cuatro tomos).
- Volumen III – Planos.
- Volumen IV – Plan de gestión social.

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

CLASE DE DOCUMENTO:	CODIGO:	FECHA:
Informe Final	GE-147	27/11/2006

LISTA DE DESTINATARIOS

DESTINATARIO DEL INFORME	IDENTIFICACION
FOPAE	ORIGINAL
FOPAE	COPIA 1
FOPAE	COPIA 2
GIA-GEOCING LTDA	COPIA 3

CONTROL DE MODIFICACIONES

INDICE REVISIÓN	CAPITULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACION	OBSERVACIONES	APROBADO

GLOSARIO

Amenaza

Es la probabilidad de ocurrencia de un suceso potencialmente desastroso en un periodo de tiempo, en un sitio dado.

Antropico

Se refieren a todas las actividades mediante las cuales el hombre transforma el medio natural., Obras civiles, Deforestación, Minería, Actividades Agrícolas, Sobrepastoreo, Uso del suelo.

Cuenca

Unidad natural definida por la existencia de la divisoria de las aguas en un territorio dado. Las cuencas hidrográficas son unidades morfográficas superficiales. Sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones

Deslizamientos

Son movimientos en masa que se producen al superarse la resistencia al corte del material y tienen lugar a lo largo de una o varias superficies de falla ó a través de una franja relativamente estrecha del material. Generalmente las superficies de deslizamiento son visibles o pueden deducirse razonablemente.

Deslizamientos Rotacionales

Tienen lugar a lo largo de una superficie de deslizamiento interna, de forma aproximadamente circular y cóncava.

Deslizamientos Traslacionales

En este tipo de deslizamientos la masa de terreno se desplaza hacia fuera y abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o suavemente ondulada, con pequeños movimientos de rotación.

Escarpe

Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia de área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla

Geomorfología

En pocas palabras, la geomorfología es la ciencia que estudia las formas del relieve terrestre; pues, según las partículas que componen el término, "geo" es tierra, "morfo" es forma y "logía" es tratado o estudio. Por lo tanto, esta ciencia se remite sólo al estudio de la topografía terrestre. En otras circunstancias, en el estudio de los paisajes de otros astros deberá omitirse el término "geo", y se podrá decir, por ejemplo, morfología de la luna, morfología de marte, etc. En esos casos, se supone, que habrá toda otra serie de factores muy diferentes a los de la tierra que han dado lugar a la fisonomía de los paisajes en dichos astros.

Riesgo

Es el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un suceso particular y como una fusión de la amenaza y la vulnerabilidad.

Superficie De Falla

Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.

Vulnerabilidad

Es el grado de perdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo resultados de la probable ocurrencia de un suceso desastroso.

CONTENIDO GENERAL

DIAGNOSTICO Y JUSTIFICACION 19

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO 20

INTRODUCCION 20

OBJETIVOS 20

ALCANCES 21

1 GENERALIDADES 22

1.1 Localización general del área de estudio 22
1.2 Recopilación de información secundaria 24
1.3 Método de análisis 25
1.4 Grupo de trabajo 26

2 TOPOGRAFÍA 28

2.1 Generalidades 28
2.2 Trabajo de Campo 28
2.3 Equipo 28
2.4 Traslado de coordenadas reales 29
2.5 Trabajo de oficina 30
2.6 Referencias en campo 30

3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 31

3.1 Generalidades 31
3.2 Método de trabajo 31
3.2.1 Metodología 31
3.2.2 Información Existente Analizada 32
3.2.3 Fotointerpretación 35
3.2.4 Trabajo de campo 47
3.3 Geología Regional 47
3.4 Estratigrafía 49
3.4.1 Grupo Guadalupe (Ksg) 50
3.4.2 Características físicas de la roca en el área tipo 50
3.4.3 Características físicas de la roca en el área de estudio (Villa Nidia, Mirador del Norte y Codito) 51
3.4.4 Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos 51
3.4.5 Formación Sabana 52
3.4.6 Características físicas del suelo en el área tipo 52
3.4.7 Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos 53
3.5 Geología Estructural 53
3.6 Fallas 54

3.6.1 Falla de Soratama 54
3.6.2 Lineamiento de San Cristóbal 54
3.6.3 Lineamiento de Mirador y Serrezuela 54
3.6.4 Otras Estructuras 54
3.7 Pliegues 54
3.7.1 Anticlinal de Usaquén 54
3.8 Geología local 55
3.8.1 Estratigrafía 55
3.9 Geología Estructural 63
3.9.1 Diaclasas 64
3.10 Modelo Geológico Barrio Villa Nidia 71
3.11 Geomorfología regional 71
3.12 Geomorfología local 72
3.12.1 Morfometria 73
3.13 Morfología 73
3.14 Clasificación de Unidades Geomorfológicas 74
3.14.1 Modelado Estructural 74
3.14.2 Modelado Estructural Denudacional 75
3.14.3 Modelado Denudativo 76
3.14.4 Procesos Morfodinámicos 76

4 CLIMA, HIDROLOGÍA , HIDRÁULICA HIDROGEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA 80

4.1 Introducción 80
4.2 Generalidades 80
4.3 Marco hidráulico general 81
4.4 Marco hidrológico general 81
4.5 Precipitación 81
4.5.1 Precipitación totales mensuales 81
4.5.2 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) 84
4.5.3 Lluvia crítica 85
4.6 Caudales máximos por escorrentía 88
4.6.1 Metodología 88
4.6.2 Determinación de áreas de drenaje 88
4.6.3 Coeficiente de escorrentía 88
4.6.4 Tiempo de concentración 88
4.6.5 Intensidad 89
4.7 Hidrogeología 89
4.8 Sismo 90

5 COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO 92

5.1 Introducción 92
5.2 Metodología de Trabajo 92
5.3 Clasificación del Uso y Cobertura del Suelo 93

6 ESTUDIO GEOTECNICO 95

6.1 Generalidades 95

6.2 Investigación del subsuelo 95
6.2.1 Procedimiento de trabajo 95
6.3 Exploración del subsuelo 96
6.3.1 Métodos directos 96
6.3.2 Ensayos de campo 102
6.3.3 Ensayos de laboratorio 107
6.4 CARACTERIZACION GEOMECÁNICA 108
6.4.1 Suelos 112
6.4.1.1 Material 6: Depósito Coluvial (Qco) 113
6.4.1.2 Material 7: Relleno producto de actividad minera (Qram) 113
6.4.1.3 Material 8: Relleno antrópico (Qra) 114
6.4.2 Macizo rocoso 114
6.4.2.1 Materiales rocoso 115
6.4.2.2 Materiales 2 y 4. Arenisca de la Formación Labor (Ksgl-are1 y Ksgl–are2). 116
6.4.2.3 Discontinuidades 116
6.4.2.4 Macizo rocoso 123
6.5 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 128

7 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE AMENZA 131

7.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 131
7.1.1 Análisis cinemático 131
7.1.2 Posibilidad de movilización de los depósitos 133
7.2 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA 133
7.2.1 Generalidades 133
7.2.2 Hipótesis de trabajo 134
7.2.2.1 Método de análisis y modelación 134
7.2.2.2 Parámetros de resistencia 135
7.2.2.3 Agentes detonantes 136
7.2.3 Secciones de análisis 142
7.2.4 Evaluación de amenaza 143
7.2.4.1 Rocas 143
7.2.5 Análisis de resultados 143
7.2.5.1 Roca 143
7.2.5.2 Suelos 145
7.2.6 Categorización de la amenaza 156

8 EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD FISICA Y SOCIAL 157

8.1 Vulnerabilidad 157
8.1.1 Tipificación de las viviendas 157
8.1.2 Zona recreativa 158
8.2 Inventario de viviendas 158
8.3 Calificación de los daños 159
8.3.1 Solicitaciones 160
8.3.1.1 Tipos de movimientos y solicitaciones 160
8.3.1.2 Matriz de daño 163

8.3.2 Índice de vulnerabilidad física (IVF) 163
8.3.3 Resultados obtenidos 165

9 RIESGO POR DESLIZAMIENTOS 167

9.1 Método de análisis 167
9.1.1 Hipótesis 1 168
9.1.2 Hipótesis 2 169
9.2 Criterios aplicados y resultados obtenidos 170
9.3 Viviendas afectadas: 170

10 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN 172

10.1 DESCRIPCION DE LAS ALTERNATIVAS DE MITIGACION 172
10.1.1 Zona 1: Ladera Aguas Arriba de la cancha (Secciones STD1 y STD2) 172
10.1.2 Zona 2: Ladera Aguas Abajo de la cancha (Secciones STD1 y STD2) 173
10.1.3 Zona 3: Ladera en depósito al norte de la quebrada San Cristóbal (STD3) 173
10.1.4 Zona 4: Ladera superior, central (Sección STR1 y STD4) 174
10.1.5 Zona 5: Lorredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior 174
10.2 EVALUACION COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE MITIGACION ... 174
10.3 ALTERNATIVAS DE MITIGACION RECOMENDADAS 176

11 DISEÑO DETALLADO DE OBRAS Y MEDIDAS NO ESTRUCTURALES 177

11.1 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS 177
11.2 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO 177
11.3 PROCESO CONSTRUCTIVO Y OBRAS PRIORITARIAS 180
11.4 CRONOGRAMA DEL PROYECTO 181
11.5 VIABILIDAD DE LAS OBRAS 183
11.6 PLAN DE ACCIÓN 183
11.7 MANUAL DE MANTENIMIENTO 184

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 185

12.1 Recomendaciones: 188

13 LIMITACIONES 190

14 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA 191

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de personal que realizó los trabajos 26
Tabla 2. Relación de equipos y elementos por comisión 28
Tabla 3. Coordenadas de Mojones Materializados 30
Tabla 4. Fotografías Aéreas de Referencia 36
Tabla 5. Datos Estructurales 65
Tabla 6. Rango de pendientes. 73
Tabla 7. Unidades geomorfológicas 79
Tabla 8. Intensidad (mm/hora) para diferentes duraciones y períodos de retorno, para la Estación Serrezuela 84
Tabla 9. Relación entre la lluvia crítica y la lluvia anual para la ciudad de Santafé de Bogotá (INGEOCIM - UPES, 1998) 85
Tabla 10. Estimación de Caudales Vs. Periodo de retorno Vs. Áreas de drenaje 89
Tabla 11. Factores espectrales para la Zona 1 (AIS. 1997) 91
Tabla 12. Leyenda y Clasificación de uso y Cobertura de la Tierra 93
Tabla 13. Localización de los puntos de exploración directa del subsuelo 98
Tabla 14. Descripción de los niveles estratigráficos 99
Tabla 15. Profundidades de niveles estratigráficos para cada punto de exploración . 101
Tabla 16. Expresiones para correlacionar el ángulo de fricción a partir del SPT 103
Tabla 17. Relación entre la densidad relativa y la resistencia a la penetración de suelos arcillosos. 103
Tabla 18. Relación entre la consistencia y la resistencia a la penetración 104
Tabla 19. Relación entre la consistencia y la resistencia a la penetración 104
Tabla 20. Resumen de parámetros de resistencia en condición drenada a partir del SPT 104
Tabla 21. Normalización del SPT 105
Tabla 22. Relación de ensayos de laboratorio 107
Tabla 23. Resumen de ensayos de laboratorio. 109
Tabla 24. Resultados ensayos de carga puntual a partir del ISRM y datos de compresión inconfinada 110
Tabla 25. Relación de discontinuidades del macizo rocoso. 111
Tabla 26. Parámetros geotécnicos para la matríz del material 6 (Qco) 113
Tabla 27. Parámetros geotécnicos del material 7 (Qram) 114
Tabla 28. Parámetros geotécnicos para la matriz del material 8 (Qra) 114
Tabla 29. Parámetros geotécnicos de los materiales 1, 3 y 5 obtenidos en laboratorio 116
Tabla 30. Parámetros geotécnicos de los materiales 2 y 4 obtenidos en laboratorio 116
Tabla 31. Obtención de familias de estratificación por el método vectorial 119
Tabla 32. Obtención de familias de diaclasas por el método vectorial 120
Tabla 33. Resumen de familias de discontinuidades 122
Tabla 34. Características geomecánicas de discontinuidades 124
Tabla 35. Clasificación del macizo por los sistemas RMR 89 y GSI 125
Tabla 36. Determinación de los parámetros del macizo rocoso a partir del método de Hoek – Brown 126
Tabla 37. Parámetros de resistencia del macizo rocoso y de la roca intacta 127

Tabla 38. Determinación de los parámetros de la roca intacta a partir del método de Hoek – Brown..... 128
Tabla 39. Zonificación geotécnica. 129
Tabla 40. Resumen de análisis Cinemático y características de taludes..... 132
Tabla 41. Parámetros Geomecánicos de las discontinuidades 135
Tabla 42. Parámetros de resistencia seleccionados para los depósitos 136
Tabla 43. Pesos unitarios de los materiales utilizados en los modelos..... 136
Tabla 44. Parámetros estadísticos para el nivel del agua 139
Tabla 45. Resultados análisis de falla planar con grieta en STR1..... 144
Tabla 46. Resultados análisis de falla planar sin grieta en STR2..... 144
Tabla 47. Resultados análisis de falla planar con grieta en STR2..... 144
Tabla 48. Resumen de los FS críticos en las secciones analizadas 145
Tabla 49. Categorización de la amenaza en la zona de estudio 156
Tabla 50. Categorización de la Amenaza (adaptado de González y Millán, 1999) 156
Tabla 51. Criterios de resistencia de las estructuras según el tipo de solicitación 157
Tabla 52. Clasificación de la tipología de vivienda 158
Tabla 53. Clasificación de los daños según el DRM 160
Tabla 54. Rangos de velocidad utilizadas en el estudio 161
Tabla 55. Categorías de presione laterales utilizadas en el estudio..... 162
Tabla 56. Solicitaciones características de la zona de influencia indirecta por caída de rocas..... 162
Tabla 57. Matriz de daño utilizada en el estudio. 163
Tabla 58. Selección del valor de α 165
Tabla 59. Criterios de categorización de la vulnerabilidad ante deslizamientos 166
Tabla 60. Categorización del riesgo 170
Tabla 61. Descripción zonas de intervención. 172
Tabla 62. Cuadro comparativo de alternativas de mitigación 175
Tabla 63. Cuadro de alternativa seleccionada..... 176
Tabla 64 Cantidades y presupuesto estimado de las obras para el barrio Villa Nidia 177
Tabla 65 Viviendas con inadecuada calidad constructiva. 189
Tabla 66 Viviendas a reubicar por deficiencia en el sistema de alcantarillado..... 189

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del área de estudio 23
Figura 2. Diagrama de flujo para el análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por FRM 27
Figura 3. Poligonal de amarre 29
Figura 4. Diagrama de puntos y polos Barrio Villa Nidia 68
Figura 5. Proyección Equiareal inferior Diaclasas Barrio Villa Nidia 69
Figura 6. Proyección Equiareal inferior Estratificación Barrio Villa Nidia 70
Figura 7. Lluvias medias mensuales (1990 - 2005) en la estación Serrezuela 82
Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media anual en Bogotá 83
Figura 9. Curva Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) para la zona de estudio 84
Figura 10. Distribución espacial de la precipitación critica en Bogotá 86
Figura 11. Distribución espacial de periodos de retorno de la precipitación critica en Bogotá 87
Figura 12. Envolvente y parámetros de resistencia para cada uno de los materiales analizados con base en el SPT..... 106
Figura 13. Análisis de frecuencias para todas las discontinuidades 117
Figura 14. Análisis de frecuencias para discontinuidades con estratificación principal..... 117
Figura 15. Análisis de frecuencias para discontinuidades con estratificación EB..... 118
Figura 16. Red estereográfica para planos principales de discontinuidades con E 122
Figura 17. Red estereográfica para planos principales de discontinuidades con EB .. 123
Figura 18.Dilatancia en discontinuidades de limolita..... 124
Figura 19. Envolvente de resistencia del macizo rocoso para el caso más desfavorable..... 127
Figura 20. Envolvente de resistencia del macizo rocoso para el caso más favorable 127
Figura 21. Envolvente de resistencia para discontinuidades en arenisca 137
Figura 22. Envolvente de resistencia para discontinuidades en arcillolita 137
Figura 23. Distribución de probabilidad para el nivel del agua (falla planar sin grieta de tracción)..... 140
Figura 24. Distribución de probabilidad para el nivel del agua (falla planar con grieta de tracción)..... 140
Figura 25. Distribución de probabilidad para la aceleración horizontal del terreno ... 141
Figura 26. Probabilidad de excedencia del sismo en la zona ajustada a una distribución exponencial..... 142
Figura 27. Histograma de frecuencias del FS para STD1..... 146
Figura 28. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD1..... 146
Figura 29. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD1 147
Figura 30. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD1..... 147
Figura 31. Histograma de frecuencias del FS para STD2..... 148
Figura 32. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD2..... 149
Figura 33**.** Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD2 149
Figura 34. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD2..... 150

Figura 35. Histograma de frecuencias del FS para STD3 150
Figura 36. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD3 151
Figura 37. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD3 151
Figura 38**.** Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD3..... 152
Figura 39. Histograma de frecuencias del FS para STD4 152
Figura 40. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD4 153
Figura 41. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD4 153
Figura 42. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD4..... 154
Figura 43. Histograma de frecuencias del FS para STD5 154
Figura 44. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD5 155
Figura 45. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD5 155
Figura 46. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD5..... 156
Figura 47. Esquema de deslizamiento 161
Figura 48. Esquema de caída de rocas. 162
Figura 49. Valoración del ID utilizando conjuntos difusos..... 164
Figura 50. Gráfica para determinar IVF con un α=0,6 165
Figura 51. Conjuntos difusos trapezoidales 168
Figura 52. Cálculo del riesgo por conjuntos difusos trapezoidales 170
Figura 53 Cronograma del proyecto estimado de las obras para el barrio Villa Nidia 182
Figura 54 Amenaza actual por fenómenos de remoción en masa 185
Figura 55 Vulnerabilidad actual por fenómenos de remoción en masa 186
Figura 56 Riesgo actual por fenómenos de remoción en masa. 186

LISTA DE FOTOS

Foto 1. Vuelo c61, Fecha abril 27/1940, Esc. 1:15000 (de toma)..... 38
Foto 2. Vuelo: C772-IGAC, fecha: febrero 15/1956, Esc. 1:9000 (de toma)..... 39
Foto 3. Vuelo: C 1080-IGAC, fecha: 1960, Esc. 1:20000 (de toma) 40
Foto 4. Vuelo: C 1402-IGAC, fecha: febrero/1972, Esc. 1:11000..... 41
Foto 5. Vuelo C 1796-IGAC, fecha: diciembre 16/1977, Esc. 1: 7800 (de toma)..... 42
Foto 6. Vuelo: C 1950-IGAC, fecha: febrero 15/1980, Esc. 1:8800 (de toma). 43
Foto 7. Vuelo C -2067, IGAC sobre 31592, fecha: 1982-1983, Esc. 1:38000..... 44
Foto 8. Vuelo: C 2265-IGAC, fecha: diciembre 27/1986, Esc. 1:23400 (de toma).... 45
Foto 9. Vuelo: 415-SAV, fecha: febrero/1998, Esc. 1:21000 (de toma)..... 46
Foto 10. Unidad Ksgl-al1. Arcillolita limosa de color gris-azulada, en capas delgadas, las tonalidades rojizas se deben a la oxidación; se observa laminación plano paralela e intercalaciones de finísimas capas de limolitas en coloraciones verdosas..... 57
Foto 11. Unidad Ksgl-al1. Capas delgadas de arcillolita limosa de color gris oscuro a negro, con algunas coloraciones rojizas a causa de la meteorización. 57
Foto 12. Unidad Ksgl-are1. Banco de gran espesor de cuarzo arenisca de color gris, que se presenta fracturada con grietas de hasta 5 cm. 58
Foto 13. Unidad Ksgl-are1. Cuarzo arenisca de color amarillo claro, con tonalidades ocres y rojizas por meteorización. Se presenta en capas de aproximadamente 40 cm, intercaladas por delgadas capas de arcillolita, por donde se observa infiltración de aguas..... 58
Foto 14. Unidad Ksgl-are1. Intercalación de limolitas con capas delgadas de arcillolitas de colores marrones-rojizos; seguramente reblandecidas por infiltración..... 58
Foto 15. Unidad Ksgl-are1. Se presenta un paquete de cuarzo arenisca bastante espeso en colores que van del gris al marrón, se presenta fracturada con grietas de hasta 5 cms. En la parte inferior se ve claramente el contacto con una unidad blanda de color gris a negro, en capas delgadas, con estratificación plano paralela y muy fracturada 58
Foto 16. Unidad Ksgl-are1. Potente paquete de cuarzo arenisca de color amarillo con tonalidades marrón y blancas causadas por meteorización. Presenta diaclasamiento con aberturas muy amplias..... 59
Foto 17. Unidad Ksgl-are1. Detalle del espesor de la abertura de la diaclasa maestra perpendicular a la estratificación de la cuarzoarenisca 59
Foto 18. Unidad Ksgl-are1. Esta fotografía permite observar nuevamente un potente paquete de cuarzo arenisca, que en este caso es masivo, de color gris. Se observa claramente infiltración y escurrimiento de aguas. 59
Foto 19. Unidad Ksgl-are1. Esta fotografía permite apreciar claramente el fracturamiento que sufrieron las areniscas debido, seguramente a la explotación minera de anos atrás. Se observa varicoloreada, siendo los tonos mas rojizos debidos a meteorización. Adicionalmente, se observa hacia el techo de la arenisca, una unidad blanda con coloraciones amarillo-verdosas, que se presenta en delgadas capas pero en alto grado de meteorización, por lo que difícilmente puede distinguirse la estratificación. 59

Foto 20. Unidad Ksgl-are2. Cuarzo arenisca de color amarillo claro a grisáceo, en potentes paquetes masivos. 60
Foto 21. Unidad Ksgl-are2. Paquete arenoso de color gris oscuro, que se presenta masivo y con infiltración de aguas. Muy cubierto por vegetación. 60
Foto 22. Unidad Ksgl-al3. Limolita de color gris-pardo con coloraciones verdosas debidas a la meteorización. Se encuentra muy fracturada localmente, razón que no permite ver claramente la estratificación. 61
Foto 23. Unidad Ksgl-al3. Limolita de color amarilla a blancuzca que presenta un alto grado de meteorización. Se encuentra muy fracturada en planos paralelos a la estratificación. 61
Foto 24. Vista panorámica del barrio Villa Nidia. La cancha de microfutbol es el centroide del área de estudio. Al fondo se observa es el escarpe (cubierto por vegetación) que dejo una antigua explotación minera. 73
Foto 25 Sondeo No 1 Y 2..... 98
Foto 26 Sondeo No 3 Y 4..... 98

LISTA DE PLANOS

GE 147-PL1-01 LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO Y EXPLORACION DEL SUBSUELO.

GE 147-PL1-02 GEOLOGIA REGIONAL.

GE 147-PL1-03 GEOLOGIA LOCAL.

GE 147-PL1-04 COLUMNA ESTRATIGRAFICA SECCION STD2.

GE 147-PL1-05 GEOMORFOLOGIA.

GE 147-PL1-06 RED DE ALCANTARILLADO.

GE 147-PL1-07 RED DE ACUEDUCTO.

GE 147-PL1-08 COBERTURA Y USO DEL SUELO.

GE 147-PL1-09 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA.

GE 147-PL1-10 SECCIONES GEOTÉCNICAS.

GE 147-PL1-11 AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS.

GE 147-PL1-12 AMENAZA POR FALLA PLANAR.

GE 147-PL1-13 AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.

GE 147-PL1-14 TIPOLOGÍA DE VIVIENDAS.

GE 147-PL1-15 VULNERABILIDAD ANTE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.

GE 147-PL1-16 RIESGO POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.

GE 147-PL1-17 OBRAS PROPUESTAS ALTERNATIVA 1

GE 147-PL1-18 CORTES Y DETALLES OBRAS PROPUESTAS ALTERNATIVA 1

GE 147-PL1-19 OBRAS PROPUESTAS ALTERNATIVA 2

GE 147-PL1-20 CORTES Y DETALLES OBRAS PROPUESTAS ALTERNATIVA 2

GE 147-PL1-21 AMENAZA POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA CON OBRAS.

GE 147-PL1-22 OBRAS DE MITIGACIÓN DEFINITIVAS

GE 147-PL1-23 CORTES Y DETALLES OBRAS DE MITIGACIÓN DEFINITIVAS

GE 147-PL1-24 LEVANTAMIENTO DE ACTAS DE VECINDAD

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I	**LEVANTAMIENTO TOPOGRAFIA.....**	195
ANEXO I-A	Certificado de calibración del equipo.....	197
ANEXO I-B	Certificado de placas IGAC.....	199
ANEXO I-C	Listado de coordenadas.....	201
ANEXO II	**GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGIA.....**	219
ANEXO II-A	Fotografías aéreas.....	220
ANEXO II-B	Fichas inventario de procesos.....	235
ANEXO II-C	Discontinuidades.....	244
ANEXO III	**INVESTIGACION DEL SUBSUELO.....**	251
ANEXO III-A	Registro de Apiques.....	252
ANEXO III-B	Registro de trincheras.....	279
ANEXO III-C	Registro de Perforaciones.....	284
ANEXO IV.	**CLIMA, HIDROLOGÍA, HIDRAHULICA HIDROGEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA.....**	295
ANEXO IV-A	Fichas de investigación de redes de alcantarillado.....	296 347
ANEXO V	**CARACTERIZACION GEOTÉCNICA DEL SUBSUELO.....**	348
ANEXO V-A	Ensayos de laboratorio.....	
ANEXO VI	**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE AMENAZA.....**	485
ANEXO VI-A	Amenaza actual por deslizamientos.....	486
ANEXO VII	**EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD FISICA Y SOCIAL.....**	676
ANEXO VII-A	Formularios para evaluación.....	677
ANEXO VII-B	Resumen evaluación de daños y estado de edificaciones.....	754
ANEXO VIII.	**RIESGO POR DESLIZAMIENTOS.....**	762
ANEXO VIII-A.	Resultados de análisis de riesgo.....	763
ANEXO IX.	**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN.....**	773
ANEXO IX – A.	Formatos de evaluación.....	774
ANEXO IX – B.	Amenaza con obras.....	780
ANEXO X.	**CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO.....**	788
ANEXO XI.	**ESPECIFICACIONES TECNICAS DE CONSTRUCCIÓN.....**	818

DIAGNOSTICO Y JUSTIFICACION

EL FONDO DE DESARROLLO LOCAL DE LA LOCALIDAD DE USAQUÉN y el FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS, FOPAE, suscribieron el CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. SGDC-658-00-05 con el fin de aunar esfuerzos técnicos, económicos y administrativos para ejecutar los estudios y diseños de mitigación del riesgo en los Barrios Villa Nidia, Mirador del Norte y El Codito de la Localidad de Usaquén.

Villa Nidia se erige en las estribaciones occidentales de los cerros nororientales, sobre una ladera estructural intervenida, sometida a procesos de explotación. Sus geoformas conjugan escarpes antrópicos, pendientes estructurales denudativas y frentes abandonados de explotación. De este conjunto la más característica es la primera; su forma es semicircular, su altura aproximada es de 10 metros y su inclinación trasiega desde los 80 hasta los 90 grados, producto de la extracción de materiales en las décadas pasadas; por uno de sus arcos al norte corre, de este a oeste, un drenaje –en apariencia- natural; pero las expresiones de flujo involucran también diversas emanaciones y/o escurrimientos superficiales difusos (no se concentran en un solo punto) de mezclas de aguas servidas y freáticas. Tal es la riqueza hídrica del lugar que en el eje del cinturón rocoso cohabitan un nacimiento y el lavadero público.

Los planos de estratificación delinean azimuts de buzamiento hacia el suroccidente, con inclinaciones entre 21 y 25 grados, labrados entre secuencias de potentes paquetes (más de 5 m.) de areniscas bien cementadas de labor con delgadas intercalaciones de lodolitas y limonitas. Suprayacen a las areniscas rellenos antrópicos genéticamente asociados tanto a desechos de extracción minera como a actividades de autoconstrucción. A la detección, cartografía y descripción de todo este particular conjunto se le hará hincapié en la investigación geológica.

El particular arreglo geométrico de los planos de discontinuidad, entrelazado por la estratificación y una familia de diaclasas orientada NW/NE no sólo enmarca la predisposición cinemática a fallas planares en roca, sino que es elemento esencial para la caída de rocas y los deslizamientos traslacionales en suelos. El mejor ejemplo de este último fenotipo es el cuerpo que entalla el límite oriental de la cancha de juegos múltiples. Sin embargo, y gracias al irregular manejo de las aguas (conjunción de estanques con desbordamientos) y al enorme aporte de los residuos líquidos sanitarios sus replicas pueden cubrir los depósitos de tope de ladera.

La mayor influencia estructural se centra al sur del polígono de estudio; las rocas de textura fina se exponen plegadas y fracturadas. Su comportamiento incierto (por lo pronto) pero de repercusión en la condición de estabilidad puede estar vinculado con el patrón estructural de sectores colindante, i.e. Cerro Norte, tema que se atenderá en las etapas de fotointerpretación y trabajo de campo.

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

El abanico de procesos de inestabilidad en Villa Nidia encierra caídas de roca y deslizamientos planares en roca y traslacionales en suelo. De ellos el primero es, sin lugar a dudas podría ser, el más dramático, y aunque conjuga la predisposición cinemática, su probabilidad de ocurrencia trasiega apenas de baja a media, pero con predominio (a priori del primero) pues el plano preferencial de movilización no ha sido cortado y los paquetes suprayacentes se extienden por varias decenas de metros. Los dos movimientos restantes son, tal vez, los de mayor recurrencia (de esta manera fijan los escenarios de amenaza media y baja); su gestación abarca indiferentemente las laderas y sus consecuencias serían parciales y locales.

La vulnerabilidad es intangiblemente baja o alta. Las unidades habitacionales cimentadas en la plataforma superior y sobre la pendiente estructural, si llegase a tener lugar un deslizamiento planar en roca carecen de capacidad de respuesta; no así sucede con las residencias que recorren la franja occidental, los planos preferenciales de movilización se enclavan y profundizan al interior y por tanto los fenómenos de inestabilidad sólo recaen en los horizontes de suelo; en consecuencia las estructuras de las edificaciones, consolidadas y de tipo aporticado y de muros confinados, juegan papel trascendente.

El riesgo, bajo la convolución de las dos variables señaladas, variaría de medio a alto.

INTRODUCCION

En desarrollo del Contrato de Consultoría No. 266 de 2006, suscrito entre el FONDO DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS DE BOGOTÁ – FOPAE y el CONSORCIO GIA-GEOCING, conformado por GEOCING LIMITADA y GIA LIMITADA, cuyo objeto es el "Estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las medidas recomendadas en el barrio Villa Nidia Sector, ubicado en la localidad de Usaquén (GRUPO 1), en Bogotá D.C.", se presenta este informe el cual contiene el resumen de los trabajos realizados.

OBJETIVOS

- Prevenir desastres debido a fenómenos de remoción en masa.
- Preservar y mejorar las condiciones del medio natural.
- Contribuir a mejorar la calidad del hábitat (viviendas y servicios públicos).
- Crear espacios verdes y valorar el espacio público.
- Difundir información sobre riesgos y protección del medio ambiente.

ALCANCES

- Recopilación y análisis de información secundaria disponible: fotografías aéreas, cartografía oficial, planchas geológicas, estudios geotécnicos y de riesgo anteriores, plano catastral aprobado por DAPD, registros pluviométricos, y todo tipo de información que aporte al proyecto.

- Levantamiento topográfico detallado de la zona objeto: altimetría y planimetría a escala 1:500 amarrados a las placas IGAC, con curvas de nivel cada 0.50 m, que registren la morfometría de la ladera y los signos de inestabilidad, así como los elementos del componente urbanístico.

- Recopilación de información primaria: levantamiento geológico a nivel de unidad de roca, inventario y caracterización de los procesos morfodinámicos, inventario de viviendas, investigación del subsuelo, programa de ensayos de laboratorio.

- Agrupación y síntesis de la información hidrológica, hidrogeológica e hidráulica, y la investigación de las redes de acueducto y alcantarillado.

- Análisis geotécnico; identificación de sitios inestables; análisis de estabilidad global y local para condiciones estáticas y dinámicas, tanto en estado actual como con las obras recomendadas.

- Evaluación de amenaza para los escenarios actual y posterior a la implementación de las obras de mitigación.

- Análisis de vulnerabilidad y riesgo para cada una de las unidades residenciales.

- Evaluación de mitigabilidad en términos de riesgo con base en la evaluación económica y la eficiencia de las obras.

- Diseño de las obras requeridas para estabilizar la zona y las viviendas afectadas. Se incluyen las memorias de cálculo, las cantidades de obra y el presupuesto.

1 GENERALIDADES

1.1 Localización general del área de estudio

Villa Nidia se circunscribe en las estribaciones de los cerros orientales, es de forma semirectangular, de aproximadamente 240 m de longitud por 130 m de ancho. Cubre un área de aproximadamente 3,1 Ha, limitada por el norte por la calle 163 y por un escarpe próximo a la calle 162C, por el sur por la calle 161 y una línea que es aproximadamente la continuación de la diagonal 161, por el oriente por la carrera 8 Bis A y por el occidente por la carrera 10. Como se puede observar en la **Figura 1**.

El acceso al barrio se lleva a cabo exclusivamente por la calle 163B, corredor que se desprende de la Avenida 7, eje vial que lo conecta con el resto de la ciudad. La vía es de difícil tránsito aunque está en su totalidad pavimentada; sus pendientes longitudinales son altas y las curvas poseen radios de curvatura cerrados y su visibilidad es apenas de pocos metros. Por ella se presta el servicio de transporte informal con vehículos particulares (camperos) que hacen el recorrido entre la carrera séptima y la parte alta del barrio.

El tránsito peatonal es la opción de movilidad más común, y se hace por senderos pavimentados que acordonan la 163B, y no pavimentados entrelazados con los primeros. Recientemente, el barrio experimentó mejoras urbanísticas pues tuvieron curso obras, como: gradas de concreto en los caminos peatonales y pavimentación de vías.

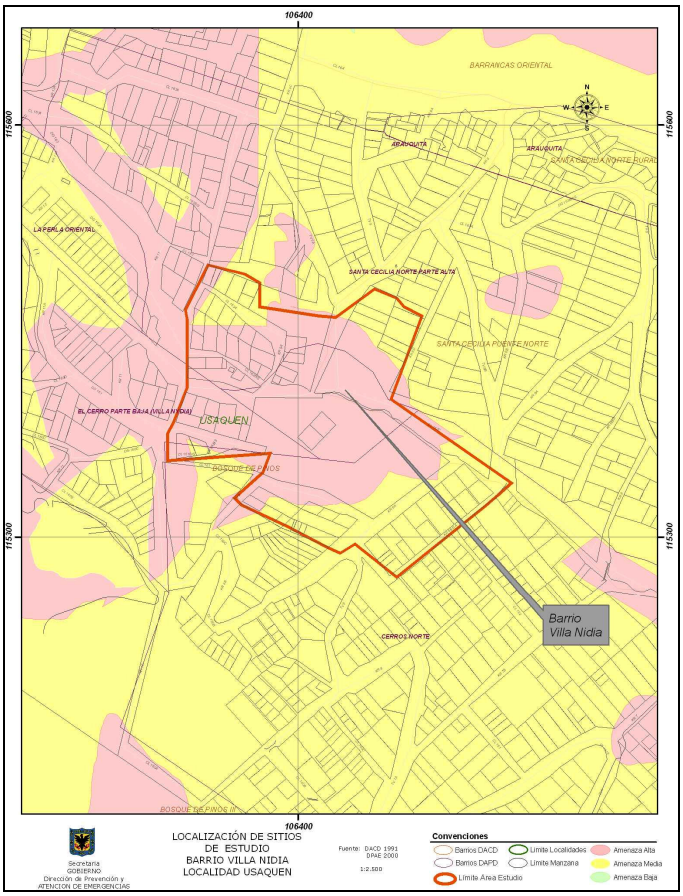


Figura 1. Localización general del área de estudio

1.2 Recopilación de información secundaria

Las siguientes fueron las fuentes de información secundaria recopiladas para el desarrollo del objeto del estudio:

- Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá. IRH INGENIERÍA y RECURSOS HÍDRICOS LTDA. – EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, Noviembre de 1995.

- Estudio de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. INGEOMINAS, 1997.

- Estudio para la Zonificación de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa de las Localidades de Ciudad Bolívar, San Cristóbal, Rafael Uribe Uribe, Santa fe, Chapinero, Usaquén y Suba. INGEOCIM LTDA. – UPES. Octubre de 1998.

- Estudios y diseños de estabilidad de taludes, control de erosión y manejo de aguas para la estabilización del barrio Santa Cecilia, Hidrotec Ltda. – Upes, Agosto de 1998.

- Estudio de riesgo por remoción en masa y diseño de obras de control, protección y estabilización para los barrios Cerro Norte y Villa Nidia de la localidad de Usaquén. MGL – DPAE, Noviembre de 2002. Si bien se enfoco al análisis y evaluación del riesgo asociado a un gran deslizamiento circunscrito en al suroriente de los barrios y dejo de lado el tratamiento en Villa Nidia, contiene información básica sobre geología, geomorfología, sismología, hidrología y clima, de gran utilidad para la realización de presente estudio.

- Monitoreo y seguimiento al deslizamiento de los barrios Cerro Norte y Villa Nidia de la localidad de Usaquén. GEOS – DPAE. Enero de 2003.

- Estudio de evaluación y zonificación de riesgos del barrio Arauquita. GEOCING – SECRETARIA DE GOBIERNO. Julio de 1999.

- Consultoría para la elaboración de los diseños definitivos detallados, para construcción de las obras de adecuación, de la quebrada Arauquita localidad de Usaquén. CONSORCIO MUR PROYECTOS LTDA & SAMUEL HERNANDEZ AYALA - EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ (Octubre de 2001).

- Planchas a escalas 1:2000 y 1:5000 del IGAC, las cuales cubren las áreas de las cuencas vertientes que drenan hacia la zona de estudio.

- Diagnóstico Técnico No DI-2285 (26 de diciembre de 2004): Se emitió a raíz de un pequeño deslizamiento que ocurrió en el barrio Santa Cecilia, ubicado al norte del escarpe rocoso de Villa Nidia. El deslizamiento se presentó en un talud vial, en cuya parte superior hay tres viviendas. Se indica que el deslizamiento ocurrió

aparentemente por fugas de aguas residuales de la tubería domiciliaria sumado a posibles efectos de infiltración producidos por la reciente temporada de lluvias. El evento causó la ampliación de antiguas fisuras en la placa de contrapiso de las viviendas. Se recomendó reemplazar la tubería de aguas residuales de las viviendas ubicadas en la corona del talud, hasta conectar con una caja de inspección externa y proteger el talud con obras de estabilización.

- Diagnóstico Técnico No DI 2346 (18 de febrero de 2005): El 12 de febrero de 2005 se presentó un deslizamiento en un parque recreativo localizado en la parte inferior del escarpe. Este evento afectó la cancha de baloncesto, un poste del alumbrado de la cancha y parte de los juegos infantiles. En el diagnostico se indica que el deslizamiento ocurrió sobre material estéril y que el fenómeno detonante fue la saturación del material con aguas servidas y lluvias, provenientes de la parte alta del escarpe. Se recomienda que el parque no se siga utilizando y que se retiren algunos bloques de roca que están en peligro de caer.

1.3 Método de análisis

Para el análisis de riesgos por fenómenos de remoción en masa (FRM) se seguirá la metodología sugerida por Omar Darío Cardona, que se puede resumir así: "una vez conocida la amenaza o peligro (*A*), entendida como la probabilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a cierto nivel durante un período de exposición determinado, y conocida la vulnerabilidad (*V*), entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto a ser afectado o de ser susceptible de sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad, el riesgo (*R*) puede entenderse como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento expuesto, como consecuencia de un evento con una intensidad mayor o igual a cierto nivel, es decir, la probabilidad de exceder unas consecuencias sociales y económicas durante un período de tiempo determinado".[1]

Para obtener los tres componentes mencionados en la anterior definición (amenaza, vulnerabilidad y riesgo), se lleva a cabo el proceso resumido en la **Figura 2** y descrito a continuación:

- Determinación de las zonas de comportamiento geotécnico similar (zonas homogéneas) con base en los trabajos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de investigación del subsuelo.

- Determinación de los factores detonantes naturales (sismo y lluvia). Para el sismo se utilizará los datos de la microzonificación de Santafé de Bogotá. Para la lluvia se determinará el período de retorno de la lluvia crítica, basándose en los trabajos realizados en 1998 por Ingeocim Ltda. – Upes. Es importante resaltar

[1] Cardona-Arboleda, O, D, (1989). ***VULNERABILIDAD Y RIESGO POR DESASTRE – TÉRMINOS DE USO COMÚN EN MANEJO DE RIESGO.*** Primer taller de planificación en manejo de desastres. Oficina Nacional para la Atención de Desastres. Presidencia de la República de Colombia – Universidad Jorge Tadeo Lozano.

que los factores detonantes antrópicos (producidos por el hombre) se tendrán en cuenta al determinar las zonas de cortes y rellenos y la sobrecarga de las estructuras.

- Determinación de los parámetros geotécnicos (máximos y mínimos) en cada uno de las los materiales que conforman el subsuelo en la zona de estudio, necesarios para realización de los análisis de estabilidad.

- Análisis de estabilidad probabilísticos, determinando los factores de seguridad y la probabilidad de falla teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros de resistencia del suelo y los factores detonantes.

- Con base en la zonificación de amenaza realizada (determinando las posibles solicitaciones) y la tipificación de estructuras existentes, se determina la vulnerabilidad y el riesgo de las estructuras ante fenómenos de remoción en masa.

- De acuerdo a los resultados de los trabajos precedentes, se propondrán las obras de mitigación posibles.

1.4 Grupo de trabajo

Para llevar a cabo los trabajos, el CONSORCIO GIA-GEOCING conformó el grupo de trabajo relacionado en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Relación de personal que realizó los trabajos

Nombre	Función o cargo
Flavio Soler Sierra	Director del estudio – Especialista en geotecnia y riesgos
Mauricio Alfonso	Geólogo
Holman Téllez	Especialista en hidrología e hidráulica
Jairo A. Lozano	Especialista en geotecnia
Luís Fernando Urrego L.	Especialista en SIG
Fernando Andrés Ospina	Ingeniero civil - Especialista en riesgos
Rocio Rincón P.	Ingeniera auxiliar – Cartografía y SIG
Andrés Parra	Ingeniero auxiliar - Trabajos de exploración del subsuelo
Carlos Castillo L.	Topógrafo
Jully Casallas	Dibujante



Figura 2. Diagrama de flujo para el análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por FRM

2 TOPOGRAFÍA

2.1 Generalidades

Como insumo esencial dentro de la elaboración de la geología, geomorfología, amenaza, vulnerabilidad, riesgo, y de localización de obras de estabilización o rehabilitación; se realizó el levantamiento topográfico detallado, a escala 1:500 en el área designada para el estudio.

2.2 Trabajo de Campo

Para iniciar el levantamiento topográfico (planimetrito y altimétrico), el primer día se realizo el traslado de coordenadas y el amojonamiento de tres vértices y se definieron los auxiliares para la radiación de los detalles. Durante 4 días se movilizo la comisión de topografía al área de estudio para adelantar las labores del levantamiento topográfico planimetrito y altimétrico tomando en detalle redes de agua, luz y teléfono, así como vías, viviendas y otras características visibles y de importancia para este trabajo como laderas, escarpes y rocas.

2.3 Equipo

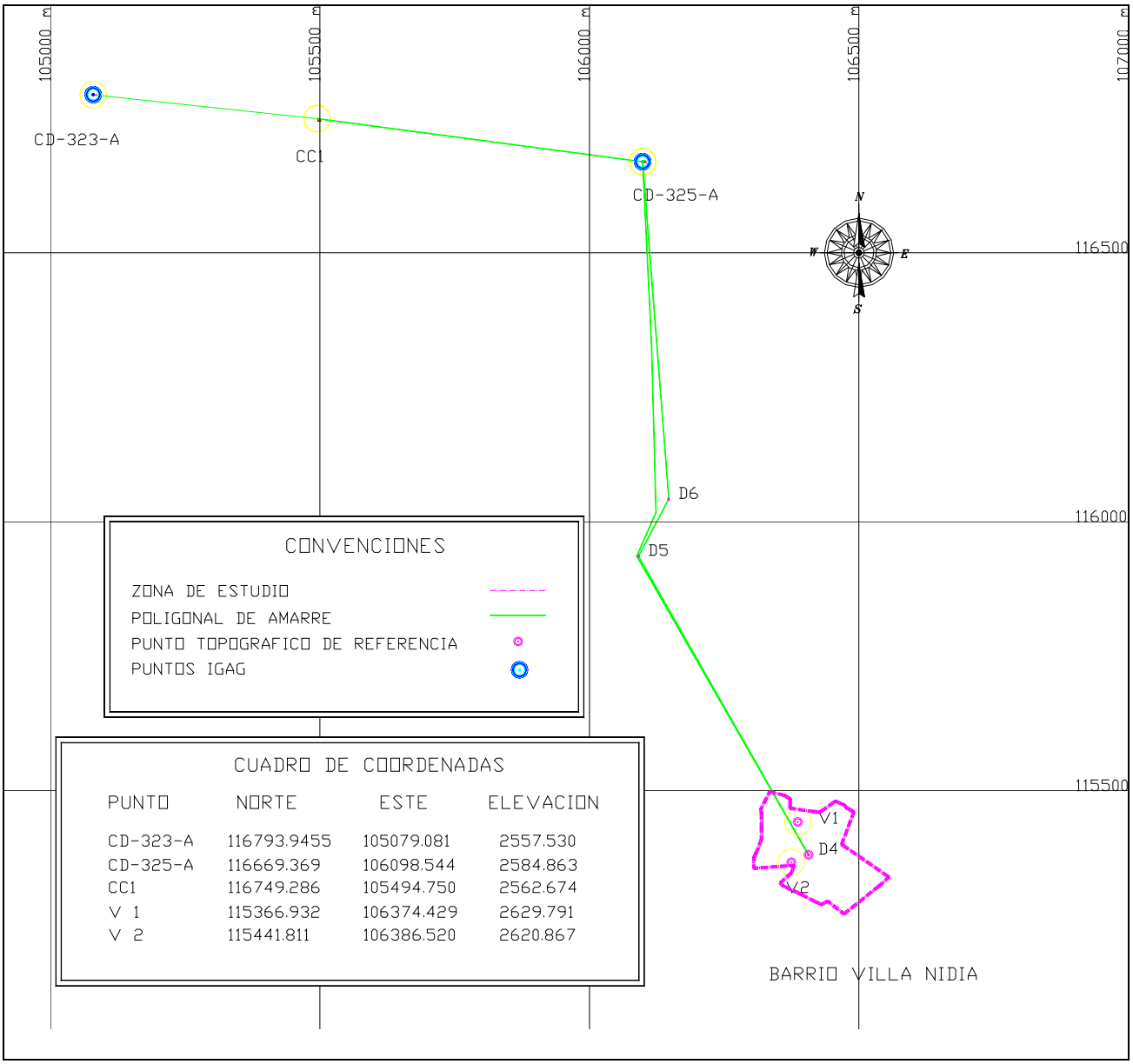
La toma de información se llevo a cabo con una Estación Total Marca Topcon GTS-235W, de precisión angular al segundo y con alcances de lectura con prisma sencillo de 1.200 m de distancia en longitud, con capacidad para almacenar hasta 8000 puntos topográficos, con lectura vertical cenital y el acompañamiento de dos prismas para la lectura de los puntos. En el **ANEXO I-A** se presenta el Certificado de calibración del equipo.El equipo y los recursos utilizados por la comisión se relacionan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Relación de equipos y elementos por comisión

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Estación TOPCON GTS-235W	1
Topógrafo	1
Cadenero primero	1
Cadenero segundo	1
Vigilante	2
Radios de onda corta	4
Vehículo	1

2.4 Traslado de coordenadas reales

Para realizar el traslado de coordenadas del levantamiento topográfico se utilizó la información del punto certificado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (IGAC), CD-325-A, con azimut al punto CD-323-A, con el fin de amarrar dos vértices amojonados a coordenadas reales. En el **ANEXO I-B** se presenta el certificado de las placas del IGAC. La precisión del traslado de la poligonal es de 1:485614 (Ver **Figura 3**).



PUNTO	NORTE	ESTE	ELEVACION
CD-323-A	116793.9455	105079.081	2557.530
CD-325-A	116669.369	106098.544	2584.863
CC1	116749.286	105494.750	2562.674
V 1	115366.932	106374.429	2629.791
V 2	115441.811	106386.520	2620.867

Figura 3. Poligonal de amarre

2.5 Trabajo de oficina

Los datos se bajaran directamente desde el colector de datos de la estación total al computador, con el ánimo de evitar errores de trascripción y agilizar este proceso. Los puntos topográficos tomados en campo fueron 2579 (ver **ANEXO I-C**) los cuales se interpolaron utilizando el software SURFACE MODELING, hallando las curvas de nivel cada 0.5m, obteniendo como resultado el plano **GE 147-PL1-01**.

2.6 Referencias en campo

Para el replanteo de las obras propuestas, se dejaron tres mojones materializados en campo con las coordenadas descritas en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Coordenadas de Mojones Materializados

MOJONES	ESTE	NORTE	COTA
D4	106406,415	115380,820	2635,383
V1	106374,429	115366,932	2635,383
V2	106386,520	115441,811	2620,867

3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

3.1 Generalidades

Este capítulo hace una descripción detallada de los aspectos geológicos y geomorfológicos que condicionan la zona de estudio, en el que se enmarcan el contexto regional y local como insumo para la determinación de la estabilidad geotécnica en el área.

3.2 Método de trabajo

Para el desarrollo de la geología regional, en este estudio se presenta una compilación a partir del análisis de la información existente y de la fotointerpretación, y del conocimiento de los consultores en geología de la zona de estudio y sus alrededores.

El levantamiento y cartografía geológica a nivel local consistió en primera instancia en la recopilación, procesamiento y evaluación de la información secundaria disponible tales como: informes anteriores, bases cartográficas del IGAC, fotografías aéreas, entre otras. Como segunda medida, se adelanto un trabajo de reconocimiento de campo que involucró actividades de exploración superficial levantamiento de datos estructurales y columnas estratigráficas, y la comprobación de la fotointerpretación realizada previamente. Por último, se complementó el estudio con la exploración del subsuelo programada para fines geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos (sondeos, apiques, y trincheras), la cual ha provisto al proyecto de información útil para la evaluación de amenaza de la zona.

A continuación se relacionan paso a paso las actividades ejecutadas para en el desarrollo del componente geosférico:

3.2.1 Metodología

a) Fase preliminar

- Reconocimiento general del terreno e identificación de las problemáticas y potenciales zonas de inestabilidad.
- Levantamiento y digitalización del plano topográfico a escala 1:500.
- Obtención de fotografías aéreas en las escalas disponibles.
- Obtención de planos topográficos a escala 1:25.000, 1:10.000, y 1:2000, disponibles en el IGAC.
- Recopilación bibliográfica de información geotécnica, geológica, climatológica, hidrológica, hidrogeológica, etc. existente del área de estudio en las diferentes entidades públicas y privadas.

b) Fase de campo

- Geología - Geomorfología
- Levantamiento de datos estructurales y de columnas estratigráficas detalladas de las formaciones y litologías aflorantes.
- Interpretación de fotografías aéreas a escalas y años diferentes para estudiar los rasgos geológicos y geomorfológicos más notorios.
- Elaboración del mapa geológico detallado del área de estudio, diferenciando los materiales litológicos y depósitos antrópicos de interés.
- Elaboración del mapa geomorfológico detallado del área de estudio, diferenciando los modelados (morfogénesis) y geoformas (morfología) presentes en el área.
- Toma de fotografías convencionales destacando las características de importancia.
- Fase de resultados y elaboración del informe final

Por lo anteriormente mencionado, las labores preliminares se enfatizaron en la interpretación fotogeológica, la corroboración y complementación de la cartografía geológica regional y local en campo y el reconocimiento de las unidades litológicas aflorantes, sin asociarlas en primera instancia a las unidades litoestratigráficas descritas en informes o planos geológicos seleccionados en la recopilación de información.

La cartografía geológica se concentró en definir depósitos recientes, antrópicos y unidades litológicas aflorantes en los escarpes y cortes hechos por actividades mineras y asentamientos, describiendo su litología, texturas y estructuras locales relacionadas. Posteriormente, la información colectada de las unidades litológicas descritas y reconocidas en los trabajos de campo, se asoció con la leyenda geológica del mapa elaborado, relacionándola con la secuencia litoestratigráfica regional descrita por INGEOCIM LTDA. – UPES – FOPAE. 1998, Moya & García – DPAE. 2002, GEOCING Ltda.-DEPAE. 1999.

3.2.2 Información Existente Analizada

Para el desarrollo de la geología regional se revisaron los estudios reseñados a continuación:

- Civiles Ltda. 2003. Estudio de riesgo por remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del barrio Soratama en la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno FOPAE.
- Consorcio Geotec. 2006. Estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las medidas recomendadas en el barrio Arauquita segundo sector, ubicado en la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno FOPAE.

- Fierro Morales, J. 2005. Geología y geomorfología detallada de la Aula ambiental de Soratama (Localidad de Usaquén, Bogotá). Informe interno DAMA.
- Geocing Ltda. 1998. Evaluación y zonificación de riesgos del barrio Arauquita. Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno Fondo de desarrollo local de Usaquén.
- GIA Consultores Ltda. 2005. 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 Mirador del Norte de la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno DPAE.
- Hidrotec Ltda. 1998. Estudios y diseños de estabilidad de taludes, control de erosión y manejo de aguas para la estabilización de diferentes sitios en la ciudad de Santa Fe de Bogotá – Grupo 3. Informe interno FOPAE.
- Indesa Ltda. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio El Codito, Localidad de Usaquén. Informe interno DPAE.
- Ingemétrica Ltda. 1999. Zonificación de amenazas y riesgos por remoción en masas, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras para estabilizar el antiguo escarpe de extracción frente al barrio Soratama. Localidad de Usaquén. Informe interno FOPAE.
- Ingeocim Ltda. 1998. Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades de la ciudad de Santa Fe de Bogotá D.C. Informe interno FOPAE.
- Moya y García Ltda. 2002. Estudio de riesgo por remoción en masa para los barrios Cerro Norte y Villa Nidia de la localidad de Usaquén y Diseño de obras de control, protección y estabilización. Informe interno DPAE.
- Rocas y Minerales Ltda. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio El Codito III Sector, Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno DPAE.
- Universidad Nacional de Colombia. 2000. Diseños detallados para la reconformación geotécnica y ambiental de la antigua cantera Soratama. Informe interno DAMA.

Para la realización de la geología local se revisaron y analizaron los siguientes documentos:

-INGEOCIM LTDA. – UPES – FOPAE. 1998

La cartografía de este estudio se presentó a escala 1:10.000. Se destacan varios aspectos geológicos de importancia para nuestra interpretación en el marco local, que se relacionan a continuación.

- La definición en el área de estudio de una estructura transversal (falla de rumbo) con dominio de rumbo o dirección NW-SE, y levemente SW-NE. En esta cartografía la estructura se denomina Falla de San Cristóbal.

- Esta estructura es incongruente en esta cartografía, debido a que muestra un movimiento leve en la traslocación de estructuras y contactos inferidos, sobre un depósito Cuaternario.

- Definen los materiales aflorantes en la zona de estudio como pertenecientes a la Formación Labor.

- En cuanto a la descripción litológica de esta formación, se lee: "En la parte inferior de la formación las areniscas son de grano fino, arcillosas, grisáceas a blancas. Ocurren en bancos gruesos separados por capas finas de arcillolitas blancas. Las areniscas son compactas.

- La parte intermedia de la formación consta de una intercalación de estratos de espesor aproximadamente igual entre areniscas, lodolitas y arcillolitas. Las areniscas son arcillosas, de grano fino a medio y aún grueso y de color blanco a pardo amarillento.

- En la parte superior de la formación las areniscas son arcillosas, con estratificación gruesa y compactación variable. Son de color blanco a pardo amarillento, de grano medio a grueso.

- La arenisca de Labor termina con un horizonte de espesor variable (20 a 40 m) de una interestratificación fina, entre areniscas, lodolitas y arcillolitas, con colores grises a gris violáceo y amarillento."

-GEOCING LTDA., 1999.

El estudio se denominó Evaluación y Zonificación de Riesgos Barrio Arauquita, Localidad de Usaquen.

En cuanto a la geología, definen los materiales aflorantes en la zona de estudio como pertenecientes a la Formación Labor, la cual está constituida por areniscas cuarzosas, blancas o gris claras y ocasionalmente amarillentas, de grano muy fino hasta medio, con dureza y resistencia de moderada a alta, las cuales están dispuestas en bancos delgados hasta muy gruesos, con intercalaciones delgadas hasta gruesas de arcillolitas gris verdosas, laminadas, débiles y limolitas silíceas gris verdosas, y la dividen entres segmentos o unidades de roca: Sucesión de bancos de arenisca, Secuencia de arcillolita y limolita silícea, y Secuencia alterna de limolita y lodolita silícea, arcillolita y arenisca.

Se trato de comparar las columnas estratigráficas levantadas en el estudio de Geocing Ltda., 1999, con las del presente estudio y no se encontró reciprocidad o similaridad litológica, en cuanto a las secuencias verticales.

-MOYA & GARCIA LTDA. – DPAE. 2002.

El estudio se denominó "Estudio de riesgo por remoción en masa y diseño de obras de control, protección y estabilización para los barrios Cerro Norte y Villa Nidia de la Localidad de Usaquén".

En cuanto a la geología, definen los materiales aflorantes en la zona de estudio como pertenecientes a la Formación Labor, la cual la dividen entres segmentos o unidades de roca: "Se levantó una columna estratigráfica a escala 1:100 con el fin de definir las diferentes litologías a cartografiar en el mapa geológico. La columna se levantó sobre el flanco sur o izquierdo del deslizamiento, en donde hay una buena exposición de la roca gracias a un antiguo talud de explotación sobre una cantera abandonada (Boca Colina). Se levantaron en total 45 m de columna sobre la Formación Arenisca de Labor, a partir de la cual se identificaron tres litologías o miembros informales que se describen a continuación: Cuarzoarenita Superior, Secuencia de Lodolitas y Cuarzoarenita Inferior."

En el presente estudio, observamos litologías similares y correlacionables en la descripción que hacen de las dos ultimas unidades de roca, de Moya & García, 2002.

-INGEOMINAS, 1997.

Del estudio denominado Microzonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá, se realiza la siguiente descripción litoestratigrafica sobre la Formación Labor y Tierna (Ksglt).

La secuencia litológica de base a techo está representada por un conjunto inferior de areniscas cuarzosas gris claras a blancas, y pardo amarillentas de grano muy fino a medio y esporádicamente grueso a muy grueso, subangular a redondeado, de moderada a bien sorteadas, ligeramente friables a duras, estratificación delgada a gruesa, con delgadas intercalaciones de paquetes de arcillolitas, limolitas silíceas y lodolitas. La parte superior del conjunto corresponde a un paquete interestratificado de 10 a 15 m de espesor, de lodolitas silíceas y arcillolitas. El espesor de la unidad medido en zonas fuera del área de estudio oscila entre 150 y 180 m.

3.2.3 Fotointerpretación

Esta labor se adelanto sobre las fotografías relacionadas en la **Tabla 4**, preparando sobre ellas la cartografía preliminar a nivel regional, en la que se determinaron rasgos estructurales, litológicos y geomorfológicos.

Esta evaluación integra fotografías aéreas cronológicamente de diferentes épocas, comprendiendo un lapso de tiempo, entre los años 1940 a 1998.

La fotogeología fue una herramienta definitiva e importante, más que para reconocer unidades fotogeológicas, nos fue útil para evaluar la existencia o no de procesos morfodinámicos regionales, que pudieran estar incidiendo, afectando u originando procesos locales y de menor escala.

Esta labor se adelantó sobre las fotografías relacionadas en la **Tabla 4**. En ellas se determinaron algunos rasgos estructurales, litológicos y geomorfológicos regionales, y contactos fotogeológicos entre unidades litoestratigráficas y diferenciación de algunas zonas con presencia de depósitos coluviales y antrópicos.

Tabla 4. Fotografías Aéreas de Referencia

VUELO	Año	ESCALA	SOBRE	FOTOS
C61	1940	15.000	896	451 y 452
C770	1956	9.000	2923	10 y 11
C1080	1960	20.000	22334	233 a 235
C1402	1972	11.000		098
C1439	1973	10.000	26470	194 a 196
C1797	1977	43.000	29114	231 a 233
C1950	1980	8.800		18
C42067	1982	38.000	31592	193 a 195
SAV415	1998	19.000	8791	173 y174

El área de estudio corresponde a una ladera de origen estructural, intervenida (agradacional y denudacional), de pendiente media a alta, y cuya litología varía desde un substrato rocoso de composición arenosa con delgadas intercalaciones de limonitas y arcillolitas y depósitos gravitacionales y antrópicos.

El área de influencia en donde se asienta el sector del barrio Villa Nidia en la actualidad corresponde o hace parte de la cuenca de la quebrada San Cristóbal, cuyo cauce intervenido, y algunas veces ocupado, baja desde los Cerros Orientales (desde cotas por encima de los 3.000 m.s.n.m.), con dirección sureste-noroeste, y tipo de drenaje paralelo a subparalelo. La cuenca conforma un valle en V, de media a alta pendiente.

Observando las fotografías aéreas desde las más antiguas a las más recientes, se aprecia que se fue construyendo debido a las actividades mineras un escarpe prominente en forma semicircular (con dirección NE-SW, en su parte frontal) al costado centro oriental del punto de ubicación (centroide) del área de estudio. Este escarpe está conformado por estratos competentes (areniscas del Grupo Guadalupe, Formación Labor) que buzan hacia el NW, en cuya base se presenta una intercalación de limolitas y arcillolitas.

El sector del barrio Villa Nidia, está conformado por un terreno estructural, consecuencia de la dinámica y tectónica regional, de estilo homoclinal (los estratos presentan el mismo sentido de buzamiento y ángulo de inclinación), en pendiente estructural.

Sobre esta ladera estructural, de constitución rocosa, se presentan depósitos de origen gravitacional y antrópico. Los sectores norte y sur del escarpe sirven como divisoria de aguas.

De acuerdo a la interpretación de fotografías aéreas, se pudo establecer que no existen procesos morfodinámicos regionales. Los procesos existentes se relacionan con problemas de inestabilidad locales asociados al corte, extracción y disposición de materiales para la construcción, que posteriormente se consolidaron (grado de consolidación medio a bajo), y que por el escurrimiento subsuperficial y la carga de las aguas infiltradas (naturales y servidas), se han deslizado tomando como base el sustrato rocoso o han sufrido "desgarres" o desplomes sobre el mismo material.

Como proceso morfodinámico de importancia, se hace énfasis en el sector central (cancha de microfutbol) y hacia el escarpe, en donde se presenta un deslizamiento traslacional, que involucra un depósito acumulado por actividades mineras, sobre un sustrato rocoso arcilloso húmedo.

Es de anotar, que otros procesos morfodinámicos (desplomes) evidenciados (cicatrices y/o coronas) en la zona de estudio, son de pequeña escala, magnitud e intensidad, pero si no son controlados pueden originar en un futuro por remoción de material, estancamiento, y represamiento del cauce, lo que puede conllevar al origen de procesos y/o fenómenos de carácter regional.

Se destaca además un predominio de estructuras (lineamientos fotogeológicos) con rumbo NWW-SEE, y una polaridad (no muy bien definida) del azimut de los estratos hacia el NW, con baja inclinación. El tren estructural o dominio de rumbo de las unidades litoestratigráficas y de las estructuras es predominantemente NNE-SSW, con sentido de buzamiento hacia el W-NW. La totalidad de las apreciaciones señaladas fueron corroboradas en el trabajo de campo y con algunos planos geológicos regionales.

Las quebradas menores poseen un drenaje subparalelo controlado por la topografía y la litología, tienen una dirección de escurrimiento hacia el occidente-noroccidente, hasta que desembocan en los drenajes o canales de la planicie de la ciudad.

El patrón de drenaje varía de paralelo a subparalelo de baja densidad. La vegetación no es muy densa. Esta se densifica parcialmente en la zona escarpada, al oriente del área de estudio, y está representada por zonas de pastos, arbustos y rastrojos.

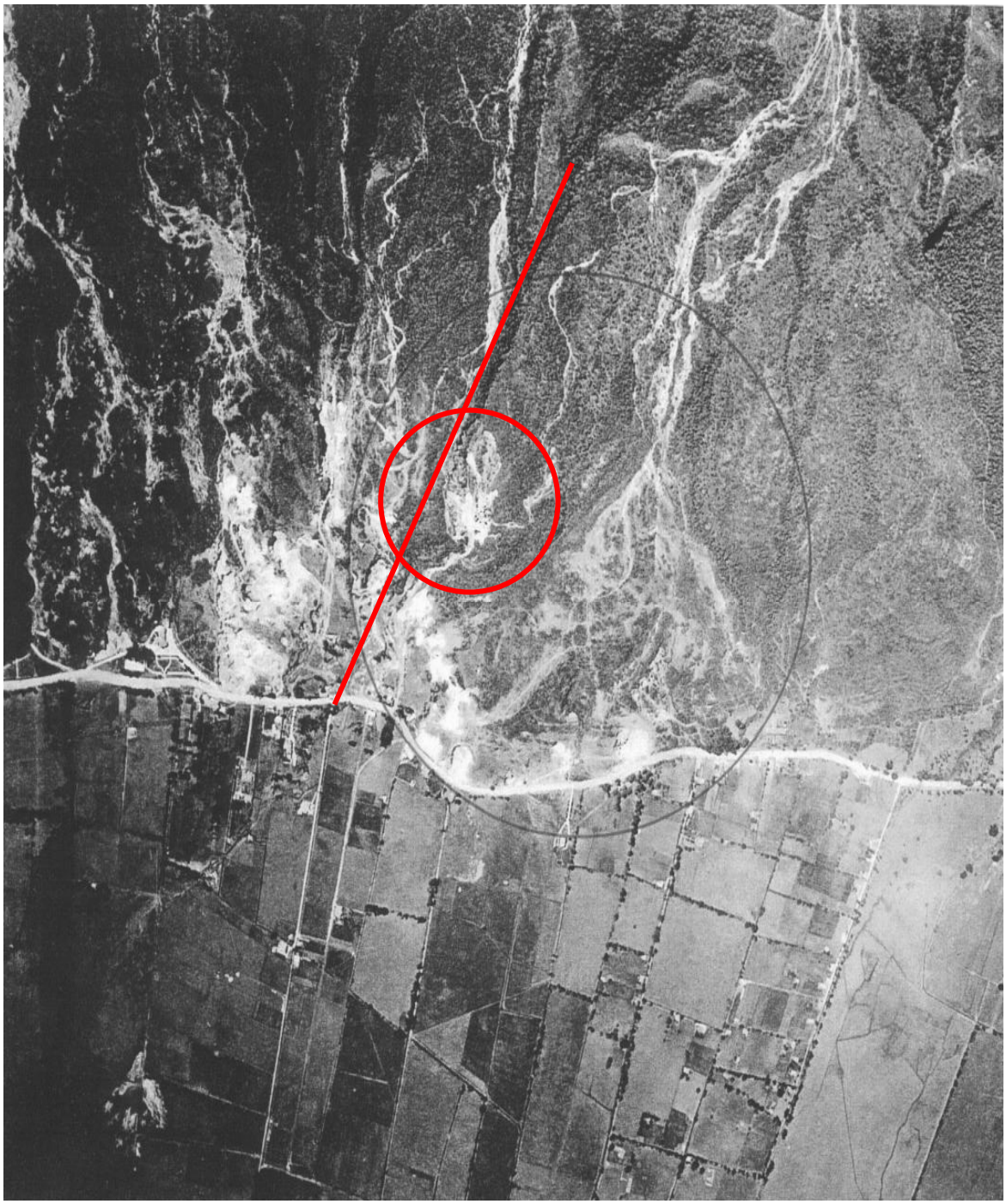


Foto 1. Vuelo c61, Fecha abril 27/1940, Esc. 1:15000 (de toma)

Para el año 1940, se evidencian las primeras cicatrices de erosión por la intervención antrópica relacionada con la explotación de materiales de construcción. En el círculo se enmarca el área actual del barrio Villa Nidia. Se grafica también el lineamiento de la quebrada San Cristóbal. La ladera ya esta intervenida y la mayoría de explotaciones mineras se localizan a nivel de la carrera Séptima.

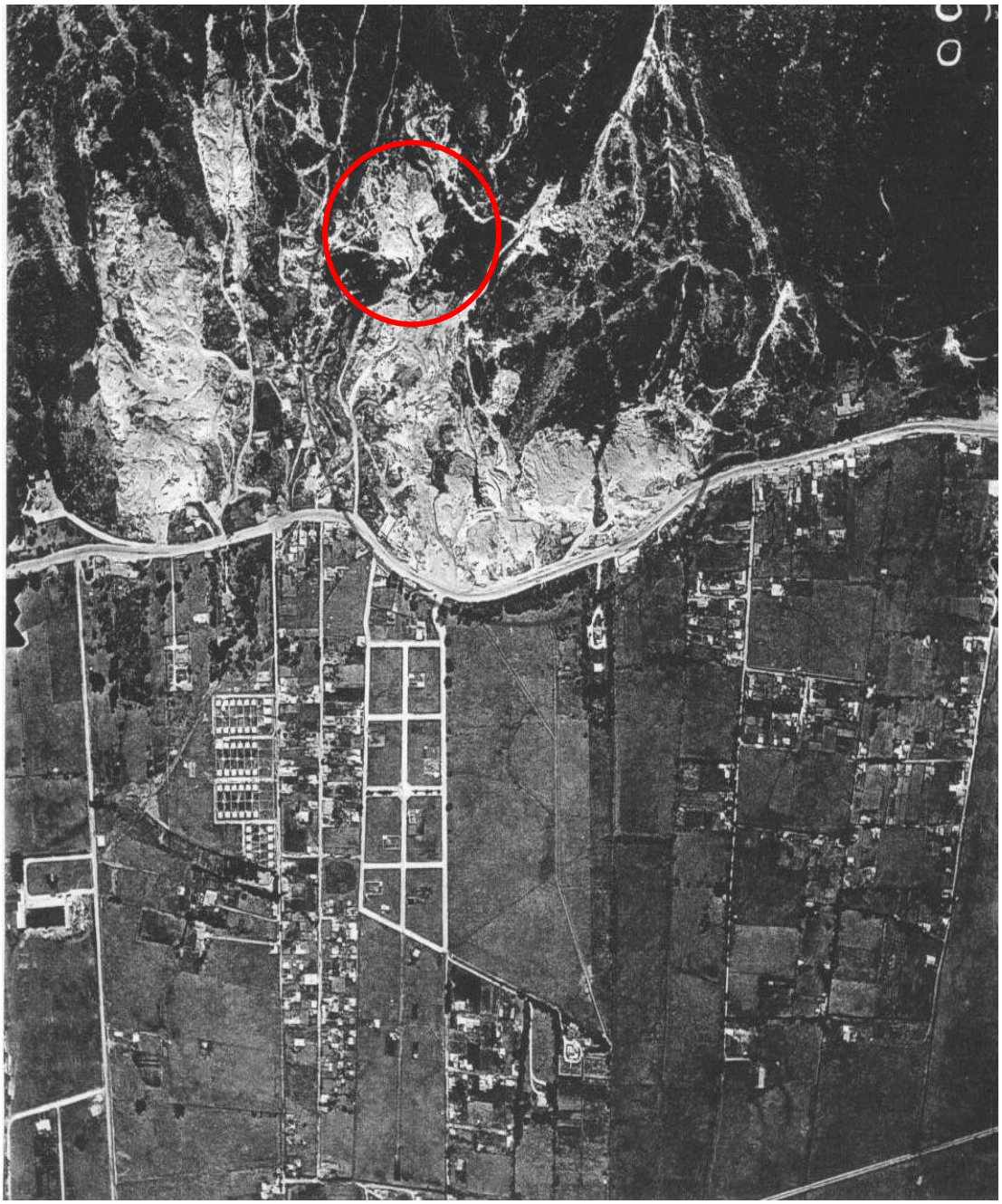


Foto 2. Vuelo: C772-IGAC, fecha: febrero 15/1956, Esc. 1:9000 (de toma).

Casi quince años después, la ladera se encuentra muy intervenida por explotaciones de materiales que han desnudado y expuesto el substrato rocoso. Aparentemente la carrera Séptima ya se encuentra pavimentada. En el área del barrio Villa Nidia (circulo rojo) ya se nota el escarpe de explotación.



Foto 3. Vuelo: C 1080-IGAC, fecha: 1960, Esc. 1:20000 (de toma)

La intervención antrópica en la ladera es de alta importancia y se intensifica en las zonas en donde actualmente se ubican los barrios Cerro Norte y santa Cecilia. En el área del barrio Villa Nidia, el cauce de la quebrada San Cristóbal esta completamente intervenido, y se evidencia el escarpe de explotación de material de construcción.

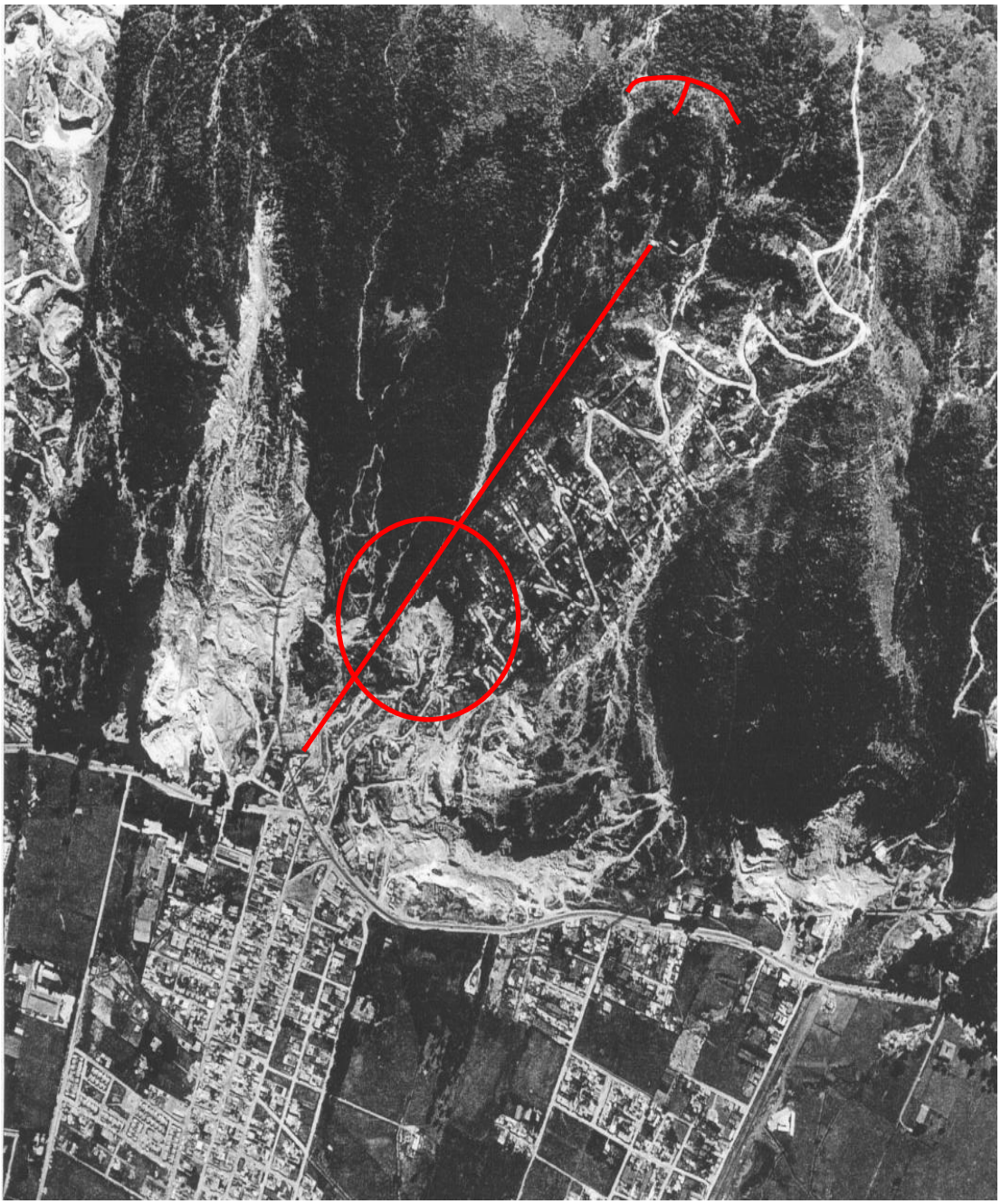


Foto 4. Vuelo: C 1402-IGAC, fecha: febrero/1972, Esc. 1:11000.

La ladera se encuentra intervenida por explotaciones mineras, y en este periodo ya se han construido vías ascendentes y viviendas ocupando los cerros. En la parte superior se dibujo el sentido de buzamiento de los estratos de la ladera, conformando una pendiente estructural. Aparentemente el escarpe ya se encuentra cubierto con vegetación, indicándonos que la explotación en el sector del barrio Villa Nidia fue abandonada.



Foto 5. Vuelo C 1796-IGAC, fecha: diciembre 16/1977, Esc. 1: 7800 (de toma).

Al igual que la fotografía anterior (1972), la ladera se encuentra intervenida por explotaciones mineras, y por vías y viviendas. Asimismo, aparentemente el escarpe ya se encuentra cubierto con vegetación, indicándonos que la explotación en el sector del barrio Villa Nidia fue abandonada. Las explotaciones se concentran en el sector de Santa Cecilia y Cerro Norte.

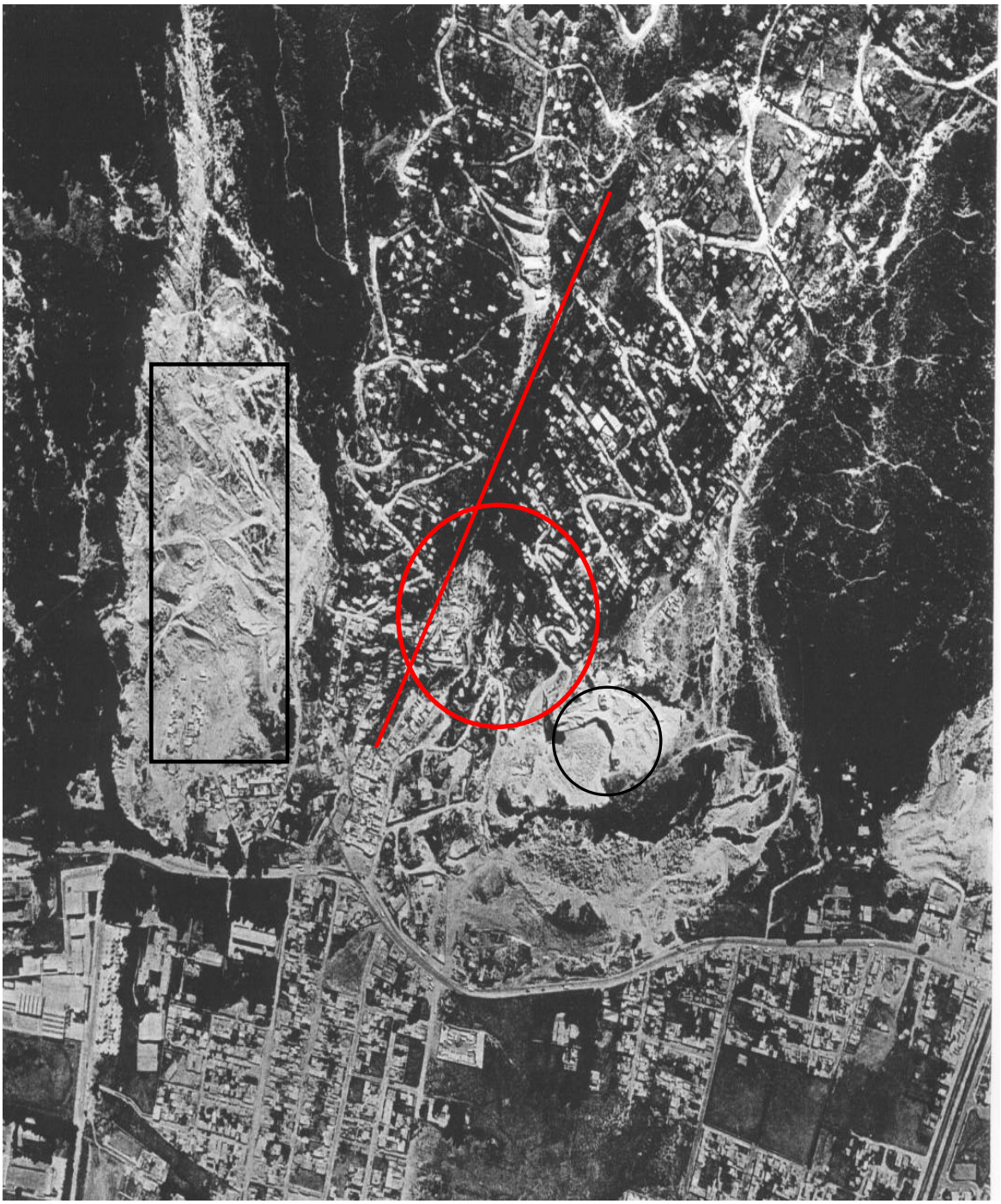


Foto 6. Vuelo: C 1950-IGAC, fecha: febrero 15/1980, Esc. 1:8800 (de toma).

En esta fotografía se muestra bien el lineamiento de la quebrada San Cristóbal. El escarpe del barrio Villa Nidia, se encuentra cubierto por vegetación (circulo rojo). Este sector, se puede comparar las zonas desnudas de las explotaciones del Cerro Mirador (circulo negro) y Santa Cecilia (rectángulo).



Foto 7. Vuelo C -2067, IGAC sobre 31592, fecha: 1982-1983, Esc. 1:38000.

A comienzos de la década de los ochentas, el sector del barrio Villa Nidia y de la cuenca de la quebrada San Cristóbal se presenta intervenido por asentamientos y viviendas.



Foto 8. Vuelo: C 2265-IGAC, fecha: diciembre 27/1986, Esc. 1:23400 (de toma).

Para este periodo, la cuenca de la quebrada San Cristóbal se encuentra intervenida por todos sus puntos cardinales. El escarpe rocoso producto de la explotación se observa de tono oscuro (por la cobertura vegetal), dentro del círculo rojo.

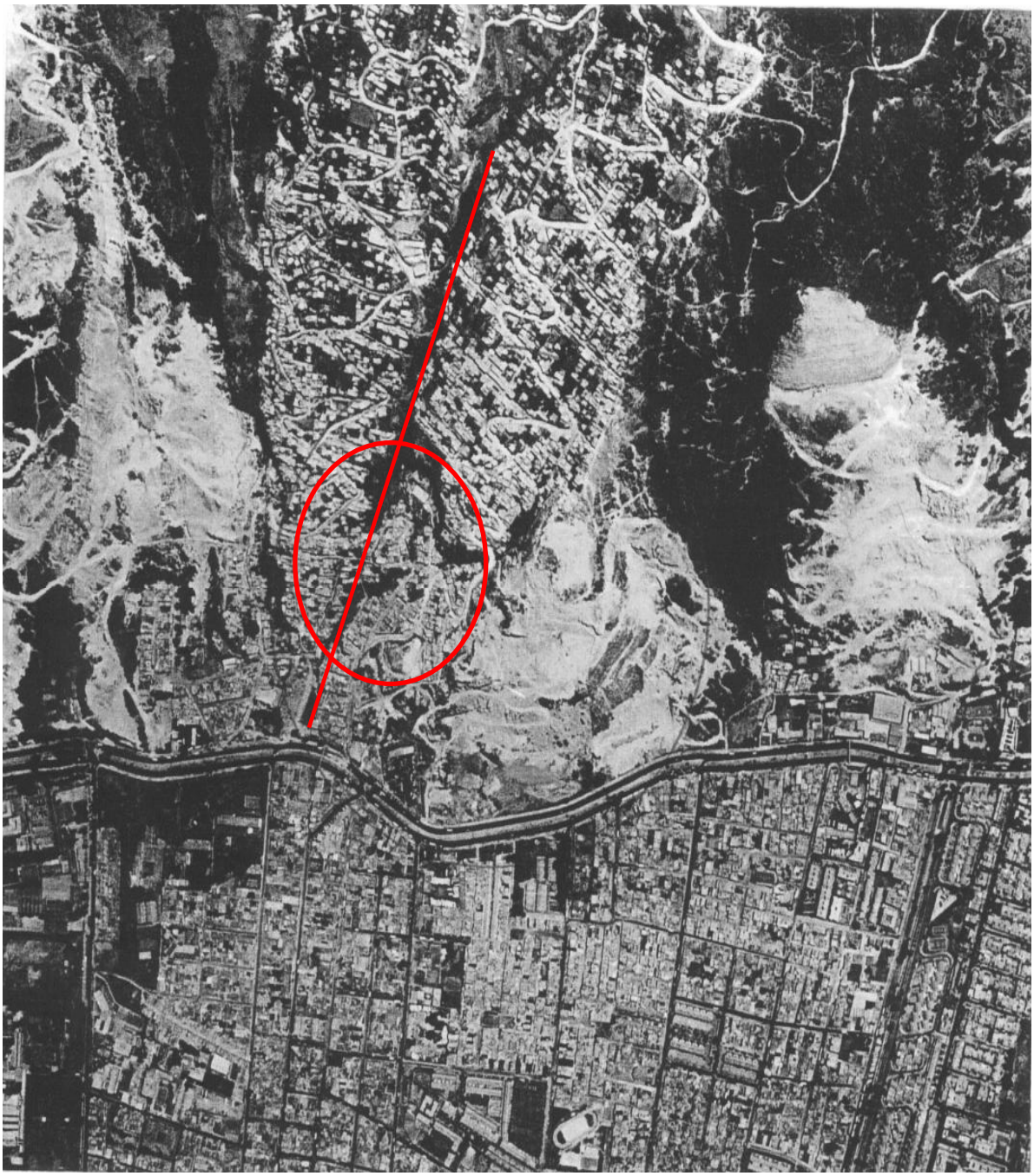


Foto 9. Vuelo: 415-SAV, fecha: febrero/1998, Esc. 1:21000 (de toma).

En la fotografía de este año, se alcanza a apreciar la cancha de microfutbol que sirve de centroide al área de estudio, y se observa que el movimiento de remoción en masa que esta cubriendo la cancha no se ha producido. Esta foto refleja el estado actual del sector con su escarpe rocoso cubierto con vegetación, y el lineamiento de la quebrada San Cristóbal, siendo la característica principal morfológica.

3.2.4 Trabajo de campo

La labor de campo se adelantó durante tres semanas, ya que en la medida que avanzaban las actividades de revisión cartográfica, comprobación de la fotointerpretación y exploración superficial, las condiciones geológicas planteadas en el modelo inicial fueron cambiando y haciéndose con más detalle, en virtud de la exploración del subsuelo, la definición de unidades de roca y de la heterogeneidad de los depósitos recientes y antrópicos, y a la disposición urbanística del sector.

La comprobación se efectuó mediante el reconocimiento de las unidades litológicas aflorantes, sin asociarlas en primera instancia a las unidades descritas en informes o planos geológicos seleccionados en la recopilación de información.

La cartografía geológica se concentró en definir depósitos recientes, antrópicos y unidades litológicas aflorantes en los escarpes y cortes, hechos por las actividades mineras y por los asentamientos, describiendo su litología, texturas y estructuras locales relacionadas.

3.3 Geología Regional

La Sabana de Bogotá forma parte de una cuenca sedimentaria plegada y tectonizada, constituida por varios ejes anticlinales donde afloran formaciones constituidas, principalmente, por areniscas y arcillolitas, de edades Cretácicas tardías hasta Neógenas, depositadas en medios marinos (Grupo Guadalupe), transicionales (Formación Guaduas), hasta continentales (Formación Bogotá, Regadera, etc.). Esas formaciones antiguas se erodaron en parte durante fases de plegamiento y de manera fuerte durante y después del levantamiento de la Cordillera Oriental a partir del Mioceno. Los materiales erodados y transportados fueron redepositados en las depresiones y dentro de la cuenca durante el (Mio-) Plioceno y el Cuaternario y dieron lugar a gran variedad de depósitos no litificados de composición heterogénea, que recubren, en algunos casos parcial o totalmente, las formaciones antiguas. De estos depósitos, los más viejos fueron sometidos a intemperismo en condiciones tropicales durante el Plioceno, y en condiciones de montaña tropical de altitud a partir del Pleistoceno. Por otro lado, en el transcurso del Plioceno y del Cuaternario se ha puesto en evidencia la existencia de niveles de cenizas, provenientes de los centros volcánicos de la Cordillera Central que hicieron erupción durante ese lapso de tiempo (Ingeominas, 2003).

La zona trabajada hace parte de la porción nororiental de los Cerros Orientales, en particular de la Sierra de Usaquén. Se circunscribe en el cuadrángulo: (115.000N, 105.000E), (115.000N, 108.000E), (119.000N, 105.000E) y (119.000N, 108.000E). Su morfología es de pendiente (o ladera) estructural con gradientes que varían entre 10 y 30º. Las laderas se encuentran en el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá-Usaquén; la estructura está limitada al occidente por la Falla de Bogotá, que separa los Cerros de la zona de Sabana. Además de la falla principal, trasiegan numerosas

fallas con dirección NW-SE y lineamientos con dirección aproximada E-W. (Véase **GE 147-PL1-02**).

El flanco occidental del Anticlinal de Bogotá – Usaquén se expone generalmente inclinado hacia el occidente, razón por la que el buzamiento de los estratos es desfavorable a la estabilidad en los cortes de cantera (en particular donde ellos son paralelos o sub-paralelos al rumbo de las capas).

Desde el punto de vista litológico, en la mayor parte de la vertiente afloran areniscas de la Formación Arenisca Tierna del Grupo Guadalupe (finales del Cretácico) dispuestas en capas gruesas con delgadas intercalaciones de lodolitas grises claras generalmente ondulosas; sin embargo, en el extremo sur (sector de Villa Nidia) afloran areniscas de grano fino, bien cementadas intercaladas con lodolitas grises oscuras generalmente dispuestas en geometrías plano-paralelas propias de la Formación Arenisca de Labor del Grupo Guadalupe. Las secuencias rocosas están parcialmente cubiertas por: suelos residuales, transportados (gestados por procesos gravitatorios, aluviales y fluvio-glaciales) y negros (provenientes de la meteorización de cenizas volcánicas junto con limos y arenas finas probablemente transportadas por el viento y granos de arena provenientes de la meteorización de las capas de arenisca) de carácter limo-arenoso; y por depósitos antrópicos relacionados con la extracción de materiales y la adecuación de terrenos con fines urbanísticos .

En este estudio se presenta una compilación a partir del análisis de la información existente, de la fotointerpretación **ANEXO II-A** y del conocimiento de los consultores en la geología de la zona y sus alrededores. Se revisaron los estudios reseñados a continuación:

- Civiles Ltda. 2003. Estudio de riesgo por remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del barrio Soratama en la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno FOPAE.

- Consorcio Geotec. 2006. Estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las medidas recomendadas en el barrio Arauquita segundo sector, ubicado en la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno FOPAE.

- Fierro Morales, J. 2005. Geología y geomorfología detallada de la Aula ambiental de Soratama (Localidad de Usaquén, Bogotá). Informe interno DAMA.

- Geocing Ltda. 1998. Evaluación y zonificación del riesgo del barrio Arauquita. Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno Fondo de desarrollo local de Usaquén.

- GIA Consultores Ltda. 2005. 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 Mirador del Norte de la Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno DPAE.

- Hidrotec Ltda. 1998. Estudios y diseños de estabilidad de taludes, control de erosión y manejo de aguas para la estabilización de diferentes sitios en la ciudad de Santa Fe de Bogotá – Grupo 3. Informe interno FOPAE.

- Indesa Ltda. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio El Codito, Localidad de Usaquén. Informe interno DPAE.

- Ingemetrica Ltda. 1999. Zonificación de amenazas y riesgos por remoción en masas, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras para estabilizar el antiguo escarpe de extracción frente al barrio Soratama. Localidad de Usaquén. Informe interno FOPAE.

- Ingeocim Ltda. 1998. Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades de la ciudad de Santa Fe de Bogotá D.C. Informe interno FOPAE.

- Moya y García Ltda. 2002. Estudio de riesgo por remoción en masa para los barrios Cerro Norte y Villa Nidia de la localidad de Usaquén y Diseño de obras de control, protección y estabilización. Informe interno DPAE.

- Rocas y Minerales Ltda. 2000. Estudio de riesgos por remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio El Codito III Sector, Localidad de Usaquén, Bogotá. Informe interno DPAE

- Universidad Nacional de Colombia. 2000. Diseños detallados para la reconformación geotécnica y ambiental de la antigua cantera Soratama. Informe interno DAMA

3.4 Estratigrafía

En los estudios regionales y locales consultados para producir el Mapa geológico regional **GE 147-PL1-02**, existen divergencias sobre los límites de las unidades litológicas. Upes-Ingeocim, op. cit. muestra que la parte de pie de ladera está constituida por la Arenisca de Labor (Ksgl); sin embargo, los levantamientos detallados llevados a cabo en el marco de diferentes estudios locales, entre los que se cita éste, fijan a partir de la Calle 166 y hacia el norte (al menos hasta el extremo norte del perímetro urbano de Bogotá en el Piedemonte) el pie de ladera labrado en su totalidad por la Fm. Arenisca Tierna.

Las diferencias entre estos dos grupos: son fundamentalmente: a).Texturales; Labor es predominantemente una arenisca de grano fino a medio mientras que Tierna es una arenisca de grano grueso e incluso guijosa; b). De cementación, Labor es bien cementada mientras que Tierna es friable y con un porcentaje mayor de matriz; y c). De estructuras sedimentarias, labor presenta láminas de menos de 2 mm con

contenido de lodos generalmente bioperturbados y en Tierna son comunes estructuras sedimentarias mayores como estratificación interna inclinada.

Hecha esta aclaración y bajo la premisa anterior, se fija el contexto estratigráfico basado en Julivert (1968) y Van der Hammen (1995); el primero para Guadalupe y el segundo en lo que respecta a la Formación Sabana.

3.4.1 Grupo Guadalupe (Ksg)

Nombre: Propuesto por Hettner (1892) y redefinido por Hubach (1957) y Renzoni (1968) que lo subdividieron en Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp) y Labor y Tierna (Ksglt). El nombre de esta unidad procede del Cerro de Guadalupe: Sierra de Bogotá, en la parte central – sur de los Cerros Orientales (Julivert, 1968).
Edad: Cretácico Tardío (Campaniano - Maastrichtiano Superior: 70 a 65 Ma antes del presente).
Lugares donde aflora: La Formación Arenisca Tierna conforma el sustrato rocoso de los polígonos de El Codito y Mirador del Norte y la Formación Areniscas de Labor entalla el de Villa Nidia.
Uso como material de construcción: El Grupo Guadalupe ha sido explotado para obtener arenas, rajones, postes para cerca, placas para mampostería, etc. En particular, la Formación Arenisca Tierna fue explotada en El Codito, como fuente de "arena de peña", usada especialmente para mezclas de morteros (pañetes).

3.4.2 Características físicas de la roca en el área tipo

Este aparte se base en el trabajo de Pérez y Salazar (1978) que estudiaron de manera detallada el Grupo Guadalupe en los Cerros Orientales de Bogotá.

Formación Arenisca de Labor

Encierra hacia la base areniscas arcillosas, grisáceas a blancas de grano muy fino a fino, bien seleccionadas. Yacen en bancos gruesos separados por capas finas de arcillolitas, frecuentes y de mayor espesor en la base. Muestran fracturamiento prismático, laminación y estratificación gradada.

En la parte superior se expone en intercalaciones de areniscas con horizontes de lodolitas dispuestas en paquetes con espesores similares. Las areniscas son arcillosas con granulometría variable de muy fina a fina, con porciones de grano medio a grueso. Son comunes: la ocurrencia de ondulitas, la estratificación ondulosa, ondulosa lenticular y esporádicamente la laminación plano-paralela. Los icnofósiles son escasos.

El espesor de la Formación en Usaquén es de aproximadamente 75 metros (según datos expuestos en el Léxico Estratigráfico Internacional, Julivert, 1968) y de 177 metros de acuerdo con las secciones levantadas por Pérez y Salazar (op. cit.) en los afloramientos ubicados en las quebradas El Higuerón y La Vieja.

Formación Arenisca Tierna

Está constituida hacia la base por una intercalación de bancos gruesos de areniscas con bancos menos gruesos de lodolitas finamente interestratificadas. Estas últimas desaparecen hacia el techo y se reducen a delgadas capas de arcillolitas. Las areniscas son arcillosas, esporádicamente sin matriz, de color pardo amarillento a blanco, de grano grueso a muy grueso, con porciones conglomeráticas frecuentes y porciones de grano medio a fino esporádicas. La selección es regular a mala. Es característica la alternancia de bancos de arenisca con estratificación inclinada en cuñas y estratificación ondulosa lenticular en el tope de la formación. Las lodolitas reposan como interlaminaciones paralelas ondulosas o lenticulares de limo o arena muy fina o arcilla. Los icnofósiles entallan principalmente los planos de estratificación y las capas de arcillolitas que separan los bancos de arenisca.

El espesor de la Formación en Usaquén es de 50 a 100 metros (datos expuestos en el Léxico Estratigráfico Internacional, Julivert, 1968) y de 40 metros acorde con las secciones levantadas por Pérez y Salazar (op. cit.) en los afloramientos ubicados de la carretera a Choachí.

3.4.3 Características físicas de la roca en el área de estudio (Villa Nidia, Mirador del Norte y Codito)

Formación Arenisca de Labor (Ksgl): Aflora en el barrio Villa Nidia. Conjuga cuarzo arenitas muy bien cementadas con predominio de grano fino a muy fino (en general bien seleccionadas), con algunos horizontes de grano medio, muy silícea, de tonos blancos, grises claro y amarillentos; dispuestas en capas plano-paralelas, de más de 50 cm de espesor, muy macizas. Las intercalaciones arcillosas y limosas son muy delgadas (menores 1 m).

Formación Arenisca Tierna: Aflora en los barrios El Codito y Mirador del Norte. Está definida por areniscas blancas a grises claras (que alteran a colores amarillentos), de composición cuarzosa y en algunos niveles levemente feldespáticas (con estos minerales alterados a arcillas blancas) de grano medio a grueso (incluso conglomerático), con estratificación gruesa a muy gruesa con presencia de estratificación interna inclinada e icnofósiles en las capas de techo. La cementación es variable, de friables a moderadamente cementadas. Las intercalaciones corresponden a capas de menos de 50 cm de lodolitas (arcillolitas limosas) de colores grises claros, generalmente dispuestas en capas delgadas con estratificación ondulosa paralela y laminación plano paralela.

3.4.4 Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos

Los macizos rocosos variables en composición conjugan el trabajo de cuatro familias principales de diaclasas, incluida la estratificación, rugosas y ligeramente meteorizadas y algunas posiblemente de origen tectónico, su estructura oscila entre masas parcialmente alteradas con bloques angulares multicaras y masas de bloques cúbicos.

Esta representación es más evidente donde predominan las areniscas de regular a buena cementación, con intensidad de fracturamiento variable. Sin embargo, los macizos explotados tienen intercalaciones de lodolitas, que conforman planos a lo largo de los deslizamientos planares de grandes magnitudes, ejemplos tienen lugar en frentes de explotación contiguos o cercanos como: Cerro e Ibiza y El Cedro en Usaquén y la cantera Industrial y Minera La Quebrada y Santa Helena en Ciudad Bolívar y que tuvieron influencia en el deslizamiento de la zona central del barrio El Codito.

La medición de las propiedades geomecánicas de las lodolitas en los estudios de amenaza llevados a cabo por la DPAE, han dado como resultado ángulos de fricción interna de 16 a 18º (que gobiernan las condiciones de estabilidad del macizo), en función de las condiciones de humedad reinantes (Moya y García, 2002). Los deslizamientos ocurren toda vez que se quita el soporte basal a flancos monoclinales con cortes aproximadamente paralelos al rumbo de las estructuras o por pérdida gradual de la resistencia (reblandecimiento). Un proceso con mayor probabilidad de ocurrencia que el anterior pero de menor gravedad en sus consecuencias es la caída de bloques, generada por las discontinuidades en los taludes sub-verticales dejados por la explotación de materiales.

3.4.5 Formación Sabana

Nombre: Propuesto por Hubach (1957). Su nombre procede de la Sabana de Bogotá (Cundinamarca).
Edad: Pleistoceno medio y tardío (1 a 0,2 millones de años, edades basadas en huellas de fisión)
Área tipo y límites: Generalmente suprayace la Formación Subachoque. Su sección tipo es la parte central de la Sabana de Bogotá.

3.4.6 Características físicas del suelo en el área tipo

Aunque está constituida principalmente por arcillas, hacia los márgenes de la cuenca de Bogotá existe un incremento en las intercalaciones de arcilla orgánica, turba/lignita, arcillas arenosas y arenas arcillosas. En el centro de la cuenca reposan aproximadamente los 320 metros superiores de los 586 de espesor total de relleno sedimentario; allí la Formación está constituida por arcillas y en la parte media se encuentran pequeñas intercalaciones de arenas. Los 2 metros superiores presentan un complejo de suelos constituidos por cenizas volcánicas. La secuencia en las perforaciones de la Ciudad Universitaria es de arcillas y arenas arcillosas con intercalaciones de arenas, turba/lignita y algunas gravas. El cambio lateral de facies que se observa en las secciones tipo también es notorio en otras perforaciones, es decir hay un incremento en las arenas e intercalaciones locales de turba, corriente arriba a lo largo de los ríos Bogotá y Tunjuelito.

3.4.7 Características geotécnicas y procesos morfodinámicos típicos

Las dataciones con 14C indican que el marcado descenso del nivel del agua que condujo a la desaparición del gran lago de la sabana tuvo lugar al final del periodo glacial. El nivel del lago descendió en las franjas marginales hace aproximadamente 40.000 años y en el centro de la cuenca hace 28.000 años, y su origen en la erosión fuerte del punto de salida del agua de la Sabana.

Los niveles freáticos, sin embargo, se encuentran cerca de la superficie (1 a 2 metros), con pequeñas variaciones estaciónales que marcan espacios con mayores capacidades portantes en la época seca (dado que la succión aumenta los esfuerzos efectivos también aumentan, que son los que definen la resistencia de los suelos). La zona sometida permanentemente a la presencia de niveles freáticos es menos resistente; los parámetros de resistencia que gobiernan las arcillas, tales como el ángulo de fricción interna y la cohesión disminuyen en condiciones de humedecimiento y por consiguiente los cortes de excavaciones y las capacidades portantes son menores.

3.5 Geología Estructural

Las rocas de la zona de estudio conforman el flanco occidental del Anticlinal de Usaquén, la que representa la principal estructura del área. Este pliegue amplio presenta un rumbo general norte-sur y sobre sus flancos son comunes las fallas de rumbo con componente normal, que afectan las rocas cretácicas del Grupo Guadalupe. Para la mayor parte de la zona de estudio, las fallas medidas, alineamientos de brechas tectónicas y la mayor parte de lineamientos fotogeológicos, lomos estructurales, cursos de quebradas no consecuentes, etc. corresponden a direcciones entre N20W y N40W. Hacia El Codito - Mirador del Norte, los alineamientos vuelven a tener direcciones predominantes cercanas a la Norte – Sur. Es importante mencionar que las fallas con dirección NW muestran desplazamientos predominantes de rumbo sinestral y componente menor en la vertical de tipo normal (Fierro Morales J., 2005) que están desplazando las unidades litológicas y ejercen un control estructural muy evidente sobre el drenaje. Además, existen fallas muy localizadas relacionadas con deslizamientos flexurales, probablemente dadas por estructuras gravitacionales donde el pellejo de la estructura se desliza ladera abajo, con dirección NE-SW.

El mapa geológico regional (Plano 1) muestra las tendencias de fracturamiento, graficadas a partir de los datos tomados por diversos estudios locales, todos coinciden con los lineamientos NW y N-S. La tendencia cercana a la E-W establecida en el estudio de Ingeocim (1999) no es predominante, apreciación deducida de los datos de discontinuidades medidas por los estudios revisados.

3.6 Fallas

3.6.1 Falla de Soratama

Su trazo fue definido por Tchemodanova, V. (Universidad Nacional, 2000). En el estudio de Fierro, J. (2005) se la denomina como una falla transtensiva, i.e. de rumbo con un componente menor en la vertical de tipo normal, probablemente sinestral con dirección aproximada N25W, cercana a la vertical. Tiene un patrón anastomosado en planta, con lentes de brechas tectónicas (zonas de daño) hasta de 15 metros de espesor.

3.6.2 Lineamiento de San Cristóbal

Trazada en la cartografía geológica del estudio UPES - Ingeocim (1999). El trazo identificado en dicho estudio atraviesa la zona central del sector de Villa Nidia; sin embargo, no existen evidencias de esta estructura en la geología local levantada (véase Consorcio GIA-Geocing, 2006). Se propone como lineamiento geomorfológico, probablemente debido a la adaptación de los cursos de agua a las pendientes estructurales. La evidencia es la forma casi rectilínea del cauce de la quebrada Santa Cecilia.

3.6.3 Lineamiento de Mirador y Serrezuela

En la cartografía geológica de la UPES - Ingeocim (1999) se trazan lineamientos en el Barrio El Mirador que concuerdan con la geología local realizada. El principal lineamiento de Mirador tiene una orientación de N18E y discurre de norte a sur; el lineamiento Serrezuela exhibe un trazo de 74NE, sobre un alineamiento Este-Oeste.

3.6.4 Otras Estructuras

Además de los indicadores cinemáticos de campo, existe una tendencia fuerte de lineamientos fotogeológicos entre N20W y N40W, los principales exhiben una extensión mínima de 3 kilómetros, concordantes con el patrón de fracturamiento medido en diversos estudios.

También prevalecen lineamientos de dirección E – W no relacionados con sistemas de fracturamiento y que pueden responder al entallamiento de cauces consecuentes con las pendientes estructurales del flanco occidental del Anticlinal de Usaquén.

3.7 Pliegues

3.7.1 Anticlinal de Usaquén

El anticlinal de Usaquén es una estructura asimétrica, cuyo eje lleva dirección aproximada norte-sur y corresponde con la parte alta del cerro de Usaquén. Los buzamientos de las capas del flanco occidental del anticlinal son más fuertes que los del flanco oriental. Este anticlinal se suspende en el sur por la falla denominada como Falla de Usaquén. Los tres polígonos estudiados en este contrato se ubican en el flanco oriental.

3.8 Geología local

En este numeral se realiza una descripción de la geología haciendo énfasis en la estratigrafía y geología estructural aflorante en el área de estudio, para la cual se levantaron dos (2) columnas litológicas, en la que se aprecian las variaciones de los materiales líticos.

Respecto a la comparación o relación de la geología local con la regional, como ya se anotó anteriormente de todos los artículos consultados se extractaron aportes valiosos que se tuvieron en cuenta en la geología local.

La referencia más próxima de la geología regional era el estudio de INGEOCIM LTDA. – UPES – FOPAE. 1998, a escala 1:10.000, pero este presenta la traza de una estructura de falla de rumbo, denominada Falla de San Cristóbal.

El plano IGAC, a escala 1:2000, muestra claramente un lineamiento de la quebrada San Cristóbal, con dirección 305°, que controla el cauce de la quebrada. Cabe anotar que esta quebrada atraviesa el área de estudio con dirección SE-NW.

Sin embargo, en el trabajo de campo se pudo constatar que los estratos presentan continuidad lateral y estructural, homogeneidad en su polaridad, y no hay claras evidencias de fallamiento, como son brechamientos, estrías de falla, etc. Respecto a la exploración del subsuelo se realizaron trincheras, apiques, sondeos, levantamiento de columnas estratigráficas, etc. Las trincheras en su mayoría se realizaron para definir la continuidad de los estratos de arenisca de la formación Arenisca Labor y para conocer el material del subsuelo para el levantamiento de la cartografía geológica. Los apiques se realizaron para constatar la cartografía geológica y para muestrear y clasificar lo materiales. Asimismo tanto los apiques como los sondeos definieron materiales del subsuelo y sus espesores para cada una de las unidades cartografiadas.

Se levantaron columnas estratigráficas (Véase Plano **GE 147-PL1-04**) de la secuencia estratigráfica que permitieron medir espesores de importancia e irlos correlacionando a través del trabajo de campo y la cartografía.

3.8.1 Estratigrafía

Esta descripción se hace desde las unidades más antiguas estratigráficamente, hasta las más recientes.

Cabe destacar que en el área de estudio aflora la Formación Arenisca de Labor (Ksgl), y esta compuesta litológicamente por cuarzoareniscas que texturalmente corresponde a areniscas lodosas y areniscas cuarzosas de grano muy fino, fino a medio y grueso, con intercalaciones delgadas de lodolitas con estratificación plano paralela y ocasionalmente ondulosa discontinua. Hacia la parte superior predominan areniscas de grano medio a fino y un nivel de lodolitas silíceas de aproximadamente 15 m de espesor (denominado por Julivert, 1961, "Plaeners Superiores").

Esta formación fue dividida de acuerdo a "niveles guía", en unidades de roca, los cuales se describen a continuación de base a techo.

Ksgl-al 1

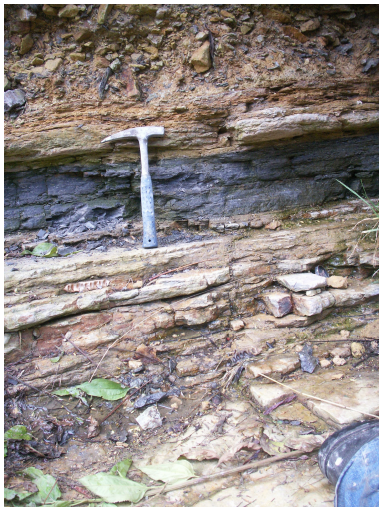
Consta de una intercalación de limolitas y arcillolitas y areniscas de grano fino a muy fino, en capas delgadas, en donde predominan las limolitas. La intercalación esta suprayaciendo una cuarzoarenisca basal. La unidad tiene un espesor de 4.40 m. Las arcillolitas son limosas, grises en secuencias de capas finas, laminación plano paralela, plasticidad media, consistencia media a baja, tonos amarillos de oxidación, homogénea en composición, con fractura concoidea, algo reblandecidas con delgadas intercalaciones de limolitas. Las cuarzoareniscas son de grano muy fino, muy bien cementadas, dureza alta, color gris claro, con fracturamiento ortogonal intercaladas con limolitas grises oscuras de consistencia alta, oxidadas en capas o laminas menores de 2 cm, y arcillolitas. Entre algunos planos de esta secuencia hay emanación e infiltración de agua y esta reblandece la arcillolita.

Las limolitas son grises oscuras en capas hasta de 8 cm intercaladas con delgadas capas de arcillolita a arcillolitas limosas grises intermedias a varicoloreadas, con laminación plano paralela.

En esta sucesión se presenta una capa guía de 20 cm de arcillolita gris oscura, consistencia alta, plasticidad baja, y homogénea en composición, en cuya base se evidencia reblandecimiento del material. La secuencia finaliza con una arcillolita que tiende a limosa, de consistencia alta. Estratificación 292/21, 295/24, 298/24, 298/23, 299/22, 303/20, y 304/26.

Esta unidad aflora en el área de estudio, en todo el cauce de la quebrada San Cristóbal, y en inmediaciones del sector nororiental de la cancha de microfutbol, y son la base del plano de despegue de un deslizamiento traslacional, que se localiza al suroriente de la cancha, y la cubre parcialmente. Ver **Foto 10** y **Foto 11**.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en la perforación 1, en los apiques 2, 13, y en las trincheras 2 y 3.

	
Foto 10. Unidad Ksgl-al1. Arcillolita limosa de color gris-azulada, en capas delgadas, las tonalidades rojizas se deben a la oxidación; se observa laminación plano paralela e intercalaciones de finísimas capas de limolitas en coloraciones verdosas.	Foto 11. Unidad Ksgl-al1. Capas delgadas de arcillolita limosa de color gris oscuro a negro, con algunas coloraciones rojizas a causa de la meteorización.

Ksgl-are 1

Cuarzoareniscas negras a gris oscuras a claras, blancas a amarillenta clara, de grano fino a muy fino, bien seleccionada, en bancos, masivas, muy bien cementadas, dureza alta, muy silíceas, con tonos de oxidación, en capas de 50 cm, 80 cm y 1 m, con muy delgadas intercalaciones arcillosas. Estratificación 299/21, y 312/23. Se presentan diaclasas perpendiculares a la estratificación con azimuth 105/88, 064/90, y 045/79. El espesor de esta unidad es de 7.40 m.

Aflora en la mayor parte del escarpe rocoso producto de la antigua explotación minera, el cual es la geoforma mas representativa del área de estudio. Ver **Foto 12**, **Foto 13**, **Foto 14**, **Foto 15**, **Foto 16**, **Foto 17**, **Foto 18** y **Foto 19**.

	
Foto 12. Unidad Ksgl-are1. Banco de gran espesor de cuarzo arenisca de color gris, que se presenta fracturada con grietas de hasta 5 cm.	Foto 13. Unidad Ksgl-are1. Cuarzo arenisca de color amarillo claro, con tonalidades ocres y rojizas por meteorización. Se presenta en capas de aproximadamente 40 cm, intercaladas por delgadas capas de arcillolita, por donde se observa infiltración de aguas

	
Foto 14. Unidad Ksgl-are1. Intercalación de limolitas con capas delgadas de arcillolitas de colores marrones-rojizos; seguramente reblandecidas por infiltración.	Foto 15. Unidad Ksgl-are1. Se presenta un paquete de cuarzo arenisca bastante espeso en colores que van del gris al marrón, se presenta fracturada con grietas de hasta 5 cms. En la parte inferior se ve claramente el contacto con una unidad blanda de color gris a negro, en capas delgadas, con estratificación plano paralela y muy fracturada

	
Foto 16. Unidad Ksgl-are1. Potente paquete de cuarzo arenisca de color amarillo con tonalidades marrón y blancas causadas por meteorización. Presenta diaclasamiento con aberturas muy amplias	Foto 17. Unidad Ksgl-are1. Detalle del espesor de la abertura de la diaclasa maestra perpendicular a la estratificación de la cuarzoarenisca

	
Foto 18. Unidad Ksgl-are1. Esta fotografía permite observar nuevamente un potente paquete de cuarzo arenisca, que en este caso es masivo, de color gris. Se observa claramente infiltración y escurrimiento de aguas.	Foto 19. Unidad Ksgl-are1. Esta fotografía permite apreciar claramente el fracturamiento que sufrieron las areniscas debido, seguramente a la explotación minera de anos atrás. Se observa varicoloreada, siendo los tonos mas rojizos debidos a meteorización. Adicionalmente, se observa hacia el techo de la arenisca, una unidad blanda con coloraciones amarillo-verdosas, que se presenta en delgadas capas pero en alto grado de meteorización, por lo que difícilmente puede distinguirse la estratificación.

Ksgl-al 2

Sucesión de arcillolitas limosas, color blanco amarillento, muy meteorizada, plasticidad nula, homogénea en composición, estratificación interna plano paralela. Esta secuencia tiene un espesor de 65 cm y se separo de dos se secuencias arenosas masivas, por ser un nivel guía, de clara continuidad en el escarpe rocoso, y de composición arcillosa.

Aflora en la parte media del escarpe rocoso producto de la antigua explotación minera, el cual es la geoforma más representativa del área de estudio.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en la perforación 5.

Ksgl-are 2

Cuarzoareniscas de grano fino a medio, angulares, muy silíceas, muy bien cementadas, bien seleccionadas, duras, macizas, color gris claro y tonalidades pardo amarillentas por oxidación. Se diferencia de la arenisca inferior (Ksgl-are 1) en el tamaño de grano, y esta es levemente friable. Por las diaclasas se presentan infiltraciones de agua subsuperficial. Estratificación 294/34. El espesor medido fue de 4 70 m para esta unidad.

Aflora en la mayor parte del escarpe rocoso (zona superior) producto de la antigua explotación minera, el cual es la geoforma más representativa del área de estudio. Ver **Foto 20** y **Foto 21**.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en las perforaciones 2, 3, 4 y 5, y en las trinchera 1.

	
Foto 20. Unidad Ksgl-are2. Cuarzo arenisca de color amarillo claro a grisáceo, en potentes paquetes masivos.	Foto 21. Unidad Ksgl-are2. Paquete arenoso de color gris oscuro, que se presenta masivo y con infiltración de aguas. Muy cubierto por vegetación.

Ksgl-al 3

Hacia la base presenta capas medias a gruesas de cuarzoarenisca indicando un cambio transicional entre la cuarzoarenisca inferior (Ksgl-are 2) y esta secuencia. Consta de limolitas, cuarzoareniscas finas y arcillolitas limosas de color gris, claras y varicoloredas, grado de meteorización medio, dispuestas en capas delgadas a medias con estratificación ondulada paralela y laminación plano paralela discontinua. En ocasiones las arcillolitas son macizas y presentan fractura concoidea.

Las arcillolitas tienen variaciones texturales, en ocasiones se hacen más limosas y arenosas. Hacia el tope esta secuencia presenta intercalaciones de capas delgadas a medias de arcillolita de color gris, con laminación plano paralela. El espesor total medido de esta secuencia fue de 9.50 m.

Aflora en la parte superior del escarpe rocoso producto de la antigua explotación minera, el cual es la geoforma mas representativa del área de estudio. Ver **Foto 22 Foto 23**.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en la trinchera 1.

	
Foto 22. Unidad Ksgl-al3. Limolita de color gris-pardo con coloraciones verdosas debidas a la meteorización. Se encuentra muy fracturada localmente, razón que no permite ver claramente la estratificación.	Foto 23. Unidad Ksgl-al3. Limolita de color amarilla a blancuzca que presenta un alto grado de meteorización. Se encuentra muy fracturada en planos paralelos a la estratificación.

Depósitos de Coluvión (Qco)

Los coluviones se observan en pequeñas escalas a nivel local. Estos depósitos se conforman por cantos, subredondeados a subangulares y fragmentos de roca con tamaños variables desde pocos cm hasta mayores de 1 m de diámetro, matriz-soportado, conformado por bloques, guijos y gravas de cuarzoarenisca, en una matriz limo-arenosa, de color café y rojizo por meteorización, mal seleccionada y generalmente con desarrollo de suelos y su morfología es lobulada. En el área de estudio se cartografiaron dos unidades de coluvión, en la parte media de la ladera. Por no existir puntos geográficos cercanos para referenciar su localización, se relacionan coordenadas aproximadas de centroides de los depósitos: (1) 115.360 m. N. – 106.465 m. E., y (2) 115.300 m. N. – 106.450 m.E.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en las perforaciones 3 y 4, en los apiques 20, 21, y 26.

Depósito de Relleno Antrópico – Actividades Mineras (Qram)

Esta unidad corresponde a acumulaciones de materiales de construcción, desechos y escombros, de baja a media consolidación, plasticidad nula, consistencia media, mal seleccionados, matriz soportados, producto de la antigua explotación minera.

Están constituidos por bloques, gravas y arenas, dispuestos en una matriz arenosa a areno limosa; predominan los fragmentos menores de 10 cm embebidos en la matriz, también se incluyen los grandes bloques de roca caídas sobre los antiguos frentes de explotación, producto de la extracción de material.

Estos depósitos se localizan en la parte baja del área de estudio, por debajo de la cota de 2655 m.s.n.m. La cancha de microfutbol se construyó sobre este depósito, y en sus zonas circundantes también se localiza y aflora. El espesor máximo medido para este depósito fue en el apique 13, con 2 m de espesor.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en la perforación 1, en los apiques 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19, 23, y en las trincheras 2 y 3.

Depósitos de Relleno Antrópico (Qras-Qrai)

Depósito de materiales de construcción, escombros, ladrillos, rocas trituradas, cascajos, etc. y en menor proporción basuras, conformados y originados por los habitantes del sector, debido a los cortes, remociones de tierra, suelo y roca para construir sus viviendas.

Particularmente, son depósitos con baja compactación y sin cementación, matriz soportados en algunos casos y clastosoportados en otros. Sus clastos corresponden a

liditas y areniscas de diámetros desde 0.5 cm hasta 8 cm, dispuestos irregularmente. La matriz es granular, y su composición es una mezcla de suelo y arenas.

Estos rellenos pueden tener más de 2.0 m de espesor en algunos sectores, principalmente en el costado oriental (apique 22). Es pertinente aclarar que en el levantamiento se tuvo como regla para cartografiar estos rellenos como unidad geológica local, que su espesor sobrepasara los 0.50 m.

Se divide en dos este tipo de depósitos: un nivel superior **(Qras)**, matriz soportado, matriz arenosa algo limosa, marrón amarillenta, grado de consolidación medio, fragmentos de roca, basuras, raíces, y restos vegetales embebidas dentro de la matriz. Un nivel inferior **(Qrai)**, que se describe como un limo orgánico con arena y trazas de grava, matriz soportado, matriz areno arcillosa y cambia a arcillosa, de color negro a marrón, humedad baja, plasticidad baja y consistencia firme, grado de consolidación medio a bajo. Presencia de basura, bloques, fragmentos, desechos y escombros de construcción y raíces, bloques hasta de 80 cm de diámetro. Los depósitos de relleno antropico, se localizan en las zonas perimetrales del área de estudio.

En la exploración del subsuelo se encontró esta unidad en las perforaciones 2, 3, 4 y 5, en los apiques 1, 2, 3, 4, 10, 11, 12, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 24, y 25.

3.9 Geología Estructural

La región de la Sabana de Bogotá representa un estilo estructural particular dentro de la Cordillera Oriental. Las causas de estas singulares características se fundamentan en la existencia de una potente cubierta sedimentaria infrayacida por un basamento rígido. El resultado de esta interacción son pliegues con ejes principalmente orientados en sentido Norte-Sur, fallas longitudinales y transversales a los ejes de los pliegues. El área de estudio particularmente se encuentra conformada por rocas Cretácicas (areniscas de la Formación Labor) y Depósitos Recientes.

El sector del barrio Villa Nidia, está conformado por un terreno estructural, consecuencia de la dinámica y tectónica regional, de estilo homoclinal (los estratos presentan el mismo sentido de buzamiento y ángulo de inclinación), en pendiente estructural.

Sobre esta ladera estructural, de constitución rocosa, se presentan depósitos de origen gravitacional y antrópico. Los sectores norte y sur del escarpe sirven como divisoria de aguas.

Los estratos presentan continuidad lateral (dominio de rumbo constante) y un sentido de buzamiento homogéneo, el cual varía entre 287 y 325°, y ángulos de inclinación entre 18 y 30 grados.

No se presentan estructuras o fracturas de desplazamiento vertical u horizontal, o pliegues regionales o locales que afecten la secuencia estratigráfica. Sin embargo, es importante, aclarar y reiterar que se observaron desplazamientos locales en el mismo

sentido del azimut del buzamiento de los estratos, que se definieron como deslizamientos flexurales sobre rocas poco competentes (intercalaciones arcillosas), las cuales reblandecen y pinchan los niveles de roca de arcillolita.

De acuerdo a la evaluación fotogeológica se cartografió un lineamiento, a nivel regional y local, el cual tiene un rumbo relacionado en azimut de 314°, y controla, y direcciona el cauce de la quebrada San Cristóbal.

Cabe anotar, que en el estudio de Ingeocimg, 1998, al lineamiento anterior lo denominan falla de San Cristóbal en el mapa geológico, pero la única evidencia que presentan es la traslocación de contactos inferidos, sobre depósitos Cuaternarios. En el presente estudio, no se encontraron evidencias claras para definir y catalogar este lineamiento fotogeológico como falla geológica.

3.9.1 Diaclasas

Son los elementos estructurales más abundantes, se trata de superficies de fractura donde el movimiento es imperceptible y se generan a partir de los esfuerzos deformacionales de la corteza terrestre.

A partir de la geología, geomorfología, geología estructural y altimetría se llevó a cabo una sectorización del área de estudio, en donde se obtiene una evaluación de estabilidad que es dada y caracterizada por los diagramas de círculos principales producto de los diagramas de polos y densidad de las discontinuidades medidas.

Geométricamente, se considera su orientación mediante una línea de dirección o rumbo y un plano de inclinación o buzamiento. En el numeral de análisis cinemático se relacionan los datos medidos en campo de las discontinuidades.

En general, las diaclasas en el área de estudio presentan paredes normalmente planas y en algunos sectores oxidadas, con presencia de marcas plumosas especialmente en limolitas, rellenos arcillosos oxidados y arenosos, y en su mayoría sin rellenos, con aberturas hasta de 8 cm, gran persistencia y espaciamientos de pocos cm, y entre 35 a 75 cm, para la diaclasa maestra.

Tabla 5. Datos Estructurales

PUNTO CONTROL ESTRUCTURAL	X	Y	Z (m)	E	DIACLASAS			
1	1015379	1006420	2657	298/20 302/20 299/23				
2	1015434	1006396	2685	295/22 302/22				
3	1015370	1006436	2651	304/22 305/26				
4	1015378	1006425		289/18 286/25				
5	1015370	1006435		298/21				
6	1015388	1006425	2652	290/20 288/21				
7	1015393	1006409	2643	301/26				
8	1015394	1006416	2629	296/21 290/22				
9	1015396	1006413	2637	314/21 304/20				
10	1015397	1006411	2644	309/26 300/21				
11	1015394	1006411	2632	294/24				
12	1015408	1006420		309/24 297/24 307/22				
13	1015402	1006405	2635	299/22				
14	1015303	1006407	2632	304/23 311/21 311/24				
15	1015405	1006426	2661	302/26 305/24				
16	1015401	106433	2664	306/20				
17	1015403	1006444	2660	311/24 309/20				
18	1015397	1006471	2665	308/25				
19	1015416	1006449	2666		042/82			

PUNTO CONTROL ESTRUCTURAL	X	Y	Z (m)	E	DIACLASAS			
20	1015453	1006412	2648	294/34	168/79 168/84 154/78 180/88 165/71	081/78 074/82 078/70 084/72 070/59 068/80 065/82 085/73 010/88 034/76	122/78 132/76 131/76 132/78 135/59 122/56 105/76 138/81	212/59 215/48 214/71 350/78 349/84 335/52 312/90
21	1015539	1006373	2654	301/30 289/24				
22	1015468	1006503	2706	305/26				
23	1015407	1006469	2704	305/25				
24	1015359	1006308	2635	296/28 310/36 300/28				
25	1015353	1006338	2638	324/25				
26	1015346	1006329	2662	297/31				
27	1015318	1006493	2669	293/22	44/90			
28	1015342	1006432	2655	306/20				
29	1015326	1006465		287/18		096/90 091/79 091/82 075/67 084/76 071/88 073/70 016/90 083/50 090/90 092/83		276/75 270/90 277/79 268/71 284/90 359/30 320/60
30	1015281	1006349	2649	315/50 294/31				
31	1015368	1006334	2673	300/31 316/30			110/78 105/78 113/78 108/74 110/69	
32	1015353	1006330	2662	308/32		040/77 022/64	232/86	

PUNTO CONTROL ESTRUCTURAL	X	Y	Z (m)	E	DIACLASAS			
33	1015333	1006384	2673			080/85 004/66 025/84 099/60 004/86 054/70	102/83 165/82 136/65 158/83 180/55	258/90 310/63
34	1015344	1006400	2664	289/25				
35	1015343	1006414	2699		100/84			
36	1015341	1006419	2691		70/77			
37	1015330	1006410	2662		240/85			
38	1015375	1006426	2650	298/24				
39	1015397	1006429	2667	302/22	039/86	134/60		
					040/90			
40	1015405	1006429	2673	294/22				
41	1015402	1006439	2669	315/25	220/83	120/76		
				306/25	220/90			
					220/80			
42	1015409	1006454	2665	324/23	053/78			
					049/79			
43	1015401	1006400		300/23	212/83	121/90		
				297/29	035/75			
				301/25	035/90			
					020/73			
					027/80			
					036/80			
					035/72			
					032/80			
44	1015404	1006418		280/25	036/90	100/45		
				310/25	222/87	120/60		
				302/27	192/85	130/60		
				299/27	040/90	110/65		
					215/82	125/88		
					219/80			
					227/90			
					200/86			
					216/88			
					220/90			
					034/82			

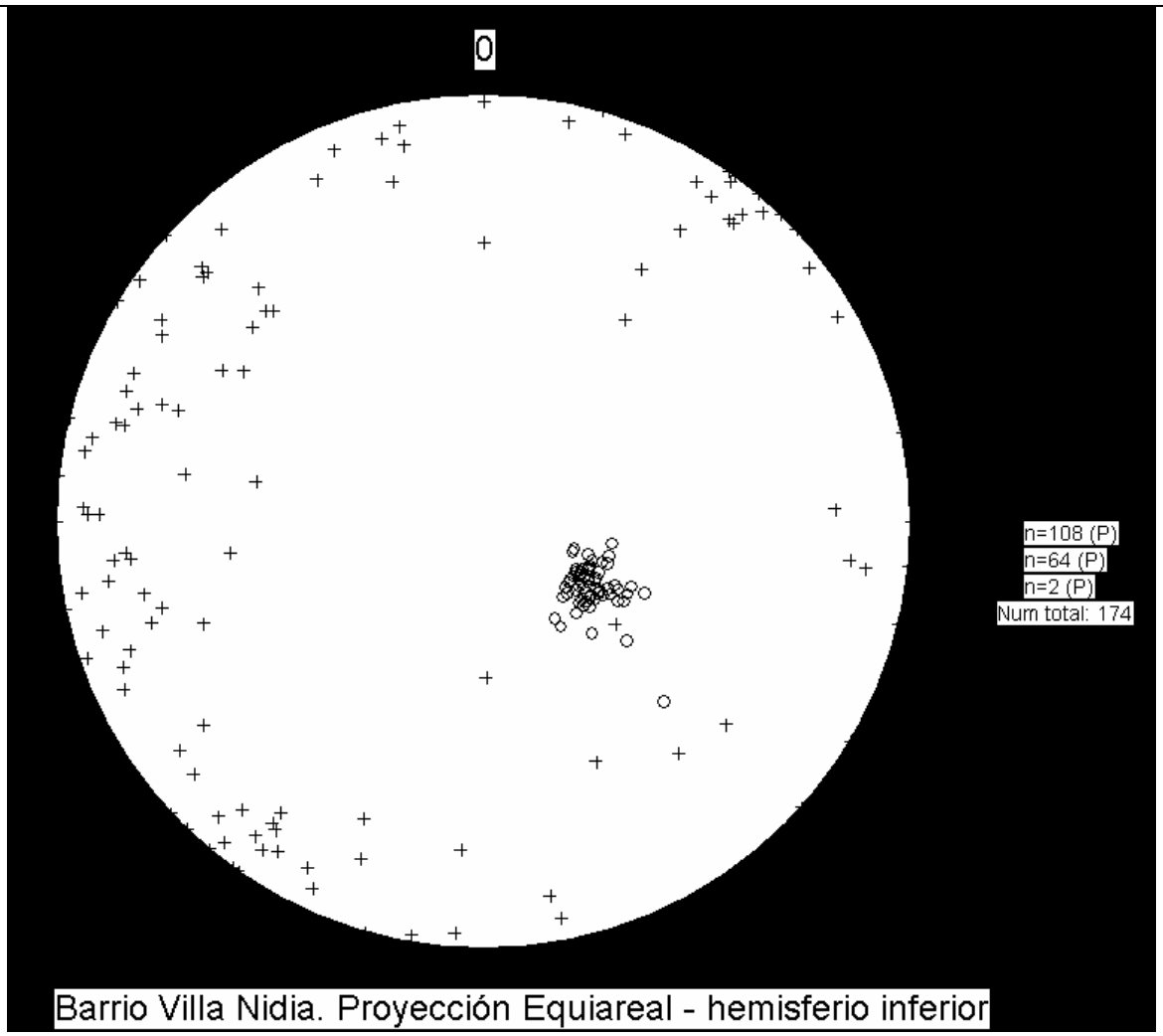


Diagrama de puntos y polos Barrio Villa Nidia
o Estratificación
+ Diaclasas

Figura 4. Diagrama de puntos y polos Barrio Villa Nidia

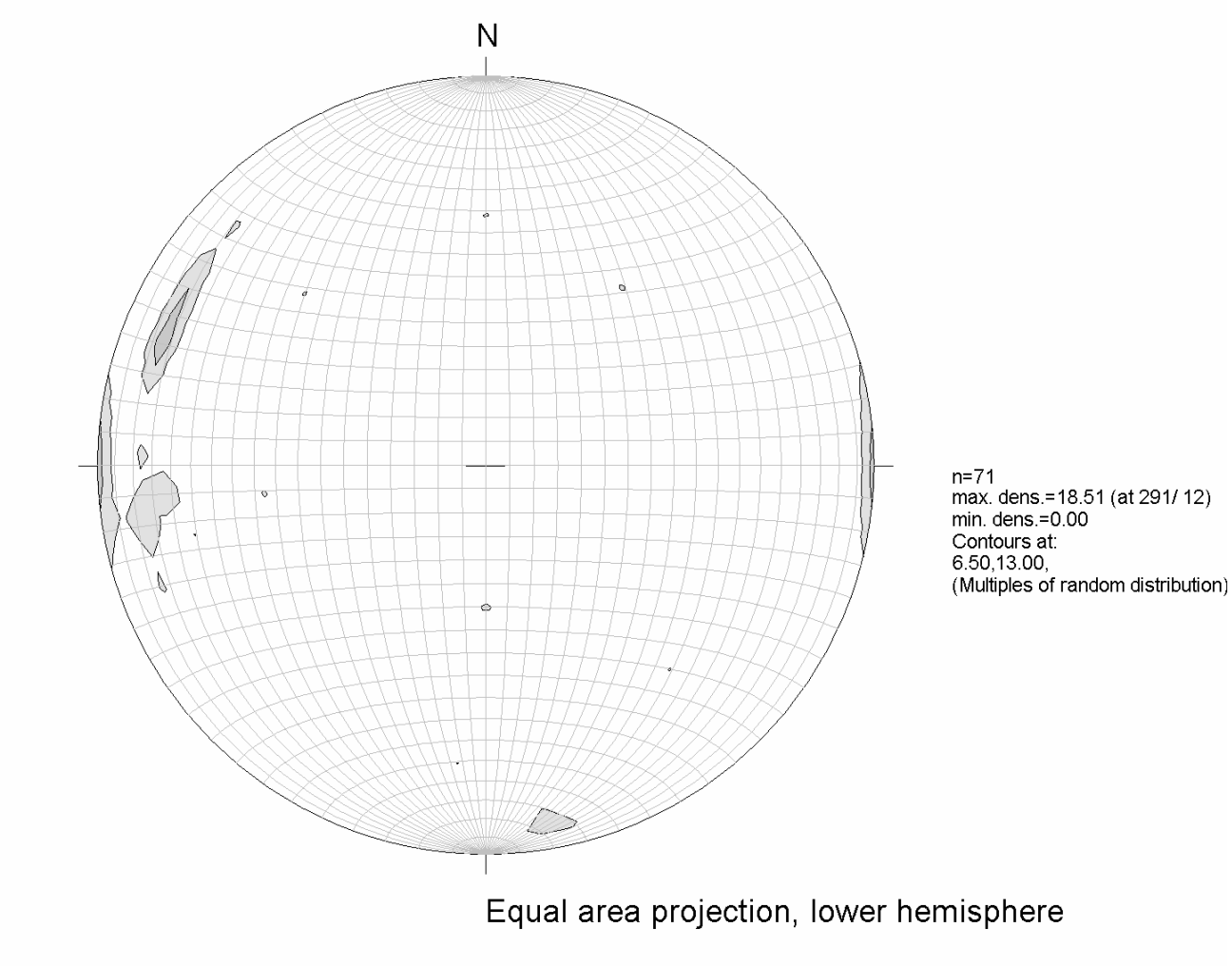


Figura 5. Proyección Equiareal inferior Diaclasas Barrio Villa Nidia

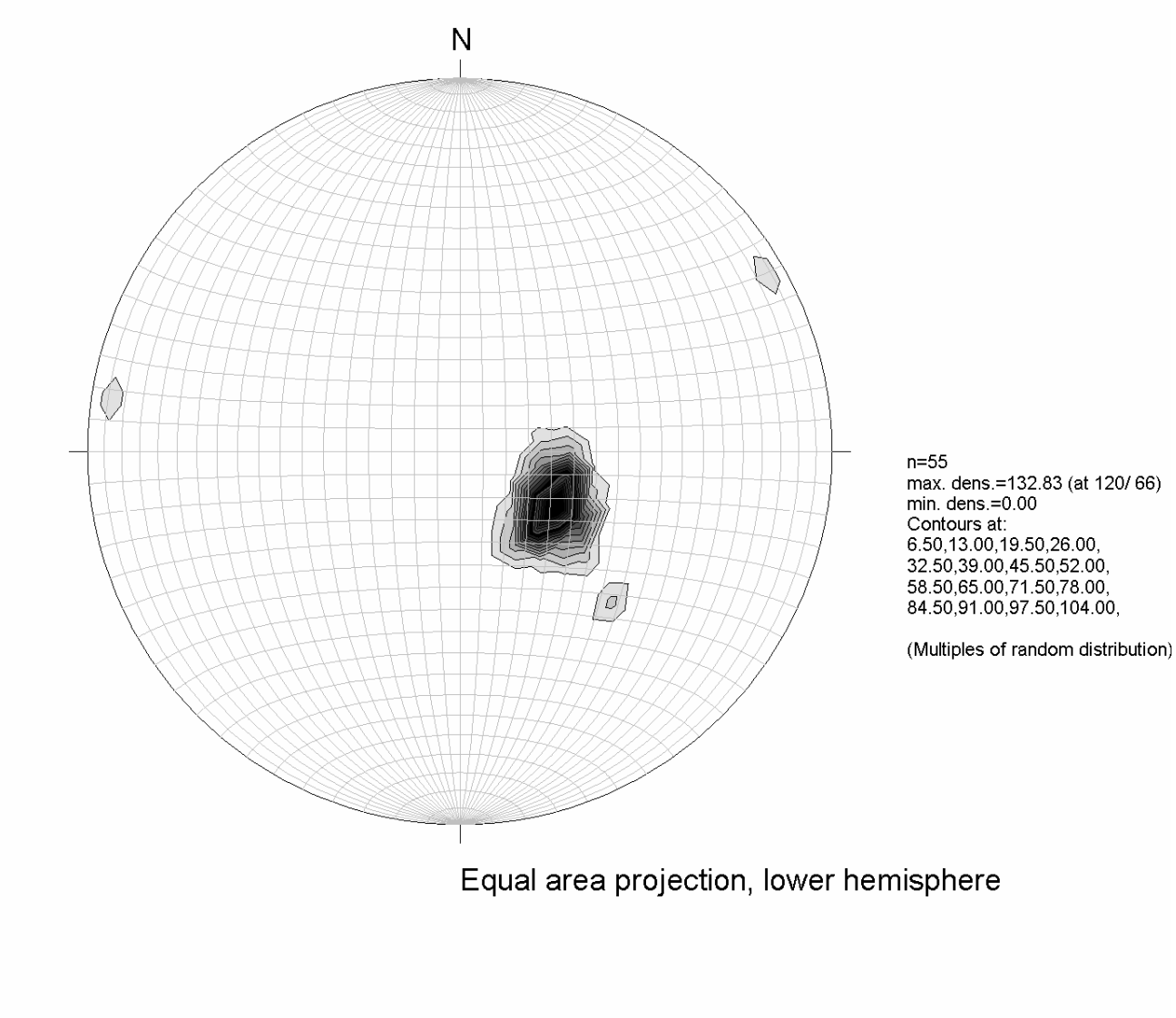


Figura 6. Proyección Equiareal inferior Estratificación Barrio Villa Nidia

3.10 Modelo Geológico Barrio Villa Nidia

El substrato rocoso donde se asienta el barrio Villa Nidia, corresponde a un homoclinal normal (los estratos presentan el mismo sentido de buzamiento y ángulo de inclinación), en pendiente estructural, cuyos estratos con azimuth de buzamiento poseen rangos entre 290 y 325°, e inclinaciones entre 20 y 30 grados aproximadamente.

Litológicamente, la composición predominante corresponde a areniscas cuarzosas de grano muy fino a fino y medio con delgadas intercalaciones de arcillolitas y limolitas, que pertenecen a la unidad litoestratigráfica denominada Formación Labor.

Estructuralmente, el área de estudio regionalmente esta dominada por el Anticlinal de Bogota-Usaquén, haciendo parte de su flanco occidental, el cual contiene estratos que buzan o se inclinan hacia el occidente, determinando una condición desfavorable para la estabilidad del escarpe antiguo del barrio Villa Nidia, en donde los cortes de la antigua extracción son paralelos al rumbo de las capas. Como ya se expuso en el numeral 3.6., localmente, no se evidenciaron estructuras de falla que comprometan la continuidad de la secuencia rocosa en dirección del rumbo de los estratos, o fracturas de desplazamiento vertical u horizontal, o pliegues locales que afecten la secuencia estratigráfica. Sin embargo, es importante, aclarar y reiterar que se observaron desplazamientos locales en el mismo sentido del azimut del buzamiento de los estratos, que se definieron como deslizamientos flexurales sobre rocas poco competentes (intercalaciones arcillosas), las cuales reblandecen y pinchan los niveles de roca de arcillolita.

Geomorfológicamente, el área de estudio esta ubicada en la cuenca de la quebrada San Cristóbal, cuyo cauce alineado la corta de SE a NW. La cuenca de la quebrada y un escarpe producto de una explotación antigua son los rasgos geomorfológicos mas importantes.

Las aguas subsuperficiales o freáticas no tienen un nivel determinado, si no responden a los antiguos cortes (quedan colgadas) y al gradiente hidráulico del cauce de la quebrada, tornándose en muchos sectores como agua superficial, por afloramientos naturales o "artificiales".

Las características anotadas se exponen en la sección AA'. (Véase Plano **GE 147-PL1-04**).

3.11 Geomorfología regional

Regionalmente, el área de trabajo está ubicada sobre la vertiente Oeste de la Cordillera Oriental, cuyo levantamiento definitivo se inició hace unos 4 m.a., generando un relieve imponente, afectado en la Era Cuaternaria por cambios climáticos acentuados, que han dado lugar a procesos erosivos y fenómenos de remoción en masa, tanto por acción de las glaciaciones que actuaron hasta el Pleistoceno Inferior, como por los cambios climáticos que son agentes desencadenantes que han modelado la superficie terrestre estableciendo nuevas

geoformas denudativas y agradacionales de depositación lenta o súbita, por la acción libre o conjunta de los agentes de transporte y la gravedad.

Las geoformas presentes en el sector están relacionadas con procesos morfogenéticos de tipo Estructural, Denudativo y Acumulativo. Son producto de la compleja evolución tectónica ocurrida durante el Terciario, de los procesos de erosión pluvial y de los procesos de erosión y movimientos de remoción en masa, más recientes.

Las geoformas de ambiente Estructural, Denudativo, Estructural/Denudativo esculpen pendientes estructurales muy conspicuas, como es el caso de los Cerros Orientales, que reflejan la resistencia de las capas de arenisca, sobre las que tiene lugar el desarrollo de otras unidades resultado de procesos denudativos; y haciendo más detalle en el área de estudio se conformaron unidades geomorfológicas de ladera estructural, las cuales se presentan bastante erosionadas en las que es notoria la afectación tectónica y antrópica.

Geomorfológicamente, desde el punto de vista regional, el área de estudio se podría dividir en dos unidades geomorfológicas (geoformas), la primera de tipo morfogenético estructural, la cual podría denominarse: ladera de pendiente estructural sobre areniscas, con pendiente > 15º (abrupta) y la segunda, de tipo morfogenético agradacional, la cual podría denominarse: ladera inclinada agradacional sobre rellenos de pendiente inclinada a moderadamente inclinada (5° - 15°).

3.12 Geomorfología local

Como georforma principal o característica, se presenta un escarpe rocoso con altura aproximada de 15 metros e inclinación entre 80 y 90 grados, producto de la extracción de materiales en décadas pasadas, de forma semicircular, la cual incluye la cuenca de un drenaje natural que corre en dirección aproximada Este-Oeste. (ver Foto 24). A escala detallada, se realizó una descripción y cartografía geomorfológica del área de estudio basada en la interpretación generalizada de fotografías aéreas y las observaciones realizadas en la fase de campo.



Foto 24. Vista panorámica del barrio Villa Nidia. La cancha de microfutbol es el centroide del área de estudio. Al fondo se observa es el escarpe (cubierto por vegetación) que dejo una antigua explotación minera.

3.12.1 Morfometria

Para sectorizar morfometricamente el área de estudio, se dividió en siete (7) rangos de pendientes (Vargas, 1999), los cuales se relacionan en la **Tabla 6**, a continuación:

Tabla 6. Rango de pendientes.

PARAMETRO	PENDIENTE	EN GRADOS
Inclinación de la Pendiente	Plana	0
	Suavemente inclinada	1 a 5
	Moderadamente inclinada	5 a 10
	Inclinada	10 a 15
	Abrupta	15 - 30
	Escarpada	30 - 45
	Muy escarpada	> 45

3.13 Morfología

La clasificación de las principales formas del terreno identificadas en el área de estudio, en teoría se han definido como la expresión dinámica del relieve edificado por fuerzas endógenas de la tierra que han actuado a través del tiempo geológico y modelado por agentes externos, especialmente de tipo climático y últimamente la

acción del hombre, manifiesta en la denudación del relieve y la modelación de nuevas geoformas denudativas y de agradación antrópica.

De acuerdo con los criterios de jerarquización y clasificación geomorfológica propuesta por Hernández P. (2001) y modificada en este trabajo (ver Plano **GE 147-PL1-05**), el área de estudio presenta los relieves o modelados que se relacionan a continuación con sus respectivas geoformas o unidades geomorfológicas:

3.14 Clasificación de Unidades Geomorfológicas

Las unidades geomorfológicas se seleccionaron de acuerdo con los rasgos genéticos del relieve y a su litología predominante en el presente.

Actualmente el relieve evidencia los efectos tectónicos que ha sufrido parte de la corteza terrestre a través del tiempo geológico y la acción del clima que lo ha degradado, originando un modelado denudativo natural y la generación de formas agradacionales por procesos naturales y actividades antrópicas.

Teniendo en cuenta el plano geológico local elaborado para el proyecto, el plano de pendientes del terreno, la red de drenaje y el trabajo de fotointerpretación entre otros, se elaboró la cartografía geomorfológica, la cual se ajusto mediante el trabajo de campo. (Véase Plano**GE 147-PL1-05**).

Los factores inherentes que se tuvieron en cuenta para seleccionar, clasificar y definir las unidades geomorfológicas fueron: **la litología, la morfometría (pendientes), la geología estructural, los procesos morfogenéticos (agradación y denudación), los drenajes y la morfología.**

Los rasgos genéticos del relieve involucran tanto aspectos geológicos como fisiográficos. Los aspectos geológicos principales son: la estructura y la litología, los fisiográficos: clima actual, hidrología e indirectamente aspectos bióticos y antrópicos.
Los grandes relieves identificados para el área de estudio, corresponden a:

3.14.1 Modelado Estructural

El relieve originado se asocia a las estructuras geológicas presentes (homoclinal) y su posterior intervención antrópica por extracción y acumulación de materiales. En este relieve se identificaron las siguientes unidades geomorfológicas (geoformas):

- **Escarpe Estructural Antropico (Eea)**

Es un paisaje abrupto conformado en areniscas de la Fm. Labor, por la disposición estructural de los estratos rocosos y la posterior acción del hombre al realizar los cortes y frentes mineros.

Estas geoformas de origen estructural y antropico, en este caso, se presentan sobre una pendiente estructural intervenida (buzamiento de la estratificación en el mismo sentido a la pendiente del terreno, en el área de estudio los estratos buzan al NW).

Presentan generalmente pendientes predominantemente fuertes (escarpadas a muy escarpadas, 30° a > 45°), sobre materiales consolidados de areniscas competentes. Las unidades geológicas involucradas son Ksgl-are 1, Ksgl-al 2, Ksgl-are 2 y Ksgl-al 3.

Es de anotar que sobre la unidad Eea, se cartografiaron escurrimientos de agua y nacimientos de agua, por los contactos rocosos. Estos procesos son causados por el vertimiento de aguas servidas a la ladera y su infiltración.

- **Ladera Estructural Agradacional (Lea)**

Unidad de origen estructural en donde la pendiente del terreno sigue los planos de estratificación, y posteriormente el relieve se modela por la acumulación natural o artificial primordialmente de materiales rocosos o escombros y desechos de construcción.

Fundamentalmente involucra rocas competentes, predominando las areniscas y limolitas, e involucra depósitos de origen natural (coluviales) y antrópicos (por actividades mineras y rellenos).

Esta geoforma se dividió en tres subunidades, de acuerdo a la pendiente: Ladera estructural agradacional de pendiente inclinada (10 a 15°) **(Lea-i),** Ladera estructural agradacional de pendiente abrupta (15 a 30°) **(Lea-a),** Ladera estructural agradacional de pendiente escarpada a muy escarpada (30 a >45°) **(Lea-e).**

Las unidades geológicas involucradas corresponden a Qco (deposito de coluvión), Qma (deposito por actividades mineras), Qras y Qrai (depósitos de relleno antropico).

- **Ladera Estructural Agradacional Intervenida por cortes y explanaciones para viviendas y asentamientos (Lea-ce)**

Unidad de origen estructural en donde la pendiente del terreno es consecuente con la pendiente de los planos de estratificación, y posteriormente es intervenida por cortes y explanaciones para la construcción de viviendas y asentamientos.

Por lo general, involucra sustrato rocoso, como son areniscas y secuencias de limolitas y arcillolitas de consistencia alta, y algunos rellenos antrópicos (incluido el depósito por actividades mineras). La pendiente se presenta en el rango de plana a moderadamente inclinada: 0 a 10 grados.

Las unidades geológicas que involucra son: Ksgl-are 2, Ksgl-al 3, Qram, y Qra.

3.14.2Modelado Estructural Denudacional

El relieve originado se asocia a las estructuras geológicas presentes (pendiente estructural - homoclinal) y su posterior proceso denudativo de los materiales, asociado a la erosión (incisión vertical a diferentes profundidades) causada por los drenajes existentes sobre el sustrato rocoso y su conformación morfológica actual.

En este relieve se identificaron las siguientes unidades geomorfológicas (geoformas):

- **Cuenca quebrada sobre Ladera Estructural (Cu-le)**

Paisajes de origen estructural, caracterizado por presentar geoformas escarpadas originadas por acomodamiento de las unidades litoestructurales, y desgaste de los materiales rocosos por procesos erosivos y que han sido modelados por fenómenos erosionales en los cuales la acción del agua de escorrentía y la gravedad han jugado un papel importante, conformando escarpes y/o taludes naturales originados por retrabajamiento y socavación retrogresiva por acción hídrica, lo cual incluye aguas servidas y aguas de escorrentía. Presentan pendientes abruptas a muy escarpadas (> 45°).

Las unidades geológicas involucradas son: Ksgl-al 1, Ksgl-are 1, Ksgl-al 2, Ksgl-are 2 y Ksgl-al 3.

3.14.3Modelado Denudativo

Relieve originado por la meteorización, erosión y remoción en masa de materiales rocosos y depósitos naturales y/o artificiales.
En este relieve se identificaron las siguientes unidades geomorfológicas (geoformas):

- **Deslizamiento Traslacional en Depósitos por Actividades Mineras sobre Ladera Estructural (Dt-dam)**

Unidad asociada a un deslizamiento traslacional cuya superficie de rotura o debilidad, son los estratos (plano de estratificación) arcillosos, húmedos y algo reblandecidos de la unidad Ksgl-al 1, sobre la que se deslizaron los materiales de la unidad deposito por actividades mineras. Por tanto solo involucra estas dos unidades geológicas, y posee una pendiente inclinada (10 a 15 grados).

3.14.4Procesos Morfodinámicos

Geomorfológicamente, las unidades de terreno dependen tanto de factores endógenos (constructores de corteza) como de factores exógenos (destructores de relieve). Como resultado de esta contraposición de fuerzas naturales pueden ahora registrarse una serie de geoformas diferentes, de acuerdo a su génesis, dimensión y distribución.

Las fuerzas endógenas originan las montañas a partir de petrogénesis y tectónica, mientras que las fuerzas exógenas, es decir, los agentes geomorfológicos son los responsables de los procesos erosivos y los fenómenos de remoción en masa, los cuales afectan la superficie terrestre, degradándola o construyendo nuevos paisajes.

La identificación de las unidades geomorfológicas presentes en un área de trabajo contribuye al entendimiento de los procesos de degradación del terreno en general. Cada unidad presenta rasgos morfológicos particulares dependiendo entre otros, de los procesos morfodinámicos que en ella se desarrollen. Estos rasgos permiten la identificación de cada unidad.

Procesos de 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, el factor principal de meteorización es de tipo hídrico, en la que el lavado de ciertos minerales y la concentración de otros llevan al cambio de la roca original.

Procesos de Erosión

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

Escurrimiento superficial

Este tipo de escurrimiento ocurre cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración, generándose un excedente de agua en superficie que corre ladera abajo siguiendo la máxima pendiente.
La pendiente es en el área de estudio es un elemento que favorece el drenaje; sin embargo, el uso de estos terrenos ha favorecido la erosión, que ha desgastado los horizontes de suelos.
Se distinguen dos tipos:

- *Difuso.* Se forma cuando el agua corre por la pendiente en forma de flujos minúsculos y discontinuos. Ocurre luego de un aguacero que sature la capacidad de absorción de suelo o roca. Si no existe una cobertura vegetal que actúe como disipador de energía hídrica, evoluciona a la forma de erosión concentrada. Se evidencia en la zona baja del área de estudio, costado occidental y malla vial (la cual se encuentra sin pavimentar), en donde las condiciones de escorrentía y poca pendiente favorecen la remoción uniforme de suelo conformando microcanales de hasta 3.0 cm de profundidad.
- *Concentrado.* Ocurre cuando los flujos difusos se concentran a lo largo de canales con mayor capacidad de arrastre, formando cárcavas, caracterizadas por su diversidad de formar corte transversal en formas de "V" y otros con ángulo recto entre base y paredes, estos procesos son muy frecuentes en las litologías arenosas y arcillosas predominantemente. En el área de estudio se observa escurrimiento superficial concentrado principalmente en la zona de media ladera sobre el deposito coluvial (ver Formato P.M. 2).

Erosión Antrópica

La escasa planificación urbanística para el desarrollo y ocupación de los barrios incluidos en el área de interés, sumado a las deficientes especificaciones técnicas y métodos inadecuados para la cimentación de las viviendas, acentúa la erosión de los suelos ya que se presenta una importante remoción de la cobertura vegetal, el

taponamiento de los drenajes naturales y los vertimientos directos al suelo de las aguas residuales domésticas.

Sobre los llenos poco compactados y acondicionados como terraplén para las casas, se desarrollan zanjas profundas de drenaje bajo las cuales se encuentran estratos de suelo orgánico que al saturarse ocasionan desplomes locales. Las vías han alterado el drenaje natural, generando que las descargas sean caudalosas, centralizadas y por lo tanto, erosivas, sobre todo en la parte baja.

Procesos de Remoción en Masa

Tanto el reconocimiento de campo como la fotointerpretación permitió definir la no existencia de Fenómenos de Remoción en Masa de carácter Regional recientes o antiguos, pese a la complejidad tectónica local y la progresiva intervención antrópica.
Los procesos de remoción en masa son locales y puntuales los cuales se muestran en la **Tabla 7** se localizaron en el (Plano **GE 147-PL1-05**). Además de cada proceso se levantó una ficha descriptiva, las cuales se anexan al presente informe (ver **ANEXO II-B**). Como proceso morfodinamico de importancia, se hace énfasis en el sector central (cancha de microfutbol) y hacia el escarpe, en donde se presenta un deslizamiento traslacional, que involucra un depósito acumulado por actividades mineras, sobre un sustrato rocoso arcilloso húmedo reblandecido. (ver Formato P.M. 1).

También se evidencio bloques y rocas de gran tamaño, en la parte baja del área de estudio (unidad Lea-e, plano **GE 147-PL1-05**), pero su origen creemos se debe a dos factores: la actividad minera en el pasado que al explotar con explosivos, acumularon grandes bloques, que fueron difícilmente removibles y por el detonante cinemático, que en el informe 3, se evaluara y confirmara si esta condición origina caída de bloques y rocas, en el área de estudio. (ver Formato P.M. 4).

Es de anotar, que otros procesos morfodinámicos (desplomes, desprendimientos y deslizamientos locales) evidenciados (cicatrices y/o coronas, árboles inclinados) en la zona de estudio (unidad Lea-e, sector inferior a la cancha de microfutbol y sector norte de la quebrada San Cristóbal), son de pequeña escala, magnitud e intensidad, y aparentemente son inactivos y estabilizados, pero si no son controlados pueden originar en un futuro por remoción de material, estancamiento, y represamiento del cauce, lo que puede conllevar al origen de procesos y/o fenómenos de carácter regional. (ver Formato P.M. 3).

Tabla 7. Unidades geomorfológicas

UNIDADES GEOMORFOLOGICAS						
Unidad geomorfológica	**Símbolo**	**Morfología**	**Morfogenética**	**Unidad de Roca-Litología**	**Infiltración de agua**	**Pendiente y Procesos Morfodinámicos**
Deslizamiento Traslacional en depósitos por actividades mineras sobre ladera estructural	**Dt-dam**	Ladera convexa	Remoción en masa	Qram	Alta humedad en el plano de despegue	Inclinada - Deslizamiento estabilizado
Cuenca quebrada sobre ladera estructural	**Cu-le**	Cuenca en "v"	Estructural y Denudativa	Ksgl-al1, Ksgl-are1, Ksgl-al2, Ksgl-are2, Ksgl-al3	Escurrimiento permanente de agua con alto caudal	Abrupta a Muy Escarpada
Escarpe estructural antropico	**Eea**	Escarpe	Estructural y Antropico	Ksgl-are1, Ksgl-al2, Ksgl-are2, Ksgl-al3	Nacederos y Escurrimiento de aguas servidas.	Muy escarpada Caídas de roca por actividades mineras y por detonante cinemático. Desprendimiento de fragmentos. Carcavamiento.
Ladera estructural agradacional intervenida por cortes y explanaciones para viviendas y asentamientos	**Lea-ce**	Ladera	Estructural Agradacional Antrópica	Ksgl-are2, Ksgl-al3, Qra, Qram		Plana a moderadamente inclinada
Ladera estructural agradacional de pendiente inclinada	**Lea-i**	Ladera	Estructural Agradacional Antrópica	Qco, Qra, Qram		Inclinada
Ladera estructural agradacional de pendiente abrupta	**Lea-a**	Ladera	Estructural Agradacional Antrópica	Qra, Qram		Abrupta
Ladera estructural agradacional de pendiente escarpada a muy escarpada	**Lea-e**	Ladera	Estructural Agradacional Antrópica	Qco, Qra, Qram		Escarpada a muy Escarpada. Desprendimientos y deslizamientos antiguos locales en deposito por actividades mineras.

4 CLIMA, HIDROLOGÍA , HIDRÁULICA HIDROGEOLOGÍA Y SISMOLOGÍA

4.1 Introducción

El agua y la aceleración sísmica son los factores que más comúnmente se asocia con la movilización de los taludes y las laderas.

El agua influye en gran medida debido a que la mayor parte de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos. Pero este agente (agua) produce también alteración y cambios en la estructura de los materiales. En el barrio Villa Nidia, la acción del agua ha ocasionado procesos de erosión concentrada, caída de bloques y eventuales deslizamientos, por ello es relevante conocer el régimen temporal y espacial de la precipitación media anual y la influencia de la precipitación como agente detonante o contribuyente de los fenómenos de remoción en masa.

En la zona del proyecto la aceleración sísmica debe ser considerada de acuerdo con el estudio de Microzonificación sísmica de Santa fe de Bogotá.

4.2 Generalidades

El estudio hidrológico e hidráulico tiene como objetivo describir el régimen temporal y espacial de la precipitación media anual y determinar los aguaceros de corta duración para calcular los caudales y niveles máximos esperados, con el fin de elaborar el mapa de amenazas por inundación y diseñar las obras de drenaje para la estabilización y control de erosión del talud en el barrio Villa Nidia.

La zona de estudio está ubicada al nororiente de la ciudad de Bogotá, Durante los últimos años en el sector se ha presentado una creciente intervención urbana, debido al desarrollo de barrios de invasión en sus laderas, sin ningún control de las aguas lluvias y negras, Esto hace que la energía erosiva de la lluvia y la escorrentía superficial aumenten, generando procesos de erosión superficial y fenómenos de remoción en masa, ocasionados de manera directa por alteración de la red de drenaje natural existente y la falta de construcción de un sistema de drenaje adecuado y acorde al comportamiento hidrológico del sector.

Para el análisis hidrológico se estudiará solamente el elemento climatológico precipitación, ya que es el principal agente de la erosión hídrica y uno de los factores desencadenantes de los fenómenos de remoción en masa.

Sobre la cartografía escala 1:5,000 se delimitaron las cuencas vertientes de las corrientes principales, La información cartográfica se complementó con visitas de campo y con el análisis de los levantamientos topográficos de la quebrada.

4.3 Marco hidráulico general

En el Barrio Villa Nidia puede catalogarse como deficiente el manejo de las aguas servida en el sector del parque (talud superior) El sistema de alcantarillado pluvial existe y aguas negras, estos se encuentran separados en la actualidad ver **GE 147-PL1-06**. En la actualidad en la zona de estudio se encuentran 25 pozos de aguas negras y 24 pozos pluvial en total 49 pozos los cuales en general presentan un estado aceptable de funcionamiento. Las fichas de investigación de redes se ajuntan en el **ANEXO IV-A**.

El sistema de acueducto del Barrio fue construido en el año 1980, 1998 y 2000. Para el servicio de la comunidad en ese entonces fue instalada una tubería de 6" a lo largo del Barrio. A esta línea de conducción salen tuberías de 3" para prestar el servicio a la comunidad ver plano **GE 147-PL1-07**.

4.4 Marco hidrológico general

La precipitación en un buen porcentaje se convierte en caudal de escorrentía, pormenor que hace necesario el diseño e implementación de obras de drenaje a fe de proteger los taludes expuestos.

Para el análisis hidrológico se estudiará solamente el elemento climatológico precipitación, pues es él, principal agente generador de la erosión hídrica y uno de los factores detonantes de los fenómenos de remoción en masa.

4.5 **Precipitación**

Generalmente, los fenómenos de remoción en masa están asociados a los períodos lluviosos, ya que la precipitación es uno de los agentes detonantes principales de los deslizamientos, Por esto es necesario conocer el régimen pluviométrico temporal y espacial de la precipitación, para identificar los meses más lluviosos y los sectores donde se concentran los valores más altos de la precipitación en la zona de estudio, A continuación se presenta el resumen de los resultados obtenidos para dichos análisis.

4.5.1 Precipitación totales mensuales

Con el fin de establecer el régimen pluviométrico en el barrio Villa Nidia, se utilizaron los registros históricos de precipitaciones totales mensuales de la estación Serrezuela (2120202) operada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.A.A.B. – ESP, que es la más cercana a la zona de estudio y esta ubicada en la cuenca de la Quebrada San Cristóbal.

La distribución temporal de la precipitación se presenta en forma bimodal o ecuatorial con dos períodos lluviosos entre los meses de marzo a mayo y octubre a enero y un período seco entre los meses de junio a septiembre, como se observa en la **Figura 7**.

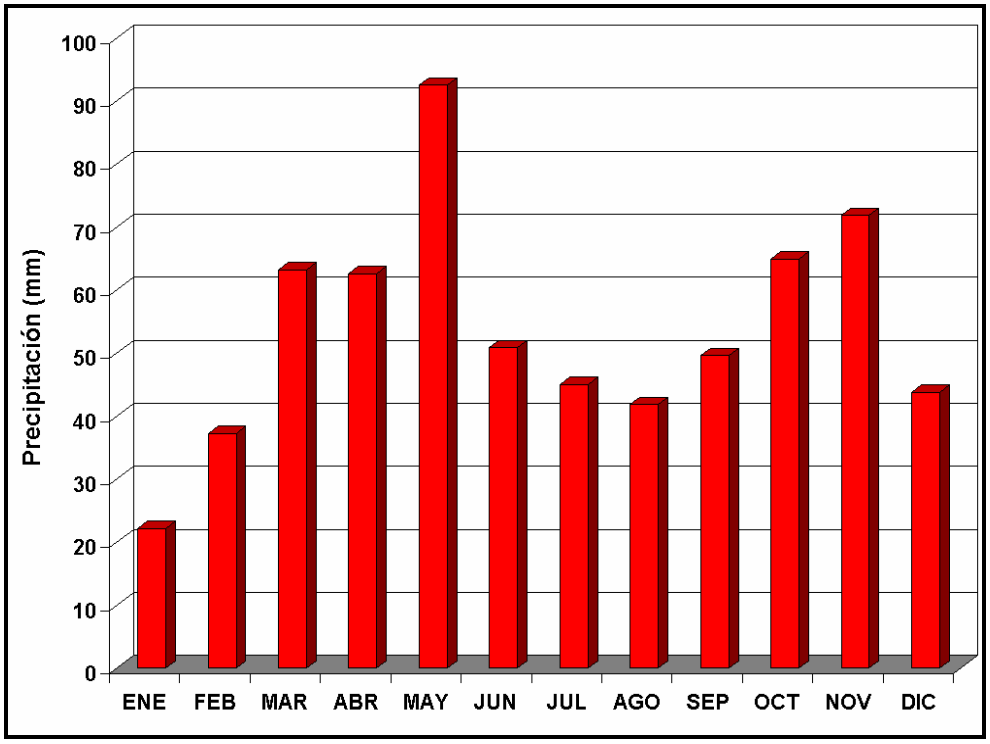


Figura 7. Lluvias medias mensuales (1990 - 2005) en la estación Serrezuela

La precipitación media multianual es de 920,8 mm (ver **Figura 8**) y el mes con mayor precipitación es noviembre con un promedio mensual multianual de 106,5 mm.

Figura 8. Distribución espacial de la precipitación media anual en Bogotá

4.5.2 Curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF)

Para el análisis de los aguaceros de corta duración, que son los que generan los caudales máximos, se utilizó el informe "Estudio para el Análisis y Caracterización de tormentas en la Sabana de Bogotá", realizado por la firma consultora IRH para la E.A.A.B. – E.S.P. En este estudio se dividió a la ciudad de Bogotá en 7 zonas pluviográficas y, para cada zona se definió una curva IDF característica. El sector de análisis está ubicado en la Zona 1, cuya estación representativa de la ley de frecuencias es Serrezuela (2120202), operada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB; la curva IDF característica para esta zona se presentan en la **Figura 9**, y los datos puntuales en la **Tabla 8**.

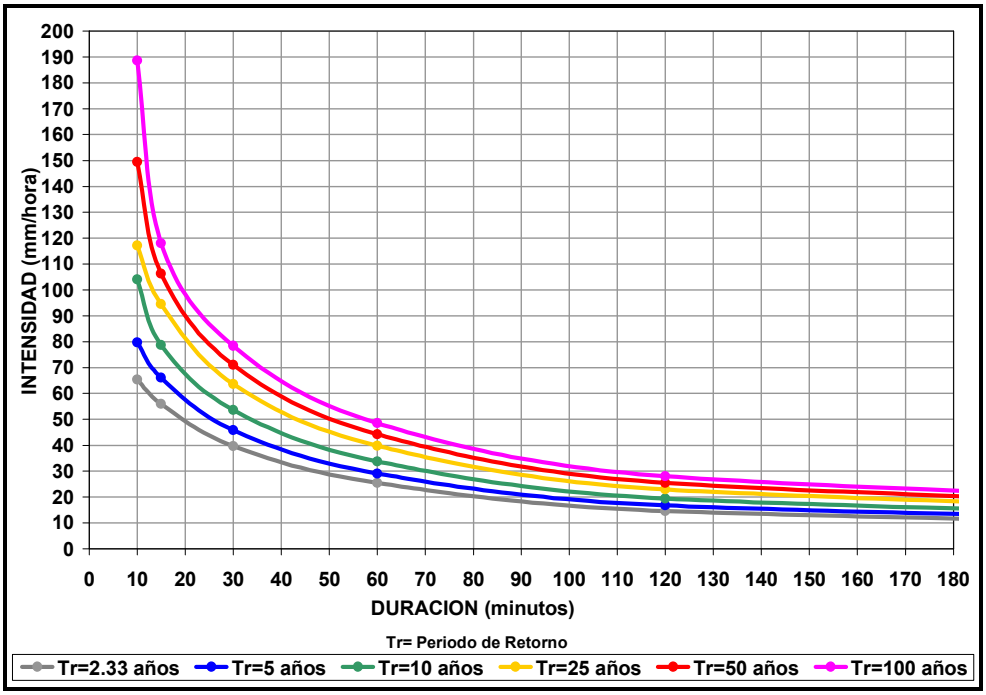


Figura 9. Curva Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) para la zona de estudio

Tabla 8. Intensidad (mm/hora) para diferentes duraciones y períodos de retorno, para la Estación Serrezuela

Duración minutos	Período de retorno (años)					
	2,33	5	10	25	50	100
15	79,9	92,0	107,2	126,4	140,7	154,8
30	57,6	65,5	75,3	87,8	97,0	106,1
60	37,5	42,3	48,3	55,8	61,4	67,0
120	22,0	24,8	28,4	32,8	36,2	39,5
360	8,4	9,6	11,1	13,0	14,4	15,8

Con las curvas presentadas en la **Figura 9**. Se obtienen las intensidades máximas para diferentes períodos de retorno, con una duración dada (tiempo de concentración); estos valores son fundamentales para la generación de caudales y niveles máximos en la elaboración del mapa de amenaza por inundación.

4.5.3 Lluvia crítica[2]

Para determinar la relación precipitación crítica - duración, se utilizó el "Estudio de Amenaza. Vulnerabilidad y Riesgo por Inestabilidad del Terreno para Varias Localidades de Santafé de Bogotá" (INGEOCIM - UPES, 1998), En este estudio se encontró que la ciudad de Bogotá se puede dividir a partir de la lluvia crítica y de la duración en dos zonas, con las siguientes ecuaciones:

Tabla 9. Relación entre la lluvia crítica y la lluvia anual para la ciudad de Santafé de Bogotá (INGEOCIM - UPES, 1998)

Zona	Lluvia crítica (mm)	Duración (días)
Suroccidental	0,3609 x Lluvia anual (mm)	$3,2829 * LLcrit^{0,4157}$
Cerros orientales	12,6325 + 0,3609 x Lluvia anual (mm)	$3,2829 * LLcrit^{0,4157}$

El sector de estudio corresponde a la zona de los Cerros Orientales; a partir de los valores de lluvia anual de la estación Serrezuela se obtuvo una precipitación crítica de 179,7 mm (que coincide con lo reportado en el estudio de Ingeocim-Upes, 1998, tal como se puede ver en la **Figura 10**, con una duración de 9 días y un período de retorno del orden de 14 años (ver **Figura 11**). De acuerdo con estos resultados, se puede concluir que la probabilidad de ocurrencia de la precipitación crítica es aproximadamente del 7%.

[2] González, A., Zamudio, E. y Castellanos, R. (1999). Relaciones de precipitación crítica-duración que disparan movimientos en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

Figura 10. Distribución espacial de la precipitación critica en Bogotá

Figura 11. Distribución espacial de periodos de retorno de la precipitación critica en Bogotá

4.6 Caudales máximos por escorrentía

4.6.1 Metodología

Para la estimación o el cálculo de los caudales máximos esperados en los diferentes sitios de la zona en estudio, se utilizó el Método Racional, aceptado para cuencas con superficies inferiores a 1,0 Km^2.

Este planteamiento o modelo de estimación de caudales máximos generados por escorrentía, se identifica con la siguiente ecuación:

$$Q = k \times i \times A \times c$$

Donde Q es el caudal pico (m^3/s); k un factor de conversión que en el sistema métrico es igual a 0,028 ($lt/s/m^2$ mm/hr); i la intensidad máxima para la frecuencia de diseño, con duración igual al tiempo de concentración de la cuenca vertiente (mm/hr); A el área aferente (ha); c el coeficiente de escorrentía, que depende de las características fisiográficas del área de drenaje y la cobertura del suelo.

4.6.2 Determinación de áreas de drenaje

En primer lugar se definieron las áreas de drenaje en los sitios; donde se requiere de la evaluación de los caudales máximos generados por escorrentía, como se mencionó anteriormente para áreas de drenaje inferiores a 1,0 Km^2.

4.6.3 Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía es la relación entre la tasa pico de escorrentía directa y la intensidad promedio de precipitación en una tormenta, Este valor es difícil de determinar directamente, pero se puede inferir satisfactoriamente considerando: el relieve, la permeabilidad, la vegetación y la capacidad de almacenaje en la zona de estudio. De acuerdo con las recomendaciones del MOPT[3], para este caso se obtiene un valor de 0,7, teniendo en cuenta las características morfométricas y de cobertura del suelo de la cuenca en estudio.

4.6.4 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, o tiempo requerido para que el agua caída en el punto más alejado de la cuenca hidrográfica fluya a una sección específica de análisis en el drenaje, es función de las características topográficas de la cuenca. En este caso, por tratarse de microcuencas de pendiente media a alta, el tiempo de concentración se pudo evaluar gracias a la formula de Kirpich:

[3] Ministerio de Obras Públicas y Transporte – La Vialidad Ltda. (1988). ***Criterios y normas para el diseño geométrico de carreteras: El drenaje como factor determinante en obras viales.*** Reglamento técnico general de obras viales, Tomo III.

$$Tc = 4 \times \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

En donde:

Tc: tiempo de concentración en minutos
L: Longitud en kilómetros
S: la pendiente en m/m

Los tiempos de concentración menores de 10 minutos se aproximan a 10 minutos.

4.6.5 Intensidad

Para la aplicación del método racional la intensidad de diseño se deduce de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (ver **Figura 9**), La frecuencia se determina con base en el riesgo de que el evento de diseño sea igualado o excedido por lo menos una vez, La duración del aguacero de diseño es igual al tiempo de concentración.

Con base en los parámetros anteriormente enunciados, se estiman los caudales máximos con áreas de drenaje iguales a 0,5 Ha, 1,0 Ha, 2,0 Ha, 3,0 Ha y 4,0 Ha aplicando el método racional (ver **Tabla 10**).

Tabla 10. Estimación de Caudales Vs. Periodo de retorno Vs. Áreas de drenaje

			PERIODO DE RETORNO					
			2,33	**5**	**10**	**25**	**50**	**100**
			Intensidad (mm/hr)					
ÁREA (ha)	**C**	**Tc (min)**	65,4	79,8	104,0	117,1	149,5	188,6
			CAUDALES (m³/s)					
0,5	0,7	10	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,13
1,0	0,7	10	0,09	0,11	0,14	0,16	0,21	0,26
2,0	0,7	10	0,18	0,22	0,29	0,33	0,42	0,52
3,0	0,7	10	0,27	0,33	0,43	0,49	0,62	0,79
4,0	0,7	10	0,36	0,44	0,58	0,65	0,83	1,05

4.7 Hidrogeología

El componente hidrogeológico relaciona la geología, la hidráulica del agua subterránea, las fuentes y áreas de recarga, y el tipo de agua saturante del subsuelo.

Como se describió en el numeral 3.8. de Geología Local, en el área de estudio se encuentran rocas sedimentarias del Grupo Guadalupe (Formación Labor), y materiales no consolidados que conforman rellenos antrópicos.

Regionalmente, la ladera actúa como una divisoria de aguas siendo una zona de recarga para el sector occidental (donde se ubica el barrio Villa Nidia-ladera baja), a donde escurren y se infiltran las aguas lluvias. Morfológicamente, el área de influencia indirecta del barrio en estudio se ubica en una zona elevada (ladera alta) a unos 400 metros arriba del nivel base de la planicie de la ciudad de Bogota, condición que conjugada con el área de recarga y el alto nivel de variabilidad topográfica, hacen que el agua lluvia fluya rápidamente por las laderas del sector, y asimismo pueda generar alta infiltración a través de los niveles permeables.

Localmente, la Formación Labor aflora al oriente del área del proyecto, conformando un escarpe casi vertical y una pendiente estructural, con buzamientos generalizados hacia el noroccidente. Es de anotar, que el Grupo Guadalupe forma un acuífero confinado, con permeabilidad primaria en los miembros superiores (Arenisca Tierna y Labor) y permeabilidad secundaria en los miembros inferiores (Plaeners y Arenisca Dura).

Los rellenos expuestos no constituyen acuífero en el área de estudio, por su pequeño espesor y su carácter litológico, principalmente arcilloso.

En el trabajo de campo se observaron tres nacimientos (a media ladera en el escarpe rocoso) de agua subsuperficial en los contactos litológicos. Los caudales varían, pero en la parte superior potencialmente es alto y en lo sectores bajos, se presenta a nivel de escurrimientos. En consideración a lo anterior, y a la pendiente del sector, se establece que la infiltración es alta en esta zona.

Así las cosas, el nivel del agua subterránea se infiere que se encuentra a poca profundidad en la zona de estudio (desde un nivel superficial cerca y en el cauce de la quebrada hasta por debajo de los 1,5 metros de profundidad), de acuerdo con las observaciones realizadas y las consideraciones técnicas antes expuestas.

Es de anotar que este nivel fue "cortado" por los frentes mineros, lo que se evidencia por las emanaciones de agua colgadas en los escarpes. En el plano geomorfológico, se diferenciaron los puntos de agua natural (manantiales), y los puntos por donde escurren aguas servidas.

En conclusión, el flujo subterráneo relacionado con el nivel freático, es variable en cuanto a su posición, por estar localizada el área en la ronda hidráulica de la cuenca de la quebrada San Cristóbal, por lo tanto en unos sectores se presenta el nivel a poca profundidad y en otros, el nivel es superficial.

4.8 Sismo

De acuerdo con el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (AIS, 1997), el sector en estudio hace parte de la Zona 1 (Cerros), a la cual le corresponden los factores espectrales presentados en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Factores espectrales para la Zona 1 (AIS. 1997)

Característica	Valor
Período inicial, To	0,20
Periodo corto, Tc	1,00
Período largo, Tl	5,00
Aceleración máxima, Am	0,24
Aceleración nominal, Am	0,30
Factor de amplificación de la aceleración, Fa	1,00
Factor de amplificación de la aceleración en el rango de velocidades constantes, Fv	2,00

El efecto de la amplificación local de los sismos por efectos topográficos y el tipo de suelos involucrados (depósitos granulares consistentes en bloques y gravas), fue evaluado considerando un valor de factor de amplificación Fa=1,5, de acuerdo con la clasificación de los perfiles de suelo de Medvedev (1965) y estudio realizado por el INGEOMINAS y la UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, (1997). Por lo tanto y de acuerdo a la resolución 227 de 2006, en donde se menciona que para los estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa, se deberá considerar una aceleración sísmica critica para los análisis de tipo pseudos-estático no menor a 2/3 de la aceleración máxima (Am). Se concluyo que para los cálculos de estabilidad tomar una aceleración máxima de 0.24g.

5 COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO

5.1 Introducción

El levantamiento de la cobertura y uso del suelo puede ser definido como el análisis y clasificación de los diferentes tipos de cobertura y usos asociados que el hombre practica en una zona determinada. La COBERTURA es un elemento integrante del paisaje y junto con la geoforma constituyen su expresión visible, y el término USO se aplica al empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura, ya sea cíclica o permanente, para satisfacer sus necesidades, es evidente que las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores culturales o humanos.

5.2 Metodología de Trabajo

Existen diferentes sistemas de clasificación, preparados con el fin de estudiar coberturas locales con objetivos particulares. La mayoría de ellos toman como punto de partida, las nueve (9) clases del sistema de clasificación de la Unión Geográfica Internacional cuyo propósito fue unificar criterios sobre los diversos usos del suelo.

En el presente estudio, se utiliza el sistema de clasificación de uso y cobertura del suelo CIAF, éste sistema es análogo al propuesto por el ITC, pero se diferencia de él en que fija criterios de jerarquización de clases correspondientes a categorías menores de manera que sean congruentes con las escalas de trabajo (IGAC, 1992). El método establece una clara distinción entre los conceptos de uso y cobertura y los clasifica en grupos diferentes de clases, y puede ser ejecutado mediante la interpretación de imágenes de sensores remotos de diversas fuentes y escalas.

La clasificación involucra cuatro niveles de jerarquización que van de lo general a lo detallado así:

- Nivel 1: Exploratorio
- Nivel 2: Reconocimiento
- Nivel 3: Semi-detalle
- Nivel 4: Detalle

Para cada uno de los niveles aplica la clasificación expuesta en la **Tabla 12**, como sigue:

Tabla 12. Leyenda y Clasificación de uso y Cobertura de la Tierra

1er NIVEL EXPLORATORIO	2do NIVEL EXPLORATORIO	3er NIVEL EXPLORATORIO	4to NIVEL EXPLORATORIO
1. CONSTRUCCIONES	a. URBANO	1.RESIDENCIAL	*UNIFAMILIARES, MULTIFAMILIARES
		2.INDUSTRIAL	*TEXTIL, FABRIL, TRANSPORTE
		3.COMERCIAL	* TIENDAS, TALLERES
		4.EDUCATIVO	* COLEGIOS, JARDINES
		5.RECREATIVO	* PARQUES, CINES
2. VEGETACIÓN HERBÁCEA	a. PASTIZALES NATURALES	1. HERBACEOS	* GENEROS, PROTECCIÓN
3. BOSQUES	b. PLANTADO	2. CONÍFERAS	* ESPECIES, DENSIDAD
4. TIERRAS ERIALES	a. ROCAS EXPUESTAS	1. MASIVOS	* ESCARPES
	b. SUELOS DESNUDO	1. EROSIÓN PROVOCADA	* REMOCIÓN EN MASA
		2. EROSIÓN NATURAL	* INCIPIENTE

5.3 Clasificación del Uso y Cobertura del Suelo

La morfología natural en Villa Nidia ha sido alterada por la intervención del hombre; la explotación indiscriminada de fuentes de material y el doblamiento sin planeación de antiguas canteras, transcriben los rasgos relevantes de su nueva configuración paisajística.

La cobertura de la tierra, entendida como los atributos de la superficie del terreno, está integrada por cuatro componentes: parches de vegetación corta –pastos-, bosques plantados, tierras eriales propias del suelo desnudo y de afloramientos rocosos y, como elemento predominante, obras humanas, este último como elemento trascendente. El uso esencial es el urbano; calles pavimentadas en concreto o a nivel de sub-base y construcciones unifamiliares y en menor medida multifamiliares, asentados desde hace dos décadas, dan el matiz dominante a la mayor parte de la zona de estudio.

- 1a1. Construcciones urbanas, de uso residencial, unifamiliar y multifamiliar, en su mayoría de muros portantes confinados y construcciones aporticadas: 24,5 %.
- 1a3. Construcciones urbanas, de uso comercial, tiendas y talleres, en su mayoría de muros portantes confinados y construcciones aporticadas: 1 %.
- 1a4. Construcciones urbanas, de uso educativo, colegios y jardines, en su mayoría de muros portantes confinados y construcciones aporticadas: 0,4 %.
- 1a5. Construcciones urbanas, de uso recreativo, parque: 5,5 %.
- 3a1. Vegetación herbácea descubierta, de pastizales naturales, herbáceos, géneros y protección: 42,7 %.
- 4a1. Tierras eriales, Rocas expuestas, masivos, escarpes: 17 %.
- Otros como:
- Zonas vehiculares con un 8% y peatonales con 0,9%.

Con base en el reconocimiento y en el criterio del cuerpo técnico, en la identificación de la cobertura vegetal y uso actual del suelo, se obtuvo las diferentes categorías de clasificación que se ilustran en el **GE 147-PL1-06.**

6 ESTUDIO GEOTECNICO

6.1 Generalidades

En este capítulo se muestran los resultados de las actividades de campo, laboratorio y oficina conducentes a la caracterización geomecánica de los materiales térreos, naturales y antrópicos, existentes en el barrio objeto de estudio. Todas las actividades se retroalimentaron para obtener un modelo geotécnico representativo del subsuelo útil para la evaluación de estabilidad.

6.2 Investigación del subsuelo

6.2.1 Procedimiento de trabajo

Una de las primeras y más importantes deducciones de la prospección geológica reside en enmarcar a Villa Nidia (y sus laderas) como un escenario estructural homogéneo, al punto de asignarle la connotación de homoclinal, a pesar del relevante modelo de fallamiento regional, en especial el SE-NW, matizado por fallas de rumbo y lineamientos fotogeológicos, y del divergente contexto estructural de las vertientes vecinas: Cerro Norte y Santa Cecilia Norte, la primera envuelta en replegamientos y fallamientos locales y la segunda incólume (según las fuentes secundarias) del retrabajamiento tectónico.

Tal premisa unida a la prevalencia de un cinturón rocoso, de 25 m a 30 m de altura, expuesto pero cubierto sin pausa en el tope por extensos cuerpos antrópicos, y al constante dominio (y asomo) de los paquetes de rocas blandas (arcillolitas y limonitas) en la base de los cortes y a lo largo del plano de descanso de buena parte de la infraestructura, permitieron definir tanto los interrogantes más relevantes que debía suplir o contestar la exploración del subsuelo como diagramar el programa de exploración del subsuelo.

Una vez evaluadas las bondades, la relación beneficio-costo y las limitaciones de los diferentes métodos de exploración, se concluyó como la mejor alternativa del programa de exploración inicial, la ejecución de columnas estratigráficas (desde tierra), trincheras, apiques y la toma de datos estructurales. La secuencia identificada a partir del programa inicial, permitió definir un plan complementario de exploración, en donde tomaron relevancia los sondeos mecánicos de muestreo continuo con SPT y la puesta en marcha de columnas aéreas, con el fin de detectar delgadas intercalaciones arcillosas que pudiesen dar lugar a deslizamientos en el tope de los cortes, e investigar los cuaternarios, labor realizada hasta alcanzar el nivel de roca u horizontes de mayor resistencia.

Los métodos indirectos como la refracción sísmica o los sondeos geoeléctricos verticales –SEV´s- se descartaron como esquema exploratorio, pues si bien podrían

arrojar información valiosa acerca de los espesores de roca y suelo, presenta limitaciones impuestas por las expresiones morfométricas, el escaso contraste en la respuesta eléctrica esperada (pues son depósitos arenosos densos y areniscas) y la ausencia de sondeos mecánicos profundos para correlacionar la información.

La síntesis del conjunto de información se consolidó en resúmenes gráficos que facilitaron la caracterización, por zona geotécnica, de los materiales y su comprensión mediante secciones de análisis geológico-geotécnicas.

6.3 Exploración del subsuelo

6.3.1 Métodos directos

Cinco son los interrogantes relevantes y dos las hipótesis de contrastación que la investigación del subsuelo pretendió resolver. Los cuestionamientos se fundan en: a) cómo está constituida la secuencia estratigráfica?, es homogénea y constante en la porción de la vertiente?, b) cual es la posición de la tabla de agua, y qué papel cumple ella en comportamiento de las laderas?, c) qué tipos de material integran el cuaternario y qué espesores poseen?, d) qué influencia tiene el patrón estructural en la respuesta de las superficies libres?, y e) cómo se conjugan los anteriores elementos para dar lugar a los procesos de inestabilidad, es decir, cómo se incuban los deslizamientos?. Y las hipótesis residen en: Villa Nidia está inmersa en una misma unidad morfoestructural, y hay influencia de traza de falla alguna.

Para dar cumplimiento a este abanico de tareas, se planteo un programa de investigación en dos modalidades o etapas. Una, la de primer desarrollo, destinada a evaluar: a) el estado del macizo; b) la composición de la secuencia estratigráfica: definida a priori por bancos de areniscas de la formación labor interestratificados con delgados niveles (<1 m) de arcillolitas y limonitas que sirven de potenciales superficies de despegue para deslizamientos traslacionales; c) la influencia de los planos estructurales y de discontinuidad en la respuesta de las laderas; d) la presencia o no de planos de falla o de anomalías estructurales, máxime las divergencias en composición y morfología de las franjas nororiental y suroriental; y e) deducir flujos locales de agua.

Se enmarca en métodos de exploración directa con columnas estratigráficas –dos en total-; trincheras, tres, distribuidas indiferentemente pero con énfasis en las masas potencialmente inestables; levantamientos estructurales en los escarpes rocosos, en todo el frente expuesto, incluyeron entre otros tópicos, información sobre las tendencias generales de orientación: rumbo y buzamiento y características físicas como abertura, espaciamiento, rugosidad y persistencia; y apiques –veinticuatro- distribuidos al azar.

Y otra, la segunda fase, basada exclusivamente en sondeos mecánicos y columnas estratigráficas en altura, tuvo como objetivos principales: definir la posición altimétrica de los paquetes guía, y de paso ratificar si las laderas pertenecen al mismo subespacio estructural; dilucidar los principales patrones geométricos de los depósitos recientes

(espesor y variación), en especial de la interfase depósito-roca y la cobertura de suelo orgánico, conocer el estado y composición de los materiales del subsuelo involucrados, tanto del cuaternario como de los niveles de roca en todo la columna; inferir la probable posición de las superficies de deslizamiento y obtener muestras para su caracterización física y mecánica.

Conjugo nueve (9) perforaciones en aras de cerrar los modelos espaciales. Su ubicación persiguió la deducción del modelo espacial mediante su alineamiento y comparación con la información levantada en las columnas estratigráficas.

Igualmente, se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas que condujeran hacia la caracterización de los materiales involucrados y se complementaron con pruebas de campo como SPT (destinado para los llenos heterogéneos y los depósitos de actividades mineras, básicamente gruesos y de matriz areno-arcillosa).

Durante estos trabajos se describieron los materiales encontrados; en cada caso se consignaron: tipo de material, tamaño de grano, distribución granulométrica, color, contenido de humedad, presencia de oxidaciones y fisuras; meteorización y compacidad o consistencia. Todas las muestras se identificaron visualmente en campo, se etiquetaron o almacenaron de acuerdo con las normas de la ASTM, para ser enviadas al laboratorio.

Así las cosas, las dos etapas de exploración dejaron entrever que la secuencia estratigráfica es normal, heterogénea y continua, pero con disposiciones multicapa configuradas en bancos potentes de areniscas, espacialmente cubiertos por rellenos antrópicos y masas coluviales. Los paquetes arcillosos, con espesores de 0.05 y 0.30 m, recorren la secuencia a profundidades variables pero casi esencialmente en la base de los cortes y pueden actuar como superficies potenciales de despegue de deslizamientos planares. El ejemplo más claro se circunscribe en la cancha de juegos, los depósitos se movilizan sobre uno de los planos de limolitas coadyuvados por la concentración de flujos superficiales, descargas erráticas y reblandecimiento de la interfase suelo-roca. Cabe reseñar, que el nivel freático, se detecto en los rellenos antrópicos, entre 0.5 m y 3.25 m de profundidad.

En el Plano **GE 147-PL1-01** se muestra la distribución en planta de las columnas, los apiques, las trincheras, las estaciones de levantamiento estructural y los sondeos, superpuesta a la geología de superficie y, en el **ANEXO III** se disponen los registros obtenidos representados en forma gráfica. De igual forma, en la **Tabla 13** se referencian las coordenadas, cotas y profundidades de los sondeos, columnas y apiques, mientras que en la **Tabla 14** y la **Tabla 15**, se describen los niveles estratigráficos identificados y su suposición en cada punto de exploración respectivamente.



Foto 25 Sondeo No 1 Y 2



Foto 26 Sondeo No 3 Y 4

Tabla 13. Localización de los puntos de exploración directa del subsuelo

Punto de exploración	Coordenadas		Profundidad	Nivel Freático
	Norte (m)	Este (m)	(m)	(m)
Perforación 1	115352,57	106421,86	6,0	0,75
Perforación 2	115332,91	106459,32	7,5	2,50
Perforación 3	115356,19	106477,27	6,0	No se registró
Perforación 4	115326,94	106482,69	9,0	3,25
Perforación 5	115305,88	106511,83	7,0	No se registró
Perforación 6	115386,30	106409,84	6,05	No se registró
Perforación 7	115386,60	106376,37	6,0	No se registró
Perforación 8	115422,02	106428,29	3,0	No se registró
Perforación 9	115420,50	106409,61	5,0	No se registró
Trinchera 1	115365,34	106343,37	4,5	No se registró
Trinchera 2	115398,34	106434,52	1,2	No se registró
Trinchera 3	115374,85	106422,92	2,8	No se registró
Trinchera 4	115439,36	106459,33	14	No se registró
Columna 1	115407,42	106443,30	12,0	No se registró
Columna 2	106436,00	115399,00	4,2	No se registró
Apique 1	115363,82	106352,85	1,0	No se registró
Apique 2	115365,97	106430,95	0,9	0,80
Apique 3	115347,32	106419,97	1,0	No se registró
Apique 4	115362,28	106410,38	1,1	No se registró
Apique 5	115378,46	106433,04	1,0	1,00
Apique 6	115392,51	106428,56	1,0	No se registró
Apique 7	115394,21	106399,25	1,0	No se registró
Apique 8	115382,44	106395,46	1,2	No se registró
Apique 9	115394,71	106382,26	1,2	No se registró
Apique 10	115414,38	106428,16	0,9	0,90
Apique 11	115381,48	106385,57	0,8	No se registró
Apique 12	115347,51	106413,06	1,4	1,40

Punto de exploración	Coordenadas		Profundidad	Nivel Freático
	Norte (m)	Este (m)	(m)	(m)
Apique 13	115396,97	106404,62	2,0	2,00
Apique 14	115396,17	106374,55	0,5	0,50
Apique 15	115374,33	106393,62	1,9	1,90
Apique 16	115381,48	106385,57	1,2	1,20
Apique 17	106370,70	115388,28	0,8	0,00 (A.N.)
Apique 18	115392,22	106445,74	1,5	No se registró
Apique 19	115335,07	106453,31	1,6	1,70
Apique 20	115345,40	106474,48	1,5	No se registró
Apique 21	115340,68	106488,62	1,0	No se registró
Apique 22	115457,86	106412,11	2,0	No se registró
Apique 23	106340,10	115408,32	1,0	No se registró
Apique 24	106388,96	115444,73	0,5	0,5
Apique 25	106383,74	115369,61	1,0	No se registró
Apique 26	106468,11	115357,79	1,0	No se registró

Tabla 14.Descripción de los niveles estratigráficos

NIVEL	NOMBRE	SIMBOLO	DESCRIPCION
8	Depósito de Relleno Antrópico	Qras	Nivel superior -matriz soportado-. Fragmentos de roca, basuras y escombros de construcción, embebidos en una matriz arenosa algo limosa y en ocasiones arcillosa, de color marrón amarillento y de consistencia media, con raíces. y restos vegetales. La proporción matríz/fragmentos puede variar entre 50/50 %y 70/30%. (Ver fotografías correspondientes a los apiques 19,20 y 22).
		Qrai	Nivel inferior -matriz soportado-. Está constituido por basura, bloques, fragmentos, desechos, escombros de construcción y ocasionalmente por bloques hasta de 80cm de diámetro; embebidos en una matríz arcillo arenosa, de color negro a marrón, de humedad baja, plasticidad baja, consistencia firme, con raíces y con grado de consolidación medio a bajo. El porcentaje de la matríz varía entre 30 a 40 %. (Ver fotografías de apiques 1 y 15).

7	Depósito de Relleno Antrópico - Actividades Mineras	Qram	Corresponden a desechos y escombros, matriz soportados, producto de la antigua explotación minera, de baja a media consolidación y mal seleccionados. Están constituidos por guijos y gravas, dispuestos en una matriz arenosa a areno arcillosa; aunque predominan los fragmentos menores a 10 cm se observan esporádicamente grandes bloques de roca que se han desprendido de los antiguos frentes de explotación. La proporción del material granular varía entre 30 a 50% (Ver fotografías de los apiques 2 a 13, 16 y 19).
6	Depósito de Coluvión	Qco	Están constituidos por limos arenosos o arenas limosas y en ocasiones arenas arcillosas, de color café y rojizo por oxidación, y son de baja humedad; involucran gravas y fragmentos subangulares. (apiques 20 y 21). Esporádicamente se observan bloques mayores a 1m de diámetro. Espacialmente el contenido de material granular se hace nulo como lo observado en el apique 26. Por tanto el contenido de fracción granular oscila entre el 0 y el 35%.
5	Formación Labor. Nivel 3 de arcillolitas y limonitas.	Ksgl-al 3	Hacia la base presenta capas medias a gruesas de cuarzoarenisca, que indican un cambio transicional entre la cuarzoarenisca inferior (Ksgl-are 1) y esta secuencia. Consta de limolitas, cuarzoareniscas finas y arcillolitas limosas, de color gris claro y varicoloreadas, y con grado de meteorización medio. Se encuentran dispuestas en capas delgadas a medias, con estratificación ondulada paralela y laminación plano paralela discontinua. En ocasiones las arcillolitas son macizas y presentan fractura concoidea.
4	Formación Labor. Nivel 2 de areniscas.	Ksgl-are 2	Cuarzoareniscas de grano fino, medio a grueso, angulares, muy silíceas, muy bien cementadas, bien seleccionadas, duras, macizas, de color gris claro y tonalidad pardo amarillentas por oxidación.
3	Formación Labor. Nivel 2 de arcillolitas y limolitas.	Ksgl-al 2	Sucesión de arcillolitas limosas, de color blanco amarillento, muy meteorizada, no plásticas, homogénea en posición y de estratificación interna plano paralela. Esta secuencia tiene un espesor de 65cm y se separó de dos secuencias arenosas masivas, por ser un nivel guía, de clara continuidad en el escarpe rocoso y de composición arcillosa.
2	Formación Labor. Nivel 1 de areniscas.	Ksgl-are1	Cuarzoareniscas en bancos, de color negro a gris oscuro o gris claro, y blanco a amarillo claro. De grano fino a muy fino, bien seleccionadas, masivas, muy bien cementadas, de dureza alta, muy silíceas y con tonos de oxidación. Se encuentran en capas de 50cm, 80cm y 1m, con intercalaciones arcillosas muy delgadas.
1	Formación Labor. Nivel 1 de arcillolitas y limolitas.	Ksgl-al 1	Consta de una intercalación de limolitas y arcillolitas, y de areniscas de grano fino a muy fino. Dispuestas en capas delgadas, en donde predomina las limolitas.

Tabla 15. Profundidades de niveles estratigráficos para cada punto de exploración

NIVELES	PERFORACIONES								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2,50-6,00	---	---	---	---	---	---	---	---
3	---	---	---	---	6,25-7,00	---	---	---	---
4	---	3,00-7,50	2,50-6,00	5,00-9,00	3,00-6,25	---	---	---	---
6	---	---	1,25-2,50	2,50-5,00	---	---	---	---	---
7	0,00-2,50	---	---	---	---	0,00-6,05	0,00-6,00	0,00-3,00	0,00-5,00
8 (s)	---	0,00-3,00	0,00-1,25	0,00-2,50	0,00-3,00	---	---	---	---
NIVELES	**APIQUES**								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	---	0,80-0,90	---	---	---	---	---	---	---
7	---	0,00-0,80	0,00-1,00	0,00-1,10	0,00-1,00	0,00-1,00	0,00-1,00	0,00-1,50	0,00-1,20
8(i)	0,00-1,00	---	---	---	---	---	---	---	---
NIVELES	**APIQUES**								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	---	---	---	1,80-2,00	---	---	---	---	---
7	0,00-0,90	0,10-0,80	0,00-1,40	0,00-1,80	0,00-0,50	---	0,00-1,20	0,00-0,80	0,00-1,50
8 (i)	---	0,00-0,10	---	---	---	0,00-1,90	---	---	---
NIVELES	**APIQUES**								
	19	20	21	22	23	24	25	26	
6	---	0,30-1,50	0,60-1,00	---	---	---	---	0,00-1,10	---
7	0,70-1,60	---	---	---	0,00-1,00	---	---	---	---
8(i)	V	---	---	---	---	0,00-0,50	0,00-1,00	---	---
8(s)	0,00-0,70	0,00-0,30	0,00-0,60	0,00-2,00	---	---	---	---	---
NIVELES	**TRINCHERAS**								
	1	2	3	4					
1	---	0,85-1,20	---	---	---	---	---	---	---
3	3,70-4,50	---	---	---	---	---	---	---	---
4	0,00-3,70	---	---	---	---	---	----	---	---
7	---	0,00-0,85	0,00-2,80	---	---	---	---	---	---
8(s)	---	---	---	0,00-14,00	---	---	---	---	---

6.3.2 Ensayos de campo

El avance en los sondeos se llevó a cabo con el ensayo de penetración estándar, SPT. El cual se consideró adecuado dado el carácter heterogéneo de los suelos encontrados y bajo la consideración que el muestreo inalterado en este tipo de suelos (principalmente arenosos) se dificulta. Asimismo, con el avance del ensayo se consiguen al unísono, muestras alteradas para clasificación, y un estimativo de la resistencia del material a partir de los cuales se pueden constatar los contactos litológicos. El ensayo se practicó con equipo mecánico y pesa de 140 lb.

El número de golpes registrado en campo (N_{45}) fue normalizado con el objeto de tener en cuenta el confinamiento del material y la relación de energía promedio aplicada, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$N_i' = C_N * N * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4 \qquad \text{Ec. 4.1}$$

En donde:

N'_i : Número de golpes corregido para un determinado nivel de transmisión de energía *i*

C_N : Factor de ajuste para tener en cuenta el esfuerzo geostático, σ_v', Se evaluó con base en las propuestas de Peck, Seed, Meyerhoff-Ishihara, Liao-Whitman, Skempton, Sedd-Isdriss, Schmertmann y González, cuidando siempre que este factor no resultara mayor que 2. Estos valores posteriormente se promediaron.

η_1 : Factor de corrección por eficiencia de energía trasmitida del martillo al varillaje y al tomamuestras, Se obtiene como la relación entre las eficiencias medias de cada país así, para Japón la eficiencia es del 72%. para USA del 60% y para Colombia del orden de 45%.

η_2 : Factor de corrección por longitud del varillaje.

η_3 : Factor de corrección por presencia de revestimiento, Debido a que no se utilizó revestimiento, el factor de corrección es 1,0.

η_4 : Factor de corrección por diámetro de la perforación, Los diámetros de las perforaciones fueron inferiores a 12 cm, por lo cual el factor de corrección es 1,0.

Al considerar que el SPT es representativo para suelos finos y arenas, se determinarán los parámetros de resistencia para los depósitos antrópico y coluvial, con el fin de tener una primera aproximación o una orientación de los valores correspondientes a la

matriz de cada material. Se parte del hecho de que el número de golpes no es superior a 11, en las lecturas realizadas cada 6 pulgadas, y en general están en el intervalo de 2 a 6. Por tanto, los valores de ángulo de fricción equivalente, Ø, se estimarán mediante el promedio de los resultados obtenidos de las siguientes expresiones (véase la **Tabla 16**):

Tabla 16. Expresiones para correlacionar el ángulo de fricción a partir del SPT

Kishida	$ø = 15 + \sqrt{(20*N_{72})}$	Ec. 4.2
JRB	$Ø = 15 + \sqrt{(15*N_{72})}$	Ec. 4.3
Shiou & Fukui	$Ø = 27 + 0{,}36 * N_{72}$	Ec. 4.4
JNR	$ø = 27 + 0{,}30 * N_{72}$	Ec. 4.5

Adicionalmente, y con el ánimo de evaluar cualitativamente los resultados del ensayo de penetración, en la **Tabla 17** y en la **Tabla 18** se presentan algunos criterios de Terzaghi y Peck, que relacionan la resistencia a la penetración con la compacidad relativa en arenas y con la consistencia en suelos finos, respectivamente. La valoración de estas propiedades en los materiales encontrados se relaciona en la **Tabla 19**.

Nótese que el relleno antrópico (Qra) recorre la escala de compacidad desde suelta hasta media, mientras que el depósito coluvial (Qco) refleja una consistencia uniforme –media-. Para terminar, se estiman los parámetros c' y ϕ' por tipo de material siguiendo la metodología propuesta por González, A.J. (1999) que consiste en graficar puntos (σ_v', τ) en planos Mohr-Coulomb donde los coeficientes de una regresión lineal, corresponden a los parámetros geomecánicos efectivos buscados. El esfuerzo efectivo vertical se calcula como la diferencia entre el esfuerzo geostático total y la presión de poros y, el esfuerzo cortante a la profundidad del ensayo, se obtiene como el producto del esfuerzo efectivo vertical por la tangente del ángulo de fricción equivalente estimado antes.

Tabla 17. Relación entre la densidad relativa y la resistencia a la penetración de suelos arcillosos.

Resistencia a la penetración, N (golpes/pie)	**Compacidad relativa**
0 – 4	Muy suelta
4 – 10	Suelta
10 – 30	Media
30 – 50	Compacta
>50	Muy compacta

Tabla 18. Relación entre la consistencia y la resistencia a la penetración

Resistencia a la penetración, N (golpes/pie)	Resistencia a la compresión simple (Kg/cm^2)	Consistencia
<2	<0,25	Muy blanda
2 – 4	0,25 – 0,50	Blanda
4 – 8	0,50 – 1,00	Media
8 – 15	1,00 – 2,00	Firme
15 – 30	2,00 – 4,00	Muy firme
>30	>4,00	Dura

Tabla 19. Relación entre la consistencia y la resistencia a la penetración

Muestra	Material	Resistencia a la penetración, N (golpes/pie)	Consistencia
S2-M1	Qra	10	Media
S2-M2	Qra	5	Suelta
S2-M3	Qra	13	Media
S3-M1	Qra	5	Suelta
S3-M2	Qco	6	Media
S4-M1	Qra	7	Suelta
S4-M2	Qra	9	Suelta
S4-M3	Qco	6	Media
S4-M4	Qco	5	Media
S4-M5	Qco	5	Media
S5-M1	Qra	9	Suelta
S5-M2	Qra	14	Media
S5-M3	Qra	23	Media

La ecuación de la envolvente de cada material se muestra en la **Figura 12** junto con los respectivos parámetros de resistencia, los que se resumen en la **Tabla 20** Los grupos de materiales aparecen diferenciados por colores en ella y fueron obtenidos mediante la interpretación simultánea y retroalimentada de la información geológica (plano y secciones), los registros de exploración del subsuelo, las propiedades físicas de los materiales y las propiedades geomecánicas resultantes de este mismo proceso. Adicionalmente, el procedimiento descrito con anterioridad se puede constatar en la **Tabla 21**, que incluye la normalización del ensayo (SPT).

Tabla 20. Resumen de parámetros de resistencia en condición drenada a partir del SPT

No	Nombre	Descripción	γ	Cohesión	ϕ
			(ton/m^3)	(ton/m^2)	(°)
6	Qco	Depósito Coluvial	1.6	0.1669	24.7
8	Qra	Relleno Antrópico	1.82	0.00	30.6

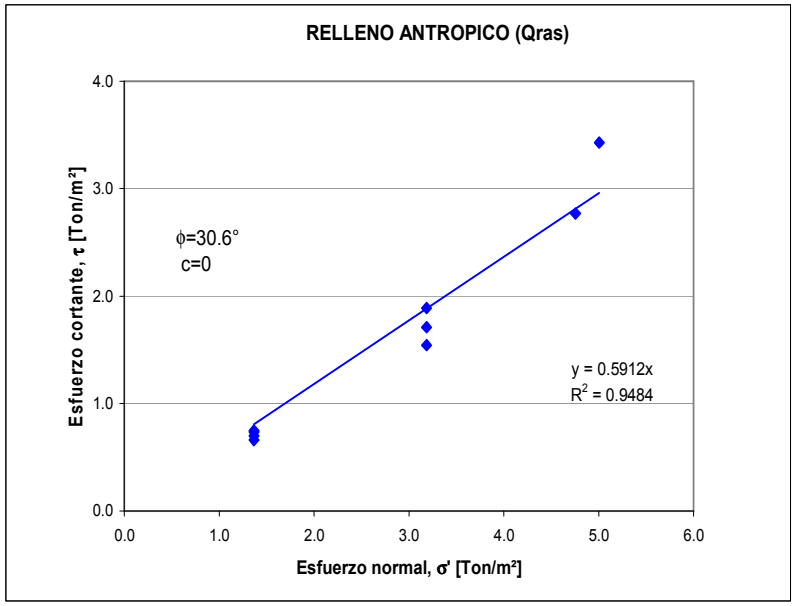
Tabla 21. Normalización del SPT.

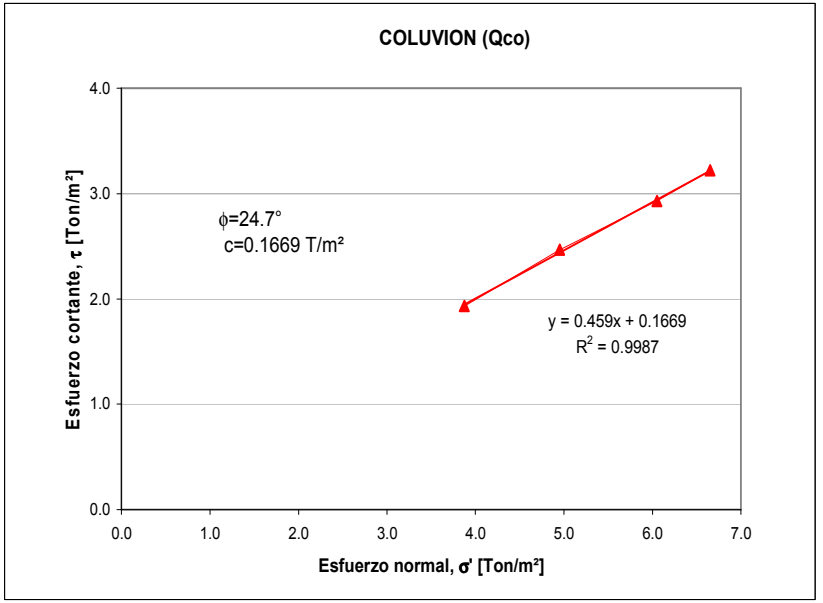
Sondeo	Muestra	Profundidad (m)			golpes/pie			N_{45}	NF	Tipo	γ (Ton/m^3)	σ_v (Ton/m^2)	σ_v' (Ton/m^2)	Rs	C_N (adim)								C_N (prom)	η_1		η_2	η_3	η_4	Ncorr		$\phi_{equivalente}$					Compacidad ó Consistencia	σ_v' (Ton/m^2)	τ (Ton/m^2)		
		de	a	media	1	2	3								Peck	Seed	Meyerhoff-Ishihara	Liao-Whitman	Skemp-ton	Seed-Idriss	Schmert mann	Gonzá-lez		USA	Japón				USA	Japón	Kishida	JRB	Shiou & Fukui	JNR	Prom				Fino /Granular	Sondeo-Muestra
												0.00	0.00																									
S - 2	1	0.50	1.00	0.750	2	4	7	11	2.5	8	1.82	1.37	1.37	0.14	1.665	2.000	2.000	2.000	1.760	2.000	2.000	1.865	1.911	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	11	9	28.42	26.62	30.24	29.70	29	Media	1.37	0.75	2	S - 3 M-2
S - 2	2	1.50	2.00	1.750	2	3	3	6	2.5	8	1.82	3.19	3.19	0.32	1.382	1.621	1.669	1.772	1.517	1.701	1.950	1.497	1.639	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	22.75	28.44	28.20	26	Suelta	3.19	1.54	2	S - 3 M-4
S - 3	3	2.50	3.00	2.750	5	8	11	19	2.5	8	1.82	5.01	4.76	0.48	1.248	1.404	1.446	1.450	1.355	1.455	1.637	1.323	1.415	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	15	12	30.49	28.42	31.32	30.60	30	Media	4.76	2.77	2	S - 3 M-5
												0.00	0.00																									
S - 3	1	0.50	1.00	0.750	1	2	3	5	n.e.	8	1.82	1.37	1.37	0.14	1.665	2.000	2.000	2.000	1.760	2.000	2.000	1.865	1.911	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	22.75	28.44	28.20	26	Suelta	1.37	0.66	2	S - 3 M-2
S - 3	2	2.00	2.50	2.250	2	4	3	7	n.e.	6	1.60	3.88	3.88	0.39	1.316	1.515	1.563	1.606	1.441	1.581	1.799	1.412	1.529	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	23.66	28.80	28.50	26	Media	3.88	1.93	1	S - 3 M-5
												0.00	0.00																									
S-4	1	0.50	1.00	0.750	1	2	5	7	3.25	8	1.82	1.37	1.37	0.14	1.665	2.000	2.000	2.000	1.760	2.000	2.000	1.865	1.911	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	6	25.95	24.49	29.16	28.80	27	Suelta	1.37	0.70	2	S - 4 M-1
S-4	2	1.50	2.00	1.750	5	6	5	11	3.25	8	1.82	3.19	3.19	0.32	1.382	1.621	1.669	1.772	1.517	1.701	1.950	1.497	1.639	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	10	8	27.65	25.95	29.88	29.40	28	Suelta	3.19	1.71	2	S - 4 M-1
S-4	3	2.50	3.00	2.750	5	6	3	9	3.25	3	1.60	4.95	4.95	0.50	1.235	1.382	1.423	1.421	1.338	1.431	1.605	1.305	1.392	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	5	25.00	23.66	28.80	28.50	26	Media	4.95	2.47	1	S - 4 M-1
S-4	4	3.50	4.00	3.750	3	4	3	7	3.25	3	1.60	6.55	6.05	0.61	1.168	1.273	1.303	1.286	1.246	1.308	1.446	1.218	1.281	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	22.75	28.44	28.20	26	Media	6.05	2.93	1	S - 4 M-1
S-4	5	4.50	5.00	4.750	3	4	3	7	3.25	3	1.60	8.15	6.65	0.67	1.136	1.221	1.245	1.226	1.201	1.250	1.371	1.177	1.229	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	5	4	23.94	22.75	28.44	28.20	26	Media	6.65	3.22	1	S - 4 M-1
												0.00	0.00																									
S-5	1	0.50	1.00	0.750	4	5	5	10	n.e.	8	1.82	1.37	1.37	0.14	1.665	2.000	2.000	2.000	1.760	2.000	2.000	1.865	1.911	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	10	8	27.65	25.95	29.88	29.40	28	Suelta	1.37	0.73	2	S - 5 M-1
S-5	2	1.50	2.00	1.750	5	8	9	17	n.e.	8	1.82	3.19	3.19	0.32	1.382	1.621	1.669	1.772	1.517	1.701	1.950	1.497	1.639	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	15	13	31.12	28.96	31.68	30.90	31	Media	3.19	1.89	2	S - 5 M-1
S-5	3	2.50	3.00	2.750	2	8	27	35	n.e.	8	1.82	5.01	5.01	0.50	1.231	1.376	1.416	1.414	1.333	1.424	1.596	1.301	1.386	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	27	22	35.98	33.17	34.92	33.60	34	Media	5.01	3.43	2	S - 5 M-1

N_{45}	Número de golpes para el 45% de energía del martillo (Estimado para Colombia)	η_2	Factor de corrección por longitud de la varilla
NF	Nivel freático	η_3	Factor de corrección por revestimiento interno de tomamuestras
σ_v	Esfuerzo vertical total	η_4	Factor de corrección por diámetro de la perforación
σ_v'	Esfuerzo vertical efectivo	Ncorr	Número de golpes corregido
Rs	Parámetro utilizado para el C_N, Rs = σ_v'/p_a	ϕ	Ángulo de fricción interna
C_N	Factor de corrección por confinamiento efectivo	σ_v'	Esfuerzo vertical efectivo
η_1	Factor de corrección por energía del martillo: La energía de USA es el 60% y la de Japón el 72%		

	MATERIAL		γ(Ton/m^3)
8	Qras	Relleno antrópico	1.82
6	Qco	Coluvión	1.60

Figura 12. Envolvente y parámetros de resistencia para cada uno de los materiales analizados con base en el SPT.





6.3.3 Ensayos de laboratorio

Para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de: la roca, los rellenos antrópicos y el coluvión, y de las discontinuidades, especialmente en los planos de estratificación arenisca-arenisca, limolita-limolita y en los rellenos de arcilla se llevó a cabo de un programa discreto de muestreo, en el que se obtuvieron especimenes en bloques, núcleos y los extraídos con split spoon. A continuación en la **Tabla 22**; se relacionan la cantidad, el tipo y la norma que se utilizó, para cada uno de los ensayos que se realizaron.

Tabla 22. Relación de ensayos de laboratorio

ENSAYO		NORMA	CANTIDAD
w_n	Contenido de humedad natural	INV-E122	8
Lím	Límites de consistencia	INV-E125 y 126	7
Gs	Peso específico de sólidos	INV-E121	3
γ_t	Peso unitario total	INV-E121	11
γ_d	Peso unitario seco	INV-E121	5
PT No 200	Pasa Tamíz No. 200		3
CP	Carga puntual		2
BD	Bloque Deslizante		3
CD	Corte directo	INV-E154	15

El **ANEXO V-A** contiene las memorias de cálculo de los ensayos ordenados por el Consorcio y la **Tabla 23**, sintetiza los resultados de las pruebas de contenidos de humedad natural, límites de consistencia, pesos unitarios totales, y cortes directos, entre otros.

Es de aclarar que para el ensayo de carga puntual se reprocesaron los datos obtenidos del laboratorio, a partir del método planteado por el ISRM, con el fin de obtener valores de compresión inconfinada, que se registran en la **Tabla 24**. En ésta también se consignaron valores de referencia de la compresión uniaxial, correspondientes al barrio Arauquita. Por otra parte, los resultados obtenidos para la muestra 12 (arcillolita), no se tendrán en cuenta para la caracterización del macizo rocoso, debido a que superan los valores para este tipo de materiales.

6.4 CARACTERIZACION GEOMECÁNICA

En las laderas del barrio Villa Nidia se exponen los dos tipos básicos de materiales térreos: los suelos y las rocas. Los primeros corresponden principalmente a depósitos cuaternarios de tipo antrópico y en menor proporción a coluviones; y las segundas pertenecen exclusivamente a la Formación Labor del Grupo Guadalupe, de edad cretácica. Con el propósito de tener una aproximación a la caracterización geomecánica de ambos se establecieron como puntos de partida: a) la realización de visitas de campo durante las que se definieron los contactos roca-depósito y b) la descripción visual de los materiales encontrados. En las descripciones de las unidades de roca, se incluyeron aspectos como: tamaño de grano, composición mineralógica, litología, angularidad de las partículas, gradación, etc. Adicionalmente, en varios de los afloramientos y columnas se levantaron datos estructurales de las discontinuidades del macizo rocoso (Veáse **Tabla 25**), su localización se aprecia en el **GE 147-PL1-09.**

La caracterización del macizo rocoso partió de los trabajos de geología (campo y fotoidentificación), de los sondajes (SPT) y de la información arrojada por los ensayos de laboratorio. Las pruebas de laboratorio como contenido de humedad, límites de consistencia, peso unitario, corte directo y carga puntual ejecutadas sobre muestras de bloque, sirvieron para determinar los parámetros de clasificación y resistencia del material rocoso. Y los ensayos de corte de fuentes secundarias, fueron útiles para la caracterización geomecánica de las discontinuidades.

Tabla 23. Resumen de ensayos de laboratorio.

Muestra	Material	Clasificación	Humedad	Peso unitario total	Peso unitario seco	Límites de Atterberg			PT No.200	Gravedad Específica	Carga Puntual	Corte Directo			Bloque Deslizante
		USC	w (%)	γt (T/m³)	γd (T/m³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)		Gs	Is (Kg/cm²)	C (Kg/cm²)	ϕ' (°)	Condición	ϕ (°)
ROCAS															
1	Limolita		3.8	2 421	2 331										55
2	Limolita		3	2 446	2 375										48
6	Limolita			2 327								0.04 (1)	28.7	Inundado - Residual	
												0.05 (1)	30.8	Inundado - Pico	
7	Arcillolita	CL	5.5			32.7	19.5	13.2							
8	Arcillolita		4.8	2 434	2 322										55
9	Arcillolita	CL	4.1			34.8	21.1	13.7							
11	Relleno - Arcilla	CL	4.4	2 139		34.4	19.2	15.2				0.01	7.4	Inundado - Residual	
												0.03	7.8	Inundado - Pico	
12	Arcillolita	CL	3.5	2 414	2 332	41.1	21.2	19.9			49.94 (4)				
13	Arenisca		0.7	2 868	2 847										
14	Arenisca			2 287							20.26	0.22 (1)	19.5	Inundado - Pico	
DEPOSITOS															
1	Qra (2)	CL	11.7	1.82		35	19	16	62.2	2 577		0.45	28.65	Inundado - Pico	
												0.79	13.14	Inundado - Residual	
												0.42	16.24	Inundado - Residual	
												0.09	28.5	Inundado - Residual	
2	Qram (2)	SC	10.8	2.05		31	15	16	25.5	2 657		0.57	52.74 (3)	Inundado - Residual	
												0.1	37.42	Inundado - Residual	
												0.16	27.97	Inundado - Residual	
3	Qco (2)	MH	39.3	1.6		72	33	39	97	2.59		0.28	28.47	Inundado - Residual	
												0.2	28.01	Inundado - Residual	
												0.12	25.87	Inundado - Residual	

(1) Ensayo de corte directo realizado sobre discontinuidades.

(2) Todos los ensayos se ralizaron en la matíz del depósito, sin tamizar.

(3) Los datos de este ensayo no se tomaron para la caracterización geotécnica del relleno de minería, ya que los valores obtenidos son muy altos para el material estudiado.

(4) drá en cuenta, debido a que el valor es muy alto para este tipo de materiales

Tabla 24. Resultados ensayos de carga puntual a partir del ISRM y datos de compresión inconfinada

Muestra	Unidad	Ensayo	Fuente	Especimen No.	L (cm)	D (cm)	W (cm)	De (cm)	De^2 (cm^2)	P (Kgf)	Is (Kgf/cm^2)	$F_{corrección}$	Is_{50} (Kgf/cm^2)	Is_{50} (Kgf/cm^2)	σ_u (Kgf/cm^2)
M14	Ksgl-are	Carga puntual	Villa Nidia Gia-Geocing	1	8.70	6.12	6.30	7.01	49.09	860	17.52	1.16	20.39	**20.26**	**486.27**
				2	7.60	6.60	7.30	7.83	61.34	540	8.80	1.22	10.77		
				3	7.00	6.20	6.80	7.33	53.68	1050	19.56	1.19	23.23		
				4	6.20	7.30	7.60	8.40	70.64	1200	16.99	1.26	21.46		
				5	5.30	5.80	6.20	6.77	45.79	850	18.56	1.15	21.27		
				6	7.50	6.65	5.40	6.76	45.72	850	18.59	1.15	21.30		
				7	7.00	7.20	4.50	6.42	41.25	910	22.06	1.12	24.69		
				8	7.20	7.00	6.50	7.61	57.93	970	16.74	1.21	20.23		
				9	8.50	6.10	6.00	6.83	46.60	770	16.52	1.15	19.01		
M12	Ksgl-al	Carga puntual	Villa Nidia Gia-Geocing	1	9.80	3.80	7.30	5.94	35.32	3010	85.22	1.08	92.11	**49.94**	**1198.45**
				2	11.80	7.05	10.20	9.57	91.56	2900	31.67	1.34	42.42		
				3	9.48	6.00	12.80	9.89	97.78	3420	34.97	1.36	47.54		
				4	9.30	4.80	7.85	6.93	47.98	2270	47.32	1.16	54.79		
				5	11.60	6.20	4.80	6.16	37.89	1630	43.02	1.10	47.24		
				6	11.00	5.70	5.80	6.49	42.09	2160	51.31	1.12	57.70		
GMM8	Ksgl-al	Compresión inconfinada	Arauquita Consorcio Geotec	1											**486.66**
GMM5	Ksgl-al	Compresión inconfinada	Arauquita Consorcio Geotec	1											**336.86**
GMM3	Ksgl-al	Compresión inconfinada	Arauquita Consorcio Geotec	1											**212.96**

Nota: Para las muestras M12 y M14, se determino el valor de la compresión inconfinada a partir del resultado de la carga puntual mediante la correlación σu=24Is (Brock y Franklin 1979).

Tabla 25. Relación de discontinuidades del macizo rocoso.

Punto de Control Estructural	Localización		Familia de Discontinuidades											
	X	Y	E	EB	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10/D11
1	1015379	1006420	298/20 302/20 299/23											
2	1015434	1006396	295/22 302/22											
3	1015370	1006436	304/22 305/26											
4	1015378	1006425	289/18 286/25											
5	1015370	1006435	298/21											
6	1015388	1006425	290/20 288/21											
7	1015393	1006409	301/26											
8	1015394	1006416	296/21 290/22											
9	1015396	1006413	314/21 304/20											
10	1015397	1006411	309/26 300/21											
11	1015394	1006411	294/24											
12	1015408	1006420	309/24 297/24 307/22											
13	1015402	1006405	299/22											
14	1015303	1006407	304/23 311/21 311/24											
15	1015405	1006426	302/26 305/24											
16	1015401	106433	306/20											
17	1015403	1006444	311/24 309/20											
18	1015397	1006471	308/25											
19	1015416	1006449			042/82									
20	1015453	1006412		294/34	034/76			168/79 168/84 154/78 180/88 165/71	010/88	081/78 074/82 078/70 084/72 070/59 068/80 065/82 085/73	122/78 132/76 131/76 132/78 135/59 122/56 105/76 138/81	212/59 215/48 214/71	350/78 349/84 335/52 312/90	
21	1015539	1006373	289/24	301/30										
22	1015468	1006503	305/26											
23	1015407	1006469	305/25											
24	1015359	1006308		296/28 310/36 300/28										
25	1015353	1006338	324/25											
26	1015346	1006329		297/31										
27	1015318	1006493	293/22			44/90								
28	1015342	1006432	306/20											
29	1015326	1006465	287/18			276/75 270/90 277/79 268/71 284/90	096/90 091/79 091/82 090/90 092/83		016/90	075/67 084/76 071/88 073/70 083/50			320/60	359/30
30	1015281	1006349		315/50 294/31										
31	1015368	1006334		300/31 316/30							110/78 105/78 113/78 108/74 110/69			
32	1015353	1006330		308/32	040/77 022/64	232/86								
33	1015333	1006384			054/70	258/90 025/84	099/60	165/82 136/65 158/83 180/55	004/66 004/86	080/85	102/83		310/63	

Punto de Control Estructural	Localización		Familia de Discontinuidades											
	X	Y	E	EB	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	
34	1015344	1006400	289/25											
35	1015343	1006414									100/84			
36	1015341	1006419								70/77				
37	1015330	1006410				240/85								
38	1015375	1006426	298/24											
39	1015397	1006429	302/22			039/86					134/60			
						040/90								
40	1015405	1006429	294/22											
41	1015402	1006439	315/25			220/83					120/76			
			306/25			220/90								
						220/80								
42	1015409	1006454	324/23		053/78									
					049/79									
43	1015401	1006400	300/23			212/83					121/90			
				297/29	035/75									
			301/25			035/90								
					020/73									
					027/80									
					036/80									
					035/72									
					032/80									
44	1015404	1006418	280/25		034/82	036/90					120/60			100/45
			310/25			222/87					130/60			
			302/27			192/85					110/65			
			299/27			040/90					125/88			
						215/82								
						219/80								
						227/90								
						200/86								
						216/88								
						220/90								

Dos elementos, permiten la clasificación del macizo rocoso y la deducción de sus parámetros. De otra parte, la caracterización geomecánica de los suelos se basó en los trabajos de exploración del subsuelo, en los que se describieron visualmente los horizontes encontrados consignando en cada caso: el tamaño de grano; la distribución granulométrica; el color; el contenido de humedad; la plasticidad para materiales finos; la consistencia o compacidad para suelos finos o granulares, respectivamente, y la presencia de raíces, fisuras y oxidaciones.

Adicionalmente, en cada uno de los sondeos se ejecutaron pruebas de SPT. Estos ensayos resultan útiles para obtener una primera aproximación de los parámetros de resistencia al corte previa corrección y normalización de los valores de campo. De manera complementaria, las muestras de suelo extraídas durante la exploración fueron llevadas al laboratorio, en donde se efectuaron según su tamaño de grano y tipo (alterado o inalterado), ensayos de clasificación (humedad, límites de Atterberg y peso unitario) y de resistencia (corte directo). Una vez consolidada, agrupada, organizada y sistematizada toda la información de campo y laboratorio, se revisaron y cotejaron las descripciones y las propiedades físicas y mecánicas de cada tipo de material encontrado para, posteriormente, obtener grupos con características similares y comportamiento geomecánico correlacionable. Cada uno de los grupos definido posee similitudes en su tamaño de grano, clasificación (según Sistema de clasificación de suelos SUCS) e índice de resistencia (adaptado de Terzaghi y Peck, 1948).

6.4.1 Suelos

En este numeral se relacionan las principales propiedades físicas y mecánicas de los paquetes de menor consolidación diagenética que yacen en las laderas del proyecto, y que fueron detectados en los sondeos y en los apiques. En resumen se tienen los siguientes tipos de materiales:

- ·Material 6: Depósito Coluvial (Qco)
- ·Material 7: Relleno producto de actividad minera (Qram)
- ·Material 8: Relleno antrópico (Qra)

Se aclara que las características establecidas para cada uno de los depósitos se obtuvieron de la matríz, al considerar que ésta es la que gobierna el comportamiento geomecánico para cada uno de ellos.

6.4.1.1 Material 6: Depósito Coluvial (Qco)

Depósito matriz soportado. Contiene raíces y esporádicamente fragmentos de roca –arenisca- subangulares, entre pocos centímetros hasta un metro de diámetro. La matríz es limo arcillosa, de color café y rojizo por meteorización, de baja humedad, de plasticidad media a baja, de consistencia semidura y clasifica como MH. Se identificó en las perforaciones 3 y 4, y en los apiques 20, 21 y 26, hacia la parte posterior del escarpe principal. En la **Tabla 26** se compilan algunos de sus parámetros geomecánicos. De ésta se establece que el valor del ángulo de fricción obtenido a partir del SPT está muy cercano a los definidos con los ensayos de corte.

Tabla 26. Parámetros geotécnicos para la matríz del material 6 (Qco)

Propiedad	Valor
Contenido de humedad, w (%)	39,3
Límite Líquido, LL (%)	72
Límite Líquido, LP (%)	33
Índice de Plasticidad, IP (%)	39
Índice de Liquidez, Il (%)	0,16
Peso unitario húmedo (ton/m^3)	1,6
Pasa tamiz No.200 (%)	97
Gravedad específica	2,59
Intercepto de cohesión, c (Ton/m^2). CD	1,2 – 2,8
Angulo de fricción, ϕ (^{o}). CD	25,87 – 28,47
Intercepto de cohesión, c (Ton/m^2). SPT	0,167
Angulo de fricción, ϕ (^{o}). SPT	24,7

6.4.1.2 Material 7: Relleno producto de actividad minera (Qram)

Arena gravo arcillosa, compacta, de color habano amarillento y de baja humedad. Su matriz clasifica como SC. Su contenido de finos corresponde al 25%. Encierran en su estructura fragmentos líticos y en menor proporción basuras, en un 30-50%. Aparece en el sondeos 1, trincheras 2 y 3, y apiques 2 a 14, 16 a 19 y 23. Obedece a la disposición de sobrantes, producto de la actividad minera que se desarrolló en el barrio. Tienen como principales propiedades mecánicas las señaladas en la **Tabla 27.**

6.4.1.3 Material 8: Relleno antrópico (Qra)

Depósito clasto-soportado, de compacidad media a suelta. Conformado por gravas, fragmentos de basura y escombros de construcción, embebidos en arcillas limosas, de color café oscuro de baja humedad y baja plasticidad. Clasifica como GC. Se evidenció en las perforaciones 2 a 5 y en los apiques 1, 11, 15 y 24, y se localiza hacia los extremos del barrio, sectores más bajo y más alto.

Tabla 27. Parámetros geotécnicos del material 7 (Qram)

Propiedad	Valor
Contenido de humedad, w (%)	10,8
Límite Líquido, LL (%)	31
Límite Líquido, LP (%)	15
Índice de Plasticidad, IP (%)	16
Índice de Liquidez, Il (%)	-0,26
Peso unitario húmedo (ton/m^3)	2.05
Pasa tamiz No.200 (%)	25,5
Gravedad específica	2,657
Intercepto de cohesión, c (Ton/m^2). CD (inundado residual)	1,0 – 1,6
Angulo de fricción, ϕ (^{o}). CD (inundado residual)	27,97-37,42

Tabla 28. Parámetros geotécnicos para la matriz del material 8 (Qra)

Propiedad	Valor
Contenido de humedad, w (%)	11,7
Límite Líquido, LL (%)	35
Límite Líquido, LP (%)	19
Índice de Plasticidad, IP (%)	16
Peso unitario húmedo (ton/m^3)	1,82
Índice de Liquidez, Il (%)	-0,46
Pasa tamiz No.200 (%)	62,2
Gravedad específica	2,577
Intercepto de cohesión, c (Ton/m^2). CD	0,9 – 7,9
Angulo de fricción, ϕ (^{o}). CD	13,14 -28,65

6.4.2 Macizo rocoso

Está integrado exclusivamente por unidades líticas del Grupo Guadalupe, principalmente por bancos de arenisca cuarzosa y paquetes de intercalaciones delgadas de arcillolitas y limolitas, cubiertas por llenos antrópicos, y depósitos coluviales. En este numeral se hace referencia a ambos ambientes geológicos. En las **Tabla 19** y **Tabla 20** se compilan los resúmenes de los resultados de campo mientras

en la **Tabla 23** los de laboratorio (clasificación y resistencia), de donde se extrajeron los valores de los parámetros para caracterización de los materiales 1 a 5.

El Grupo Guadalupe se manifiesta perimetralmente al área de estudio; sus expresiones más relevantes están constituidos por los escarpes rocosos de origen antrópico, tanto al norte, oriente y sur. Su mayor exposición, donde se aprecian los cinco niveles identificados, esta referida al cauce del río San Cristóbal, que atraviesa el barrio de oriente a occidente. Conjuga paquetes de espesores variables, se destaca el correspondiente al material 3 (Ksgl-al 3), que consta de solo 0.65 cm de altura y está constituido únicamente por arcillolitas limosas meteorizadas, que infrayacen y suprayacen los paquetes arenosos (materiales 2 y 4), condición que permite pensar que el nivel en cuestión corresponda a una superficie potencial de movilización.

6.4.2.1 Materiales rocoso

- Materiales 1, 3 y 5. Arcillolitas y limolitas de la Formación Labor (Ksgl-al 1, Ksgl-al 3y Ksgl-al 5)

Los tres horizontes se diferencian en su litología así: el primero consta de una intercalación de limolitas, arcillolitas y areniscas de grano fino a muy fino, dispuestas en capas delgadas, en donde predomina las limolitas. El segundo, como ya mencionó está conformado por la sucesión de arcillolitas limosas, de color blanco amarillento, muy meteorizadas, no plásticas, homogéneas en posición y de estratificación interna plano paralela; se separó de dos secuencias arenosas masivas, por ser un nivel guía, de clara continuidad en el escarpe rocoso y de composición arcillosa. El último, está compuesto por limolitas, cuarzoareniscas finas y arcillolitas limosas, de color gris claro y varicoloreadas, y con grado de meteorización medio; se encuentran dispuestas en capas delgadas a medias, con estratificación ondulada paralela y laminación plano paralela discontinua; en ocasiones las arcillolitas son masivas y presentan fractura concoidea. A pesar de las diferencias constitutivas, sus propiedades mecánicas parecen responder a un mismo universo. La **Tabla 29** condensa algunos de los más importantes.

El primer nivel (Ksgl-al 1) se apreció en la trinchera 2, sondeo 1 y en los apiques 2 y 13; mientras que las tres capas se identificaron en la columna 1 (1A-1B). El segundo paquete es el único que se define claramente en todo el escarpe rocoso, ya que el inferior aflora únicamente en la parte baja del cauce del río San Cristóbal y el superior se expone hacia la parte posterior del escarpe.

Tabla 29. Parámetros geotécnicos de los materiales 1, 3 y 5 obtenidos en laboratorio

Propiedad	Valor
Peso unitario Húmedo (ton/m^3)	2,327 -2,446
Peso Unitario Seco (ton/m^3)	2,331 – 2,375
Contenido de humedad, w (%)	3,0 – 4,8

6.4.2.2 Materiales 2 y 4. Arenisca de la Formación Labor (Ksgl-are1 y Ksgl–are2).

El nivel inferior (Ksgl-are 1), corresponde a cuarzoareniscas en bancos, de color negro a gris oscuro o gris claro, y blanco a amarillo claro. De grano fino a muy fino, bien seleccionadas, masivas, muy bien cementadas, de dureza alta, muy silíceas y con tonos de oxidación. Se encuentran en capas de 50cm, 80cm y 1m, con intercalaciones arcillosas muy delgadas. La capa superior (Ksgl-are 2), está constituida por cuarzoareniscas de grano fino, medio a grueso, angulares, muy silíceas, muy bien cementadas, bien seleccionadas, duras, macizas, de color gris claro y tonalidad pardo amarillentas por oxidación. Se separan por el nivel guía arcilloso Ksgl-al 2. La **Tabla 30** integra los más relevantes parámetros geomecánicos.

Tabla 30. Parámetros geotécnicos de los materiales 2 y 4 obtenidos en laboratorio

Propiedad	Valor
Peso unitario Húmedo (ton/m^3)	2,287 – 2,868
Peso Unitario Seco (ton/m^3)	2.847
Contenido de humedad, w (%)	0.7
RQD (%)	39 – 98
Carga puntual (Kg/cm²)	20,26

6.4.2.3 Discontinuidades

Descripción geométrica y física

Las discontinuidades fueron descritas a partir de la información obtenida de los afloramientos, y de las columnas estratigráficas (denominados aquí puntos de control estructural), para dar cumplimiento a este objetivo se tomó como base los procedimientos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM - 1981. Las mediciones en campo alcanzaron los 174 datos estructurales (orientación y buzamiento de estratificación y diaclasas) con una cobertura de 44 estaciones concentradas en los frentes expuestos y por fuera del límite del barrio. El inventario de los datos obtenidos se consigna en la **Tabla 25**.

La totalidad de las mediciones fue interpretada mediante sus polos y sus vectores directores, con la red de proyección equiangular (véase **Figura 13**) y una hoja de cálculo, según la ubicación de las estaciones, la tendencia de la información y el tipo de dato. De esta primera fase se determinó que para la estratificación se tenían dos

tendencias, una que predomina y abarca toda la parte central de ladera, denominada E; y otra que se concentra hacia los extremos norte y sur, en los cierres de la antigua cantera, denominad EB, conserva el rumbo pero incrementa en el buzamiento. En las **Figura 14** y **Figura 15** se aprecian las proyecciones equiangulares respectivas. El procesamiento de los datos estructurales se llevó a cabo gracias a la aplicación de los métodos de círculo flotante y vectorial. De allí fue posible apreciar la tendencia general de las familias de discontinuidad y concluir que fuera de la estratificación se aprecian nueve familias bien definidas y dos datos puntuales o aislados que se asignaron como familias D10 y D11. También se apreció que la familia D2 presenta una desviación en el buzamiento, por lo que se subdividió en D2A y D2B, sin embargo se definió un valor promedio denominado D2P.

En las **Tabla 31 y Tabla 32** se aprecia la obtención de los valores representativos de cada familia por el método vectorial y en la **Tabla 33** se resumen los datos estructurales definidos para cada una. En las **Figura 16** y **Figura 17** se muestran las redes estereográficas representativas para los planos principales: la estratificación y las diaclasas. Las características de las discontinuidades asociadas con ellos, se compilan en el **ANEXO II-C**.

En general, los planos (indistinto del tipo de familia), son secos y eventualmente húmedos o con inflitración; discontinuos a poco continuos y ocasionalmente de continuidad media; de muy separados a muy juntos; ligeramente abiertos a abiertos; y con rellenos de arcilla, arena y roca triturada, en algunas ocasiones no existe. Las paredes están oxidadas como reflejo del grado de meteorización del macizo. La rugosidad de las paredes de las discontinuidades en términos descriptivos puede clasificarse planar rugosa a nivel micro y planar a nivel macro.

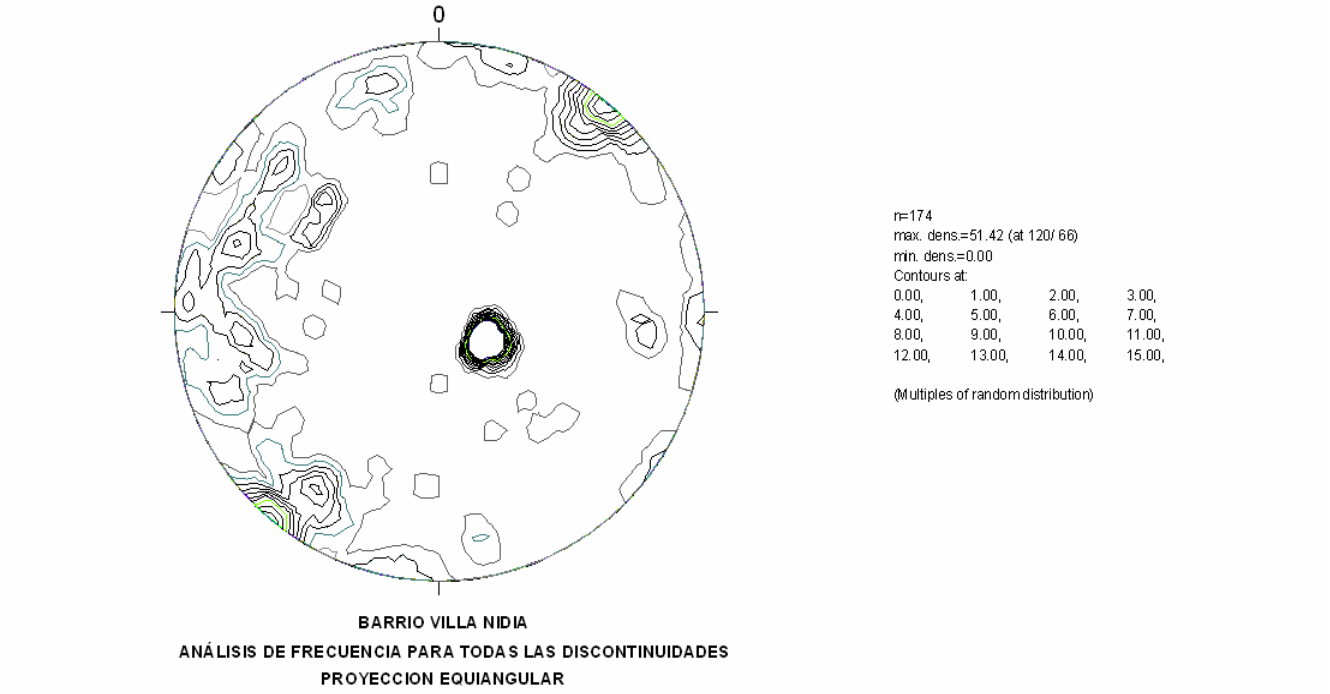


Figura 13. Análisis de frecuencias para todas las discontinuidades

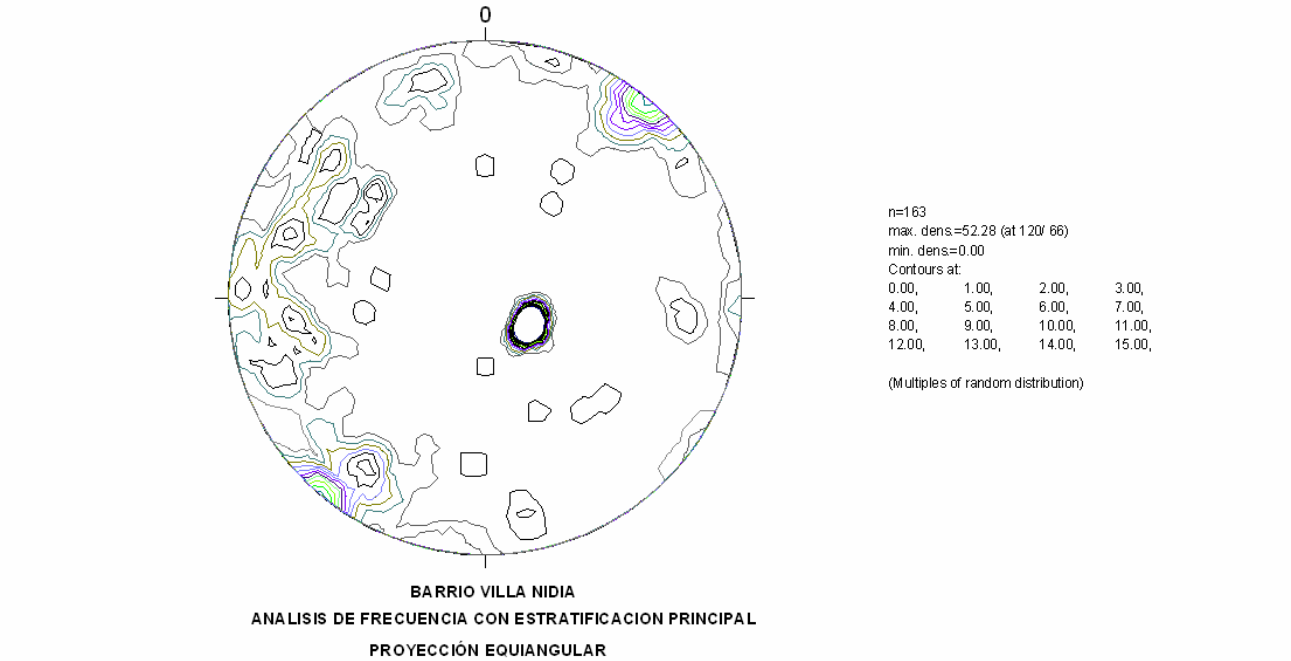


Figura 14. Análisis de frecuencias para discontinuidades con estratificación principal

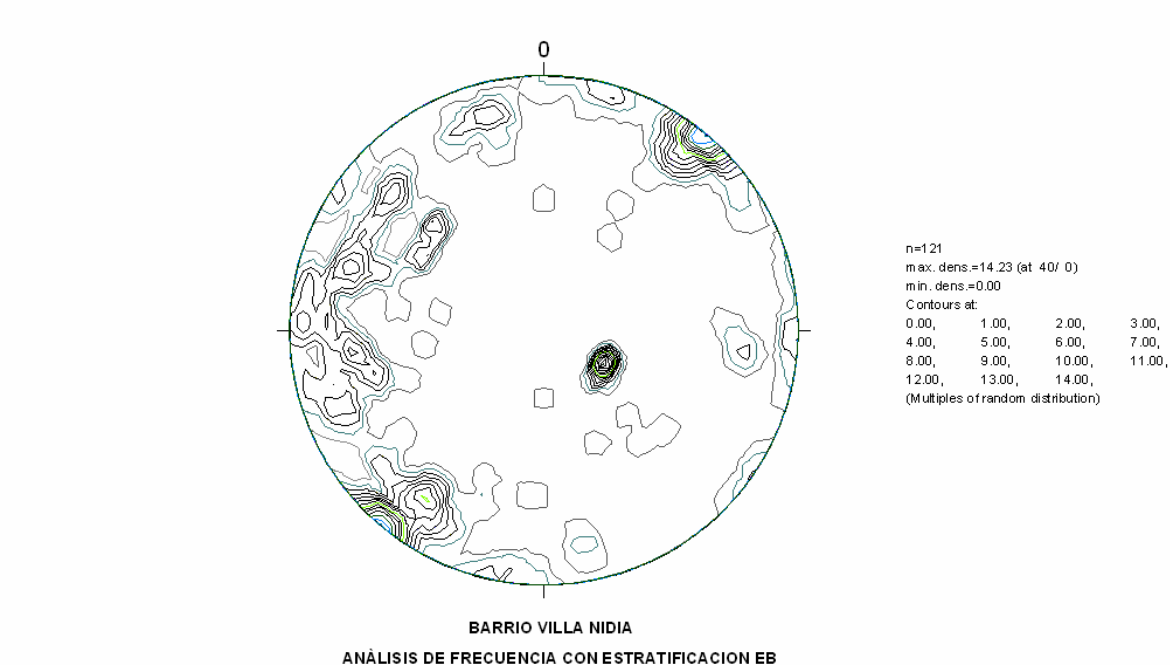


Figura 15.Análisis de frecuencias para discontinuidades con estratificación EB

Tabla 31. Obtención de familias de estratificación por el método vectorial

ESTRATIFICACIÓN	PUNTO	α	β	N	E	Z	|R|	n	e	z	B'	a'
		299	23	0.4462696	-0.8050917	0.3907311						
		302	20	0.4979612	-0.7969045	0.3420201						
		298	20	0.4411590	-0.8296993	0.3420201						
		300	21	0.4667902	-0.8085044	0.3583679						
		309	26	0.5656294	-0.6984942	0.4383711						
		294	24	0.3715724	-0.8345653	0.4067366						
		307	22	0.5579932	-0.7404820	0.3746066						
		297	24	0.4147410	-0.8139750	0.4067366						
		309	24	0.5749128	-0.7099582	0.4067366						
		299	22	0.4495077	-0.8109333	0.3746066						
		311	24	0.5993397	-0.6894615	0.4067366						
		311	21	0.6124839	-0.7045821	0.3583679						
		304	23	0.5147398	-0.7631331	0.3907311						
		305	24	0.5239881	-0.7483326	0.4067366						
		302	26	0.4762883	-0.7622206	0.4383711						
		306	20	0.5523375	-0.7602273	0.3420201						
		309	20	0.5913677	-0.7302783	0.3420201						
		311	24	0.5993397	-0.6894615	0.4067366						
		308	25	0.5579788	-0.7141803	0.4226183						
		302	22	0.4913326	-0.7862965	0.3746066						
		295	22	0.3918448	-0.8403139	0.3746066						
		289	24	0.2974213	-0.8637742	0.4067366						
		305	26	0.5155271	-0.7362490	0.4383711						
		305	25	0.5198368	-0.7424039	0.4226183						
		324	25	0.7332184	-0.5327144	0.4226183						
		293	22	0.3622796	-0.8534772	0.3746066						
		306	20	0.5523375	-0.7602273	0.3420201						
E		287	18	0.2780620	-0.9094999	0.3090170	53.423	0.50872	-0.76903	0.38704	22.7703	303.4847
		305	26	0.5155271	-0.7362490	0.4383711						
		304	22	0.5184746	-0.7686703	0.3746066						
		289	25	0.2950650	-0.8569308	0.4226183						
		298	24	0.4288836	-0.8066128	0.4067366						
		302	22	0.4913326	-0.7862965	0.3746066						
		286	25	0.2498123	-0.8711990	0.4226183						
		289	18	0.3096337	-0.8992416	0.3090170						
		294	22	0.3771196	-0.8470246	0.3746066						
		306	25	0.5327144	-0.7332184	0.4226183						
		315	25	0.6408564	-0.6408564	0.4226183						
		324	23	0.7447041	-0.5410592	0.3907311						
		301	25	0.4667830	-0.7768574	0.4226183						
		300	23	0.4602524	-0.7971806	0.3907311						
		299	27	0.4319685	-0.7792919	0.4539905						
		302	27	0.4721615	-0.7556164	0.4539905						
		310	25	0.5825634	-0.6942720	0.4226183						
		280	25	0.1573787	-0.8925389	0.4226183						
		298	21	0.4382895	-0.8243026	0.3583679						
		288	21	0.2884922	-0.8878877	0.3583679						
		299	20	0.4555720	-0.8218737	0.3420201						
		301	26	0.4629132	-0.7704169	0.4383711						
		290	22	0.3171156	-0.8712678	0.3746066						
		296	21	0.4092547	-0.8390965	0.3583679						
		304	20	0.5254694	-0.7790405	0.3420201						
		314	21	0.6485195	-0.6715616	0.3583679						
				1.0000000	0.0000000	0.0000000						
				1.0000000	0.0000000	0.0000000						
			Σ	27.1771170	-41.0840043	20.6766790						
		294	34	0.3372000	-0.7573635	0.5591929						
		301	30	0.4460361	-0.7423287	0.5000000						
		300	28	0.4414738	-0.7646550	0.4694716						
		310	36	0.5200261	-0.6197430	0.5877853						
		296	28	0.3870587	-0.7935880	0.4694716						
		297	31	0.3891458	-0.7637417	0.5150381						
EB		294	31	0.3486414	-0.7830613	0.5150381	11.8699	0.4461	-0.7136	0.5402	32.6953	302.0092
		315	50	0.4545195	-0.4545195	0.7660444						
		316	30	0.6229665	-0.6015918	0.5000000						
		300	31	0.4285837	-0.7423287	0.5150381						
		308	32	0.5221105	-0.6682710	0.5299193						
		297	29	0.3970690	-0.7792919	0.4848096						
			Σ	5.2948311	-8.4704840	6.4118088						

Tabla 32. Obtención de familias de diaclasas por el método vectorial

		42	82	0.1034258	0.0931250	0.9902681						
		34	76	0.2005623	0.1352810	0.9702957						
		22	64	0.4064506	0.1642167	0.8987940						
		40	77	0.1723225	0.1445958	0.9743701						
		54	70	0.2010344	0.2767001	0.9396926						
		49	79	0.1251820	0.1440054	0.9816272						
		53	78	0.1251244	0.1660457	0.9781476						
1		32	80	0.1472620	0.0920195	0.9848078	13.9346	0.1889	0.1364	0.9725	76.5284	35.8325
		35	72	0.2531319	0.1772449	0.9510565						
		36	80	0.1404843	0.1020678	0.9848078						
		27	80	0.1547217	0.0788346	0.9848078						
		20	73	0.2747395	0.0999970	0.9563048						
		35	75	0.2120121	0.1484525	0.9659258						
		34	82	0.1153797	0.0778246	0.9902681						
			Σ	2.6318333	1.9004106	13.5511737						
		44	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		284	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		268	71	-0.0113622	-0.3253698	0.9455186						
		277	79	0.0232538	-0.1893867	0.9816272						
		270	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		276	75	0.0270540	-0.2574012	0.9659258						
		232	86	-0.0429464	-0.0549689	0.9975641						
		258	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		25	84	0.0947350	0.0441756	0.9945219						
		240	85	-0.0435779	-0.0754791	0.9961947						
		40	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		39	86	0.0542110	0.0438992	0.9975641						
		220	80	-0.1330222	-0.1116189	0.9848078						
2P		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000	26.8589	-0.0259	-0.0505	0.9984	86.7482	242.8496
		220	83	-0.0933573	-0.0783361	0.9925462						
		35	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		212	83	-0.1033511	-0.0645809	0.9925462						
		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		216	88	-0.0282343	-0.0205134	0.9993908						
		200	86	-0.0655496	-0.0238581	0.9975641						
		227	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		219	80	-0.1349500	-0.1092803	0.9848078						
		215	82	-0.1140039	-0.0798264	0.9902681						
		40	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		192	85	-0.0852512	-0.0181207	0.9961947						
		222	87	-0.0388932	-0.0350196	0.9986295						
		36	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
			Σ	-0.6952456	-1.3556854	26.8156713						
		192	85	-0.0852512	-0.0181207	0.9961947						
		200	86	-0.0655496	-0.0238581	0.9975641						
		205	84	-0.0947350	-0.0441756	0.9945219						
		212	83	-0.1033511	-0.0645809	0.9925462						
		215	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		215	82	-0.1140039	-0.0798264	0.9902681						
		216	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		216	88	-0.0282343	-0.0205134	0.9993908						
		219	86	-0.0542110	-0.0438992	0.9975641						
		219	80	-0.1349500	-0.1092803	0.9848078						
		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
2A		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000	21.9611	-0.0490	-0.0380	0.9981	86.4448	217.8262
		220	80	-0.1330222	-0.1116189	0.9848078						
		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		220	83	-0.0933573	-0.0783361	0.9925462						
		220	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		222	87	-0.0388932	-0.0350196	0.9986295						
		224	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		227	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		232	86	-0.0429464	-0.0549689	0.9975641						
		240	85	-0.0435779	-0.0754791	0.9961947						
		240	85	-0.0435779	-0.0754791	0.9961947						
			Σ	-1.0756609	-0.8351563	21.9187944						
		258	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		268	71	-0.0113622	-0.3253698	0.9455186						
		270	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
2B		276	75	0.0270540	-0.2574012	0.9659258	5.9436	0.0066	-0.1299	0.9915	82.5258	272.8874
		277	79	0.0232538	-0.1893867	0.9816272						
		284	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
			Σ	0.0389456	-0.7721578	5.8930716						

FAMILIA	PUNTO	α	β	N	E	Z	|R|	n	e	z	β'	α'
		92	83	-0.0042532	0.1217951	0.9925462						
		90	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		91	82	-0.0024289	0.1391519	0.9902681						
3		91	79	-0.0033301	0.1907799	0.9816272	5.9073	-0.0149	0.1601	0.9870	80.7488	95.3307
		96	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		99	60	-0.0782172	0.4938442	0.8660254						
			Σ	-0.0882294	0.9455711	5.8304668						
		165	71	-0.3144747	0.0842632	0.9455186						
		180	88	-0.0348995	0.0000000	0.9993908						
		154	78	-0.1868698	0.0911425	0.9781476						
		168	84	-0.1022443	0.0217327	0.9945219						
4		168	79	-0.1866394	0.0396714	0.9816272	8.8468	-0.2204	0.0692	0.9729	76.6420	162.5753
		180	55	-0.5735764	0.0000000	0.8191520						
		158	83	-0.1129953	0.0456531	0.9925462						
		136	65	-0.3040061	0.2935753	0.9063078						
		165	82	-0.1344309	0.0360206	0.9902681						
			Σ	-1.9501364	0.6120589	8.6074801						
		10	88	0.0343693	0.0060602	0.9993908						
		16	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
5		4	86	0.0695866	0.0048660	0.9975641	3.9438	0.1292	0.0100	0.9916	82.5520	4.4089
		4	66	0.4057459	0.0283725	0.9135455						
			Σ	0.5097017	0.0392987	3.9105003						
		85	73	0.0254819	0.2912591	0.9563048						
		65	82	0.0588171	0.1261337	0.9902681						
		68	80	0.0650498	0.1610038	0.9848078						
		70	59	0.1761534	0.4839775	0.8571673						
		84	72	0.0323011	0.3073242	0.9510565						
		78	70	0.0711100	0.3345462	0.9396926						
		74	82	0.0383613	0.1337818	0.9902681						
6		81	78	0.0325246	0.2053520	0.9781476	14.7825	0.0614	0.2677	0.9616	74.0609	77.0755
		83	50	0.0783361	0.6379964	0.7660444						
		73	70	0.0999970	0.3270755	0.9396926						
		71	88	0.0113622	0.0329981	0.9993908						
		84	76	0.0252877	0.2405966	0.9702957						
		75	67	0.1011287	0.3774173	0.9205049						
		80	85	0.0151344	0.0858317	0.9961947						
		70	77	0.0769378	0.2113848	0.9743701						
			Σ	0.9079829	3.9566785	14.2142059						
		138	81	-0.1162535	0.1046751	0.9876883						
		105	76	-0.0626140	0.2336786	0.9702957						
		122	56	-0.2963271	0.4742225	0.8290376						
		135	59	-0.3641869	0.3641869	0.8571673						
		132	78	-0.1391201	0.1545085	0.9781476						
		131	76	-0.1587150	0.1825808	0.9702957						
		132	76	-0.1618773	0.1797830	0.9702957						
		122	78	-0.1101764	0.1763191	0.9781476						
		110	69	-0.1225691	0.3367557	0.9335804						
		108	74	-0.0851766	0.2621467	0.9612617						
		113	78	-0.0812376	0.1913837	0.9781476						
7		105	78	-0.0538115	0.2008273	0.9781476	21.6630	-0.1418	0.2349	0.9616	74.0740	121.1059
		110	78	-0.0711100	0.1953731	0.9781476						
		102	83	-0.0253381	0.1192062	0.9925462						
		100	84	-0.0181512	0.1029404	0.9945219						
		134	60	-0.3473292	0.3596699	0.8660254						
		120	76	-0.1209609	0.2095105	0.9702957						
		121	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		125	88	-0.0200175	0.0285880	0.9993908						
		110	65	-0.1445440	0.3971313	0.9063078						
		130	60	-0.3213938	0.3830222	0.8660254						
		120	60	-0.2500000	0.4330127	0.8660254						
			Σ	-3.0709097	5.0895222	20.8314991						
		214	71	-0.2699082	-0.1820554	0.9455186						
8		215	48	-0.5481197	-0.3837975	0.7431448	2.9596	-0.4240	-0.2834	0.8602	59.3378	213.7610
		212	59	-0.4367771	-0.2729286	0.8571673						
			Σ	-1.2548050	-0.8387815	2.5458307						
		312	90	0.0000000	0.0000000	1.0000000						
		335	52	0.5579788	-0.2601898	0.7880108						
		349	84	0.1026080	-0.0199450	0.9945219						
9		350	78	0.2047530	-0.0361035	0.9781476	5.8128	0.2650	-0.1695	0.9492	71.6660	327.3889
		320	60	0.3830222	-0.3213938	0.8660254						
		310	63	0.2918195	-0.3477769	0.8910065						
			Σ	1.5401815	-0.9854089	5.5177122						

Tabla 33. Resumen de familias de discontinuidades

Familia	Azimut de buzamiento (°)	Buzamiento (°)
E	303	23
EB	302	33
D1	36	76
D2P	218	86
D2A	273	83
D2B	243	87
D3	95	81
D4	163	77
D5	4	83
D6	77	74
D7	121	74
D8	214	59
D9	327	72
D10	100	45
D11	359	30

Figura 16. Red estereográfica para planos principales de discontinuidades con E

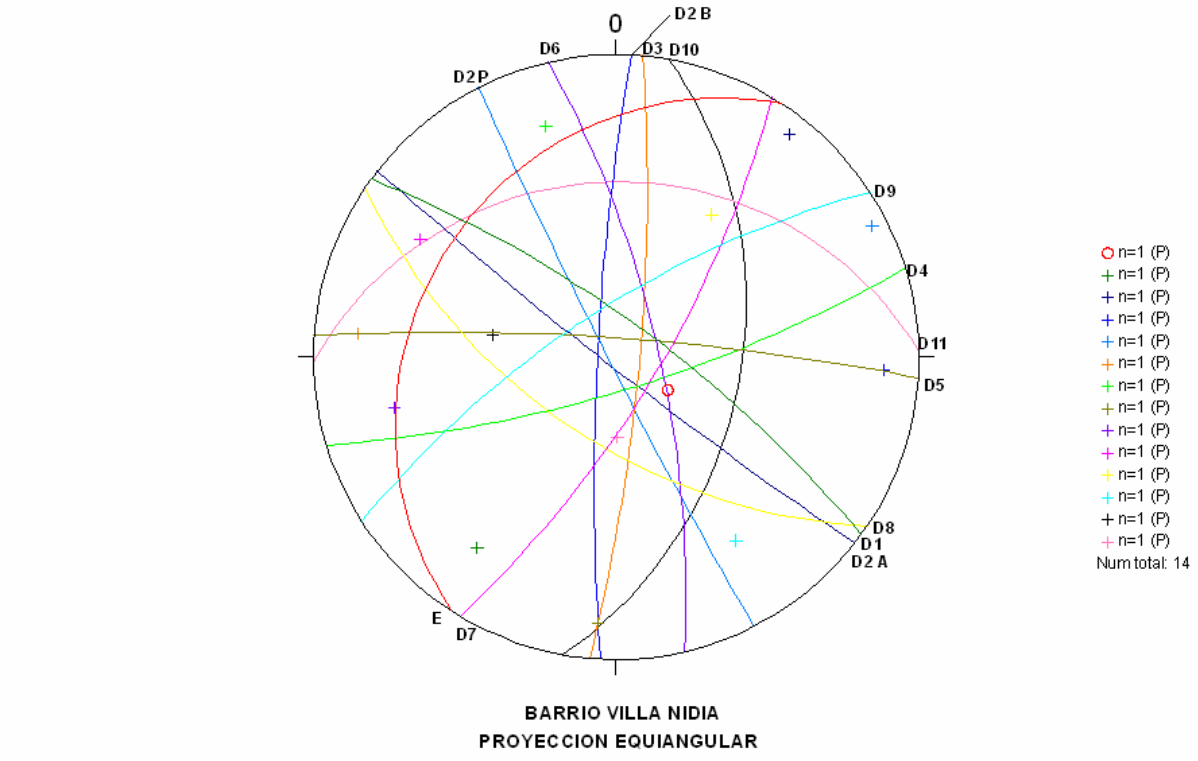
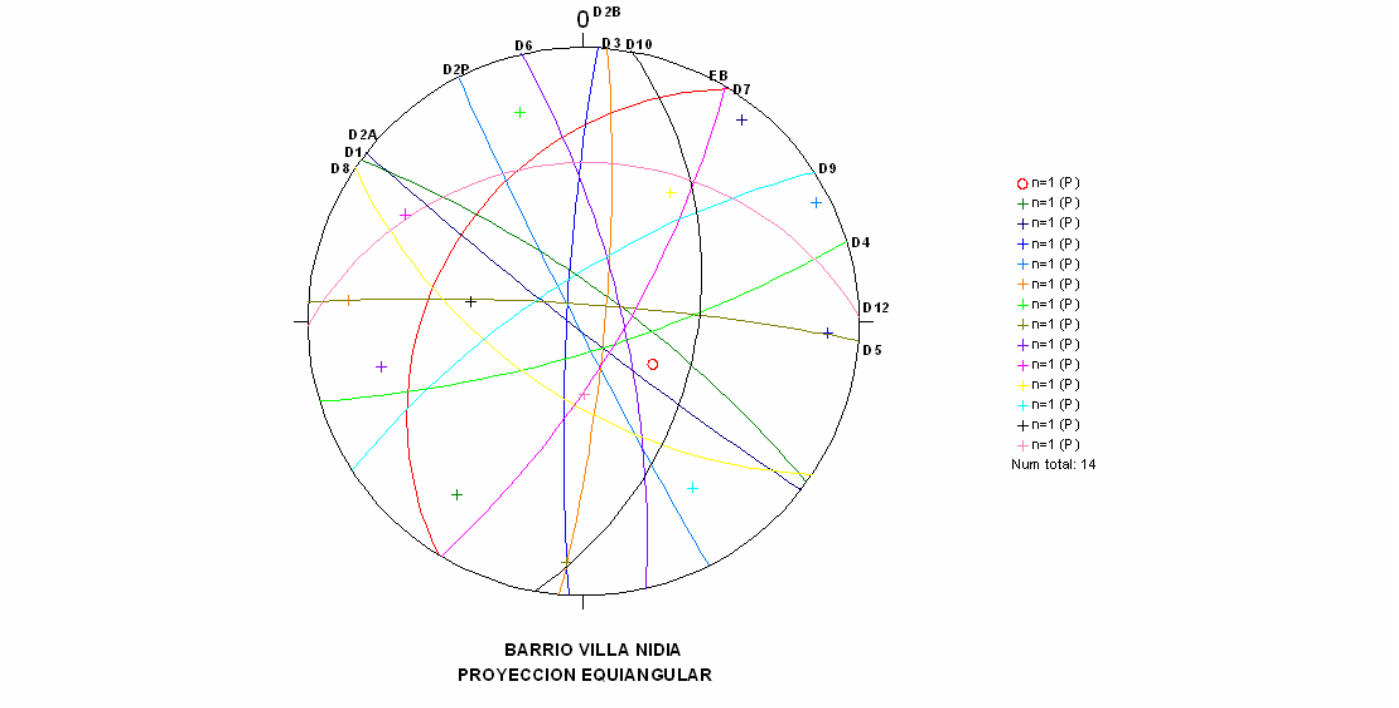


Figura 17. Red estereográfica para planos principales de discontinuidades con EB



Características Geomecánicas

Los parámetros efectivos de resistencia c' y ϕ', máximos (pico) y mínimos (residual), para el conjunto de discontinuidades fueron deducidos de cinco ensayos de corte directo a lo largo de planos de diaclasas. La premisa anterior trae consigo suponer y asumir, bien que la resistencia movilizada de la superficie ensayada para cada material es equivalente a las demás del mismo material, indistinto de su origen.

La pruebas de laboratorio se ejecutaron en condiciones inundadas y bajo confinamientos de 0.5 Kg/cm², 1.0 Kg/cm² y 2.0 Kg/cm². La **Tabla 34** contiene los coeficientes arrojados por el corte directo, y los valores de resistencia básicos, es decir, sin considerar la dilatancia; por su parte, la **Figura 18** ilustra la curva de dilatancia para la limolita.

6.4.2.4 Macizo rocoso

Clasificación del macizo rocoso

La clasificación del macizo rocoso se llevó a cabo mediante el Sistema RMR (Rock Mass Rating), el cual fue formulado por Bieniawski en 1976 y fue actualizado por éste en 1989 basado en todos los casos registrados en los que se había utilizado, y que permitieron obtener nuevas valoraciones para los parámetros empleados en la clasificación. No obstante, dada la directa correlación entre el Rock Mass Rating "RMR"

y el GSI (GSI=RMR_{89}-5), se planteó el segundo como sistema corroborador del primero. La **Tabla 35** contiene discriminados los parámetros de calificación y el resultado de los índices RMR_{89}, RMR_{85} corregido, y GSI. Se aclara que para los cálculos correspondientes con ambos métodos se utilizaron las condiciones más críticas como las favorables, con el fin de tener un intervalo del estado del macizo.

Así, el ejercicio de clasificación arrojó que el macizo posee índices RMR_{89} y GSI que oscilan entre 29 y 85, para el primero, y 35 – 80 para el segundo. Estos permiten clasificar el macizo entre IV y I, es decir, entre pobre y muy bueno tanto para Bieniawski como para el sistema GSI.

Tabla 34. Características geomecánicas de discontinuidades

Propiedad	Valor limolitas	Valor areniscas	Valor relleno arcilloso
Bloque deslizante, ϕ (°)	48 – 55	------	-------
Intercepto de cohesión, c (Ton/m^2). CD	0.04(R) - 0.05(P)	0.22(P)	0.01(R) – 0.03(P)
Angulo de fricción, ϕ (°). CD	28.7(R) – 30.8(P)	19.5(P)	7.4(R) – 7.8 (P)
Dilatancia ϕ (°).	6°	------	------
Angulo básico	25°	------	------

Figura 18.Dilatancia en discontinuidades de limolita

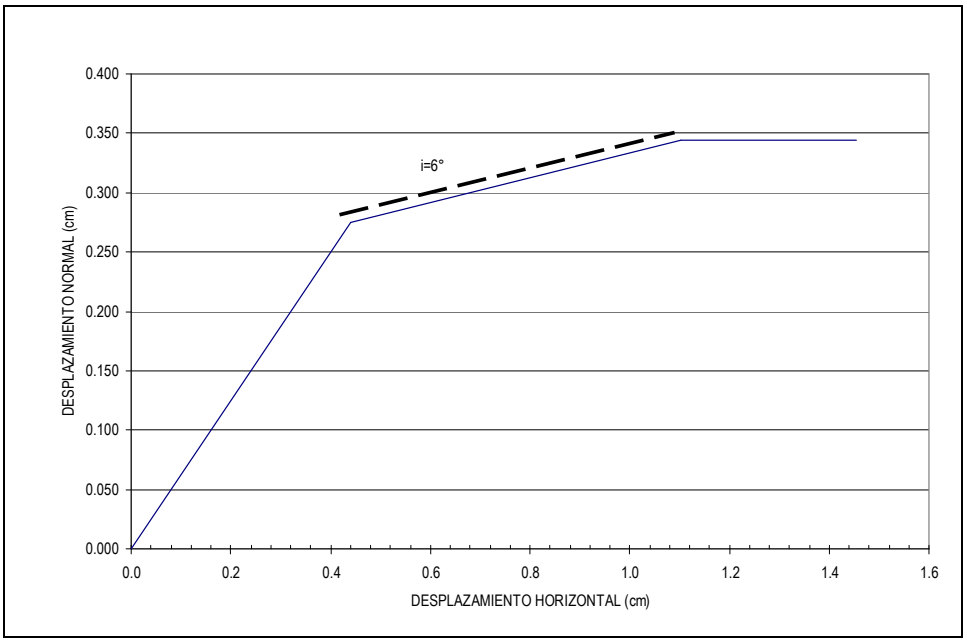


Tabla 35. Clasificación del macizo por los sistemas RMR 89 y GSI

SISTEMA RMR 89			
CRITERIO DE EVALUACION		**CALIFICACION**	
σ'_c (Kg/cm^2)	Valor	213,0	486,0
	Calificación/15	2	4
RQD (%)	Valor	39	98
	Calificación/20	8	20
S (m)	Valor	0,05	3
	Calificación/20	5	20
Estado de las discontinuidades	Persistencia (m)	10	0,4
	Calificación/6	2	6
	Abertura (mm)	100	Ninguna
	Calificación/6	0	6
	Rugosidad	Rugosa	Rugosa
	Calificación/6	5	5
	Relleno	Blando < 5mm	Ninguno
	Calificación/6	2	6
	Alteración paredes	Altamente meteorizadas	Moderadamente meteorizadas
	Calificación/6	1	3
Agua	Descripción	Goteo	Completamente seco
	Calificación/10	4	15
RMR_{89}	Calificación/100	31	93
	Descripción	Macizo pobre	Macizo muy bueno
SISTEMA GSI			
CRITERIO DE EVALUACION		**CALIFICACION**	
$RMR_{CORREGIO}$		40	85
GSI		35	80
TIPO DE TERRENO		Macizo pobre	Macizo muy bueno

Características geomecánicas del macizo rocoso

Al considerar que el macizo rocoso se encuentra altamente diaclasado y fracturado, se acudió al método de Hoek – Brown para determinar sus parámetros de resistencia (cohesión y ángulo de fricción). El método trata la masa como un material isotrópico, homogéneo y elástico (Salcedo, 1996); se basa en el criterio de falla de Morh-Coulomb y tiene como variable de ingreso, el GSI, la resistencia a la compresión inconfinada, y una constante m_i, que depende de las propiedades de la roca.

La **Tabla 36** contiene las memorias de cálculo de los valores de compresión inconfinada, cohesión y ángulo de fricción del macizo rocoso obtenidos de la aplicación del procedimiento referido, parámetros que se resumen en la **Tabla 37**. Las **Figura 19 y Figura 20** ilustran las envolventes de resistencia para las condiciones extremas del macizo, con base e los resultados de la clasificación realizada por el sistema SGI.

Tabla 36. Determinación de los parámetros del macizo rocoso a partir del método de Hoek – Brown

GSI:	35		**σ_c (kg/cm²):**	319	**mi:**	4
σ_3	**σ_1**	**$\delta\sigma1/\delta\sigma_3$**	**σ_n**	**τ**	**$\sigma_n.\tau$**	**σ_n^2**
0,21	7,32	6,88	1,11	2,37	2,63	1,23
0,42	8,66	6,07	1,58	2,87	4,54	2,50
0,83	10,97	5,13	2,49	3,75	9,31	6,18
1,66	14,79	4,19	4,20	5,18	21,72	17,60
3,33	20,97	3,37	7,37	7,41	54,62	54,27
6,66	30,94	2,72	13,18	10,76	141,88	173,74
13,31	47,17	2,23	23,78	15,65	372,03	565,41
SUMATORIA			53,70	47,98	606,73	820,94
mb/mi:	0,10		**Mb:**	0.39	**s:**	0.001
a:	0,5		**E (kg/cm²):**	4217	**ϕ:**	32
C (kg/cm²):	1,85		**σ_{cm} (kg/cm²):**	6,63		
GSI:	85		**σ_c (kg/cm²):**	486	**mi:**	19
σ_3	**σ_1**	**$\delta\sigma1/\delta\sigma_3$**	**σ_n**	**τ**	**$\sigma_n.\tau$**	**σ_n^2**
0,47	217,68	13,44	15,52	55,14	855,58	240,74
0,95	223,98	13,12	16,75	57,22	958,41	280,54
1,90	236,14	12,54	19,20	61,27	1176,74	368,82
3,80	259,00	11,59	24,07	69,01	1661,25	579,41
7,59	300,25	10,23	33,65	83,34	2804,30	1132,16
15,19	371,12	8,59	52,30	108,77	5688,32	2734,90
30,38	487,28	6,91	88,11	151,81	13375,92	7763,34
SUMATORIA			249,59	586,58	26520,52	13099,90
mb/mi:	0,59		**Mb:**	11,12	**s:**	0,189
a:	0,5		**E (kg/cm²):**	74989	**ϕ:**	57
C (kg/cm²):	25,05		**σ_{cm} (kg/cm²):**	169,82		

Figura 19. Envolvente de resistencia del macizo rocoso para el caso más desfavorable

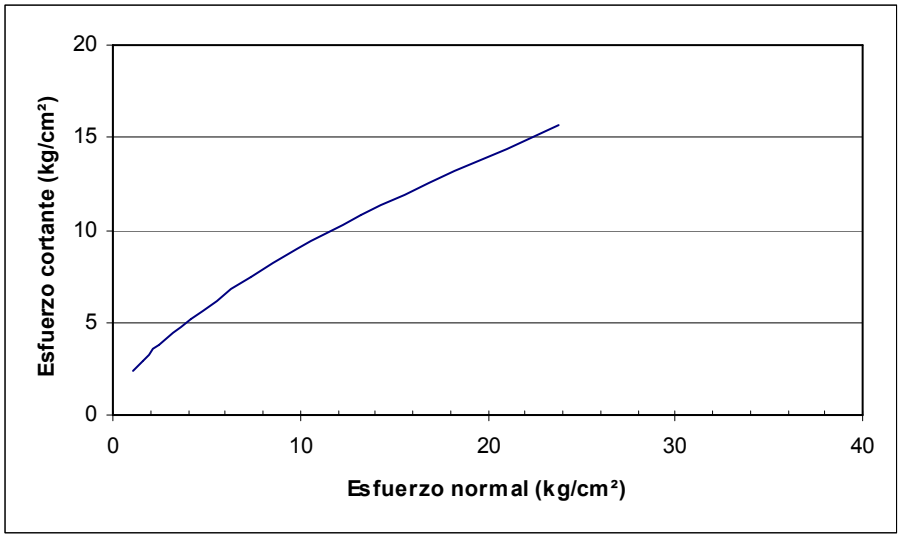


Figura 20. Envolvente de resistencia del macizo rocoso para el caso más favorable

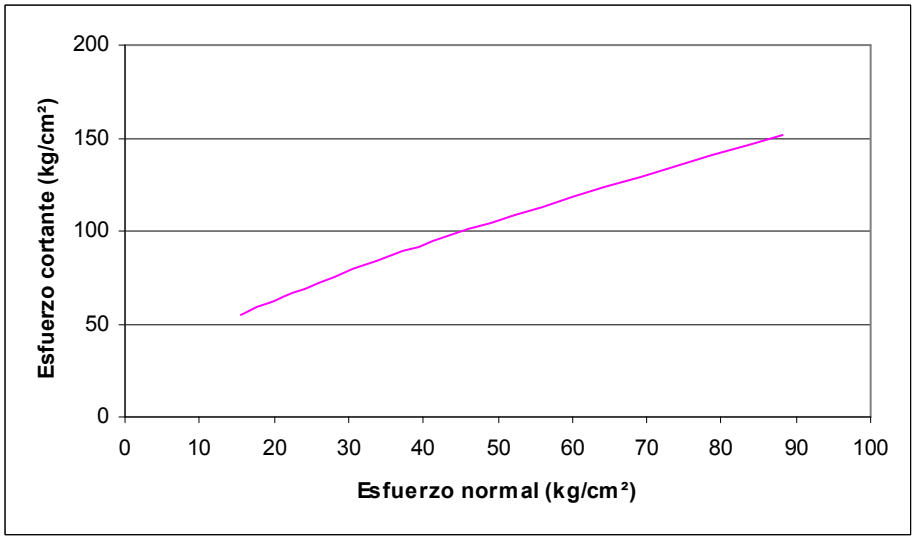


Tabla 37. Parámetros de resistencia del macizo rocoso y de la roca intacta

VALORES DE RESISTENCIA	σ_c (kg/cm²)	C (kg/cm²)	ϕ (°)
Macizo rocoso	6,63 – 169,82	1,85 – 25,02	32 – 57
Roca Intacta		63,68 – 65,98	27 - 28

Características geomecánicas de la roca intacta

De manera similar al macizo, para la roca intacta se determinaron los parámetros de resistencia a partir del empleo del método de Hoek-Brown (Véase **Tabla 38**). Los resultados se sintetizan en la **Tabla 37**.

Tabla 38. Determinación de los parámetros de la roca intacta a partir del método de Hoek – Brown

GSI: 35			**σ_c (kg/cm²):** 213		**mi:** 4	
σ_3	**σ_1**	**$\delta\sigma1/\delta\sigma_3$**	**σ_n**	**τ**	**$\sigma_n.\tau$**	**σ_n^2**
0.21	213.62	3.00	53.61	92.44	4956.16	2874.45
0.42	214.25	2.99	53.98	92.65	5001.09	2913.58
0.83	215.49	2.98	54.70	93.07	5091.30	2992.58
1.66	217.97	2.97	56.16	93.90	5273.06	3153.46
3.33	222.88	2.94	59.05	95.55	5641.86	3486.76
6.66	232.58	2.89	64.80	98.77	6400.05	4198.91
13.31	251.45	2.79	76.17	104.96	7994.63	5801.20
26.63	287.50	2.63	98.43	116.52	11468.78	9688.66
SUMATORIA			516.90	787.86	51826.94	35109.60
C (kg/cm²): 63.68					**ϕ:** 28	

GSI: 85			**σ_c (kg/cm²):** 486		**mi:** 19	
σ_3	**σ_1**	**$\delta\sigma1/\delta\sigma_3$**	**σ_n**	**τ**	**$\sigma_n.\tau$**	**σ_n^2**
0.47	214.42	2.99	54.08	92.71	5013.77	2924.65
0.95	215.84	2.98	54.91	93.19	5116.79	3015.00
1.90	218.66	2.97	56.56	94.13	5324.58	3199.48
3.80	224.26	2.93	59.86	96.00	5747.00	3583.41
7.59	235.28	2.87	66.41	99.66	6618.45	4410.35
15.19	256.66	2.76	79.34	106.65	8461.71	6294.44
30.38	297.30	2.60	104.60	119.60	12510.37	10941.98
60.75	372.40	2.37	153.31	142.41	21833.00	23505.16
SUMATORIA			629.08	844.35	70625.68	57874.46
C (kg/cm²): 65.98					**ϕ:** 27	

6.5 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Previo a los análisis de estabilidad y con el fin de facilitar la labor de asignación de la probabilidad de falla, se establecieron zonas de comportamiento geotécnico similar tanto en conformación como en la dinámica de las laderas, lo cual se logró una vez sintetizada la información geológica, geomorfológica, y geotécnica. Los criterios de zonificación corresponden a la forma, la génesis, la litología, la pendiente, a la condición estructural y a las condiciones de drenaje.

Las cuatro primeras variables están contempladas en las unidades geomorfológicas, que condensan unidades de ladera con morfología, morfogenética, materiales y morfometría similares. La quinta variable (condición estructural) permite que se identifique tres sectores, si se considera las desviaciones del buzamiento de la estratificación, los extremos norte y sur se manejan con valores elevados de

inclinación de la capa, mientras que el costado oriental engloba la estratificación típica del área de estudio. El último tópico considerado conlleva a identificar los sectores donde los materiales se encuentran saturados y se convierten en potenciales masas a movilizarse. La codificación de las zonas conservó la nomenclatura de la unidad geomorfológica original añadiendo un identificador en número arábigo ascendente para cada subdivisión.

La conjunción de los elementos anteriores dio como resultado la división del sector en estudio en doce (12) zonas homogéneas. La sinopsis del trabajo de zonificación se encuentra en la **Tabla 39** y en el plano **GE 147-PL1-09.**

Tabla 39. Zonificación geotécnica.

ZONA	DESCRIPCIÓN
Lea-1	Ladera estructural agradacional con pendiente abrupta. Superficialmente se aprecian los depósitos de origen antrópico, producto de la construcción, que cubren los materiales líticos de la unidad Ksgl-al3. Estructuralmente se caracteriza por que está controlada por la discontinuidad denominadas D8, que cinemáticamente tiene probabilidad de falla planar.
Lea-2	Ladera estructural agradacional con pendiente abrupta, que involucra los sectores donde se han realizado excavaciones y rellenos para la conformación de viviendas. Está compuesta por todos los niveles líticos encontrados, excepto el denominado Ksgl-al1. No evidencia ningún tipo de falla planar, ni traslacional.
Lea-3	Ladera estructural agradacional con pendientes inclinadas, que expone todo el sector frontal del sitio, constituye los sectores donde se han realizado excavaciones y rellenos para la conformación de viviendas. Contiene uno de los depósitos gravitacionales de la zona, que suprayacen los niveles líticos involucrados (ksgl-are1, Ksgl-al2, ksgl-are2, Ksgl-al3), e infrayacen los rellenos antrópicos. Potencialmente se puede dar la disponibilidad cinemática para que se genere falla planar, aunque el ángulo de fricción supera el valor del buzamiento de la estratificación. También está en posición de presentar deslizamientos traslacionales en el contacto depósito - roca. Se caracteriza por la gran cantidad de agua que recibe superficialmente y que proviene de un nacedero, la que se infiltra y aflora en el escarpe.
Lea-4	Ladera estructural agradacional con pendientes inclinadas, que expone todo el sector suroriental del sitio, constituye los sectores donde se han realizado excavaciones y rellenos para la conformación de viviendas. Contiene uno de los depósitos gravitacionales de la zona, que suprayacen los niveles líticos involucrados (ksgl-are1, Ksgl-al2, ksgl-are2, Ksgl-al3), e infrayacen los rellenos antrópicos. Cinemáticamente no esta sujeto a ningún tipo de falla. Aunque está en posición de presentar deslizamientos traslacionales en el contacto depósito - roca. Se caracteriza por la gran cantidad de agua que recibe supercialmente y que proviene de un nacedero, la que se infiltra y aflora en el escarpe.
Lea-5	Ladera estructural agradacional con pendientes abrupta. Se caracteriza por ser la más estable, ya que no refleja falla planar, ni por volteo y ocasionalmente podrá registrar caídas de bloques en cuña. Está compuesta por depósitos antrópicos de minería y de basura.
Lea-6	Ladera estructural agradacional con pendientes escarpadas e inclinadas, que involucra sectores donde se han realizado excavaciones y rellenos para la conformación de viviendas. Hacia la parte superior se identifican los depósitos de origen minero que pueden fallar con mecanismo de falla traslacional sobre la roca, en sentido occidental. Hacia la parte baja se exponen los rellenos de construcción sobre los que se han fundado viviendas.

ZONA	DESCRIPCIÓN
Lea-7	Ladera estructural agradacional, con pendientes inclinadas, involucra sectores donde se han realizado excavaciones y rellenos para la conformación de viviendas. Al igual que la unidad anterior está representada por los depósitos Qrai y Qarm, aunque los últimos se encuentran con mayor grado de saturación, ya que reciben y almacenan el agua proveniente de la unidad Lea-3 y Lea-4, lo que conlleva a que sean más susceptibles a fallar sobre la ladera estructural en sentido norte y noroccidental, como se observa en los procesos traslacionales identificados en campo.
Eea-1	Escarpe estructural antrópico constituido por los niveles 2 y 3 de arcillolitas y lutitas, y por los dos niveles de areniscas identificados. Estructuralmente se caracteriza por que la estratificación contempla valores altos de buzamiento con respecto a los valores promedios que conjugan en todo el frente expuesto. Adicionalmente está controlada por la discontinuidades denominadas D8 y D5, ya que cinemáticamente tiene probabilidad de falla planar y por volteo, respectivamente con los planos indicados. En general está dispuesta a caída de bloques en cuña.
Eea-2	Escarpe estructural antrópico que caracteriza. Está compuesto por todos los niveles líticos encontrados, excepto el denominado Ksgl-al1. Cinemáticamente está expuesto a fallas por volteo mediante el plano D3 y en general a caída de cuñas.
Eea-3	Expone todo el sector frontal del escarpe estructural antrópico que modela la zona Contiene los dos niveles arenosos identificados en el área y el nivel guía arcilloso que los separa. (ksgl-are1, Ksgl-al2, ksgl-are2). Es sensible a que se generen fallas por volteo, por las discontinuidades 2 y 3, y en general fallas en cuña. . Se caracteriza por que aflora en el escarpe.
Eea-4	Involucra el sector sur del escarpe estructural antrópico que caracteriza la zona. Se destaca por ser la más estable, ya que no refleja falla por volteo y ocasionalmente podrá registrar caídas de bloques en cuña. Estructuralmente está regida por la estratificación que presente mayores valores de buzamiento. Está compuesta por los últimos niveles líticos arenosos, arcillosos y limosos (Ksgl-are2 y Ksgl-al3).
Cu-le	Cuenca de quebrada en "V", sobre ladera estructural de origen estructural y denudativo, con escurrimiento permanente de agua y alto caudal, y de pendiente abrupta a escarpada. Conformada por los tres niveles de arcillolitas y limolitas, y por los dos niveles de areniscas pertenecientes a la Formación Labor.

7 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE AMENZA

7.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La primera etapa del análisis de estabilidad se enfocó al estudio direccional de los modos y posibilidades de deslizamiento a lo largo de los planos de debilidad estructural, en el marco de exposición del macizo rocoso, principal ambiente de trabajo en las laderas y a la determinación de la influencia de las superficies de discontinuidad en los mecanismos de movilización de los depósitos cuaternarios recientes (rellenos antrópicos y coluviones).

En una segunda etapa se modelaron, con ayuda de los métodos de equilibrio límite, para cada zona homogénea, los modos probables de movilización (según el tipo de material y su disposición estratigráfica) en los principales cuerpos del cuaternario, mediante deslizamientos rotacionales y traslacionales, y en los medios rocosos, fallas planares, fallas por volteo y en cuña.

7.1.1 Análisis cinemático

En este análisis se evalúan los modos probables de falla para el conjunto de taludes en los que se expresa el macizo rocoso, contrastándolos con los posibles planos de movilización. La relación geométrica entre las discontinuidades, su ángulo de fricción básico –25º para la limolita - y la orientación de los cortes, determinará su posibilidad cinemática. La **Tabla 40** lista las características de los taludes estudiados, nomenclados de T1 a T58, entre las que se citan dirección, pendiente y altura, y el plano **GE 147-PL1-09** reseña su ubicación espacial.

Las memorias del análisis cinemático se recopilan en el **ANEXO II-C**, mientras que el resumen de los resultados tanto para las familias de discontinuidades analizadas, como para el conjunto completo de mecanismos se puede observar en la **Tabla 40.** En ellas se evidencia que bajo las condiciones geométricas mencionadas para los taludes, los cuales representan las superficies libres de movilización, y del patrón estructural reseñado en el **CAPÍTULO 6**. Las laderas, exhiben en general, configuración de falla planar, en cuña y por volteo, salvo en el talud T1. Este fenómeno tiene explicación por tres fundamentos básicos, así:

- Las laderas, se encuentran direccionalmente paralelas a la familia promedio de la discontinuidad involucrada.
- Los buzamientos de los planos estructurales desfavorablemente orientados, es decir, con rumbo paralelo al de las laderas, son inferiores o iguales a las inclinaciones de los taludes.
- El ángulo de fricción básico de los planos estructurales con posibilidad cinemática, es inferior tanto al buzamiento de la mayoría de las superficies de movilización (falla planar o falla por volteo), como al de sus intersecciones (falla en cuña).

Tabla 40. Resumen de análisis Cinemático y características de taludes

Ladera	Talud	Azimut de buzamiento	Buzamiento	Altura de talud	Falla planar	Falla en cuña	Falla por volteo
Eea-1	T0	202	41	6	------	----------	D5
	T1	222	57	5	------	----------	------
	T2	229	36	3	------	D4D9	------
	T3	157	73	5	------	D2AD7, D2PD3, D2PD6, D2PD7, D2PD8, D2PD10, D3D7, D3D8, D6D8,D6D10, D8D10	------
	T4	201	64	12	D8	D2BD7, D2BD8, D7D8	D5
	T5	176	67	8,5	------	D2BD7, D2BD8, D2PD8, D3D8, D6D10, D7D8	D5
	T6	225	78	5,5	D8	D2BD4, D4D8	------
	T7	145	81	9,5	D8	D2AD3, D2AD4, D2AD6, D2AD7,D2AD10, D2PD3, D2PD6, D2PD7, D2PD8, D2PD10, D3D4, D3D7, D4D7, D6D8, D6D10, D8D10	------
	T8	192	79	10,5	------	D2BD4, D2BD7, D2BD8, D3D8, D7D8	D5
	T9	202	80	11	D8	D2BD4, D2BD7, D2BD8, D7D8	D5
	T10	226	80	12	------	D2BD4, D4D8, D4D9	------
	T11	196	77	13,5	------	D2BD4, D2BD7,D2BD8, D7D8	D5
	T12	185	18	2,6	------	----------	D5
	T13	223	70	8	------	D4D8	------
	T14	192	64	14	------	D2BD7, D2BD8, D3D8, D7D8	D5
	T15	205	65	16	------	D2BD7, D2BD8, D7D8,	------
	T16	240	68	8	D8	D4D8, D4AD9, D8D9	------
	T17	240	69	22	------	D4D8, D4AD9, D8D9	------
	T18	223	69	11	D8	D4D8	------
	T19	212	69	14	D8	D2BD8, D4D8	------
	T20	212	66	18	D8	D2BD8, D4D8	------
Eea-2	T21	253	64	16	------	D4D9, D8D9	------
	T22	246	57	14	------	D4D9, D8D9	------
	T23	232	52	13	------	D4D9	------
	T24	263	55	13	------	D4D9, D5D8, D8D9	D3
	T25	263	56	24	------	D4D9, D5D8, D8D9	D3
	T26	241	57	7	------	D4D9, D8D9	------
Eea-3	T27	257	60	7	------	D4D9, D8D9	D3
	T28	258	46	5	------	D4D9	D3
Eea-2	T29	229	48	12	------	D4D9	------
Eea-3	T30	283	54	5,5	E	D5D8	D3
	T31	321	25	5	E	D4D9, D8D9	------
	T32	247	56	9	------	D1D2P	------
	T33	317	65	7	E	D2PD11	------
Eea-4	T34	302	67	11	E	----------	------
	T35	296	65	13,5	E	D5D8	------
	T36	276	67	15	------	D5D8, D8D9	D3
	T37	308	69	14	E	D1D2P, D5D9	------
	T38	322	75	13	D9, E	D1D2P, D2BD9, D2PD9, D2PD11	------
	T39	317	79	7	D9, E	D1D2P, D2AD9, D2D9, D2PD11	------
Eea-5	T40	307	72	8	D9	D2AD5, D2AD9, D2PD9, D5D9	------
	T41	279	64	8	------	D5D8, D8D9	D3
	T42	352	67	14	D11	D2BD6, D2BD11, D2PD11, D6D11	------
	T43	342	61	16	D11	D1D2P, D2BD6, D2BD11, D2PD11, D6D11	------
	T44	14	63	12	------	D3D9, D2D11,D6D9	------
	T45	349	72	10	D11	D1D2B, D1D9, D2BD6, D2BD9, D2BD11, D2PD11, D6D11	------
	T46	351	77	18	D11	D1D2B, D1D9, D2BD6, D2BD9, D2BD11, D2PD11, D6D11	------
	T47	313	79	20	D9, E	D1D2P, D2AD5, D2AD8, D2PD9, D2PD11	------
	T48	21	64	4	------	D3D9, D3D11, D6D9, D7D10,	D2A
	T49	345	83	14	D9, D11	D1D2B, D1D2P, D1D9, D2BD6, D2BD9, D2BD11, D2PD11, D6D11	------
	T50	21	81	12	D1	D3D6, D3D9, D3D11, D6D9, D7D1O	D2A
	T51	307	68	14	D1,E	D5D9	------
	T52	1	64	18	------	D3D9, D3D11, D6D9	------
	T53	339	65	10	D11	D1D2P, D2BD6, D2BD11, D2PD11, D5D11	------
	T54	1	70	12	------	D3D9, D3D11, D6D9	------
	T55	10	63	15	------	D3D9, D3D11, D6D9	------
Eea-6	T56	36	64	12,5	------	D3D9, D6D9,D7D9, D7D10,D9D10	D2A
	T57	12	54	12	------	D3D11	------
	T58	14	48	10,5	------	D3D11	------

A pesar de lo anterior, este análisis representa tan sólo la posibilidad cinemática de las diferentes superficies a través de los planos de discontinuidad involucrados, por lo que debe contrastarse con las evidencias de campo y de la modelación de estabilidad. En este sentido, al parecer la falla por volteo carece de condiciones para su desarrollo debido a que la persistencia y el espaciamiento de las discontinuidades en general oscilan entre discontinuas y poco continuas, y entre muy juntas a bastante próximas, respectivamente. Adicionalmente, los taludes aparentemente afectados por la discontinuidad D3 (T24, T25, T27, T28, T30, T36 y T41) se descartan al considerar que las estaciones donde se registraron los datos estructurales correspondientes se encuentran fuera del área de influencia de los sitos indicados.

Por otra parte las fallas planares se ven restringidas en los taludes aparentemente afectados por las discontinuidades D9 y D11, ya qué corresponden a puntos aislados y que se encuentran fuera del área de influencia de los mismos; por tanto se tendrán en cuenta, únicamente los taludes interferidos por la D8 y la estratificación. Aunque, en este último caso se consideró que por degradación de la arcillolita el ángulo de fricción bajará a 23°. En general, todos los taludes se ven comprometidos por fallas en cuña, excepto T1, T2, T12 y T34, aunque se considera que su afectación es mínima, ya qué los bloques que se generan alcanzan tamaños medianos, de acuerdo con el valor de Jv obtenido (4,3).

7.1.2 Posibilidad de movilización de los depósitos

Por último, la movilización de los cuaternarios, está controlada o condicionada por el patrón estructural del macizo. Los planos de estratificación son receptores o sirven de superficie de reposo o de despegue de los cuerpos antrópicos.

7.2 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA

7.2.1 Generalidades

En forma general, el Factor de Seguridad (FS) de un talud está dado por la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. A su vez las fuerzas resistentes son función de los parámetros de resistencia del material (ángulo de fricción ϕ, y cohesión c), la presión de poros, la aceleración producida por el sismo (α), el peso unitario (γ) y el ángulo del talud (β); las fuerzas actuantes, a su vez, dependen del peso unitario (γ), el ángulo del talud (β), la presión de poros y la aceleración producida por el sismo (α). Se puede decir que, todas las variables anteriores son aleatorias (con su respectiva distribución de probabilidad) y que se consideran como independientes; su convolusión (según el modelo de falla) define la distribución de probabilidad del Factor de Seguridad (FS); además se puede establecer la probabilidad de falla del talud (Pf) si se determina la probabilidad de que el FS sea menor o igual a 1.0.

Bajo la hipótesis de que las variables son independientes, se establece que la distribución de probabilidades del factor de seguridad es igual a la multiplicación de las funciones de distribución de probabilidad de las variables aleatorias, es decir:

$$f(FS) = f(\phi) \cdot f(c) \cdot f(\alpha) \cdot f(Ru)$$

Además, se tiene que:

$$FS = \varphi(\phi, c, \alpha, Ru)$$

Entonces, la probabilidad de falla se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Pf = P(FS \leq 1.0) = \iiint_S f(FS)\, dFS = \iiint_S f(\phi) \cdot f(c) \cdot f(\alpha) \cdot f(Ru)\, d\phi\, dc\, d\alpha\, dRu$$

Donde S es el conjunto de todo (ϕ, c, α, Ru) tal que φ(ϕ, c, α, Ru) es menor o igual a 1.0, es decir cuando el FS es menor a la unidad (o sea, falla el talud).

7.2.2 Hipótesis de trabajo

7.2.2.1 Método de análisis y modelación

La modelación para rocas, se planteó gracias a los métodos de equilibrio límite, específicamente los ilustrados por Norrisahnd and Wyllie (1996), que son versiones generalizadas de los tratamientos de falla planar, con y sin grieta de tracción, desarrollados por Hoek y Bray (1974), y el método de dovelas de Janbu (1957). Las fallas en roca (planar con y sin grieta) se evaluaron con ayuda de hojas de cálculo debidamente validadas.

En los suelos, para la determinación de la probabilidad de falla de las diferentes secciones geotécnicas establecidas (ver Secciones STD1 a STD5 del Plano **GE 147-PL1-10**) se utilizó el método de Monte Carlo, implementado en el software Slide 5.0 [4] de la casa RocScience Inc, que por medio del método de equilibrio límite emite resultados del factor de seguridad promedio probabilístico y determinístico, su desviación estándar, sus valores máximos y mínimos y la curva de mejor ajuste. Por último, los resultados obtenidos, se ajustaron a una función de distribución de probabilidad beta.

La idea básica del método de Monte Carlo consiste en escribir la integral requerida como el valor esperado de alguna función con respecto a alguna distribución de probabilidad, lo que sugiere una solución "estadística'' al problema de integración.

[4] Software de análisis bidimensional de estabilidad por equilibrio límite.

7.2.2.2 Parámetros de resistencia

- **Rocas**

Los parámetros fueron obtenidos a partir de dos fuentes básicas: 1) ensayos de campo y laboratorio del marco de este proyecto, que fueron consignados en la **Tabla 22**; 2) información secundaria seleccionada por similitudes litológica y geomorfológica y adoptada de los estudios de: GIA Consultores Ltda (2004), IGR-GIA (2003), Rocas y Minerales (1999) y Civiles (2002). Ésta correspondió a los ensayos de corte y bloque deslizante en las areniscas y arcillolitas de la formación Labor y Tierna. Con los datos recopilados se utilizó el método de las envolventes, en el que se grafican en un plano cartesiano, τ-σ, los puntos máximos y mínimos de los cortes directos disponibles, como se muestra en la **Figura 21** para las areniscas y en la **Figura 22** para las lodolitas. Aquí, se pretende obtener dos envolventes por material, caracterizadas por las expresiones: $\tau = c + \sigma * \tan\phi$, de las que se desprenden los parámetros de resistencia.

Finalmente, como producto conjunto e integrado de tales procedimientos, se resumen los parámetros adoptados en la **Tabla 41**, obtenidos a partir de una distribución de probabilidad triangular.

Tabla 41. Parámetros Geomecánicos de las discontinuidades

Plano de Discontinuidad	Cohesión (Ton/m^2)			ϕ º		
	C min	C prom	C max	ϕ min	ϕ prom	ϕ max
Arenisca	0,0	1,53	2,2	18,28	34,64	39,3
Arcillolita	1,0	1,17	1,46	17,19	22,01	30,00

- **Suelos**

A continuación se presenta la variabilidad de los factores intrínsecos de los diferentes materiales que conforman el área de estudio. De acuerdo con los resultados indicados anteriormente, se realizaron los análisis estadísticos para determinar la variabilidad de los parámetros de resistencia a partir del criterio de falla Mohr-Coulomb y obteniendo la variación de los mismos según el método de Larson y la experiencia para este tipo de suelos, ajustándose a funciones de distribución normales truncadas (mediante el cálculo de los valores máximos y mínimos con una confiabilidad del 95%); los datos seleccionados luego de estos análisis se presentan en la **Tabla 42**. Los pesos unitarios utilizados en los modelos de estabilidad se presentan en la **Tabla 43**. Se aclara, que los datos obtenidos para los parámetros de resistencia se establecieron a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio, a un nivel de deformación del 10%; razón por la que difieren de los valores indicados en la **Tabla 23**, que fueron calculados con deformaciones superiores.

Tabla 42. Parámetros de resistencia seleccionados para los depósitos

Material – Parámetro		Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	ρ
Qras	ϕ' (º)	25	3	31	18	-0,5
	C' (kPa)	30	5	50	0	
Qram	ϕ' (º)	33	2	37	28	-0,5
	c' (kPa)	10	1	15	0	
Qco	ϕ' (º)	27	3	30	24	-0,5
	c' (kPa)	20	10	25	0	

Tabla 43. Pesos unitarios de los materiales utilizados en los modelos

Material	γ_d (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)
Qras	16	18
Qram	17	20
Qco	20	21

7.2.2.3 Agentes detonantes

Los agentes detonantes se establecen como condiciones asociadas a la ocurrencia de lluvias (Ll) y sismos (Eq).

Agua

- Rocas

La presencia de agua en el talud se tuvo en consideración, de acuerdo con el mecanismo de falla adoptado como: la relación Hw/H para la falla planar sin grieta de tracción y Zw/Z para la falla planar con grieta de tracción.

La función de probabilidad de dichas variables (Hw/H y Zw/Z) se basó en la obtención para la Estación Serrazuela -la más cercana a Villa Nidia- de los periodos de retorno en función de lluvias acumuladas para una duración dada, mediante una distribución Gumbel de la forma:

$$Tr = \frac{1}{1 - \exp\{-\exp[-a(Lld - b)]\}}$$

O, lo que es lo mismo,

$$p = 1 - \exp\{-\exp[-a(Lld - b)]\}$$

Donde:

Tr: Período de retorno (años)
p: Probabilidad de ocurrencia anual de Lld
Lld: Precipitación acumulada para una duración dada (mm)
a y b: Coeficientes de Gumbel que son función de la duración de la lluvia crítica para la Estación Serrazuela, mediante las siguientes expresiones (Ingeocim, 1998 – Capítulo hidrología):

Figura 21. Envolvente de resistencia para discontinuidades en arenisca

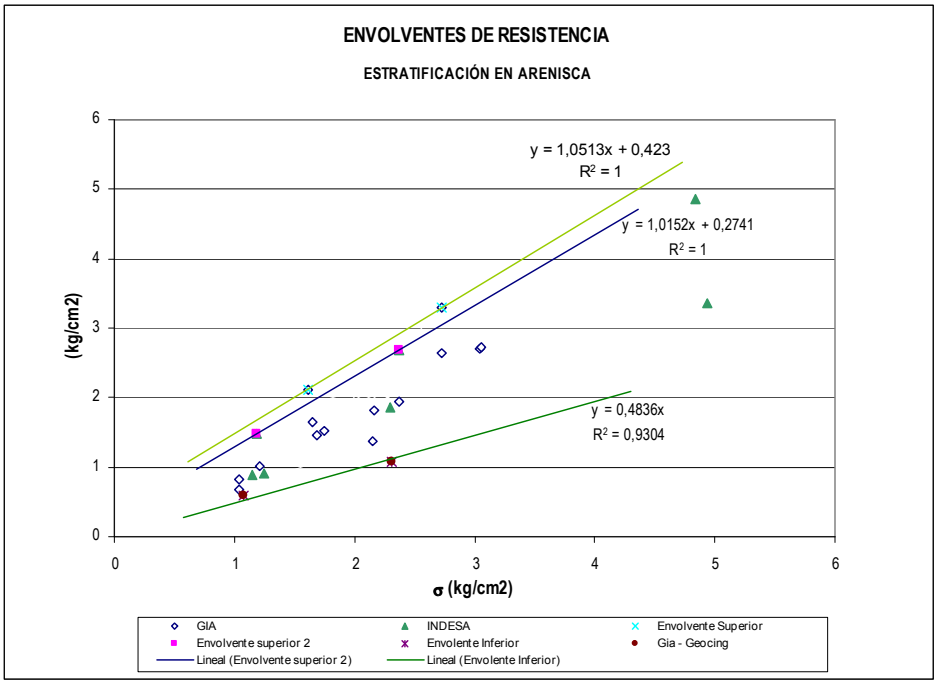
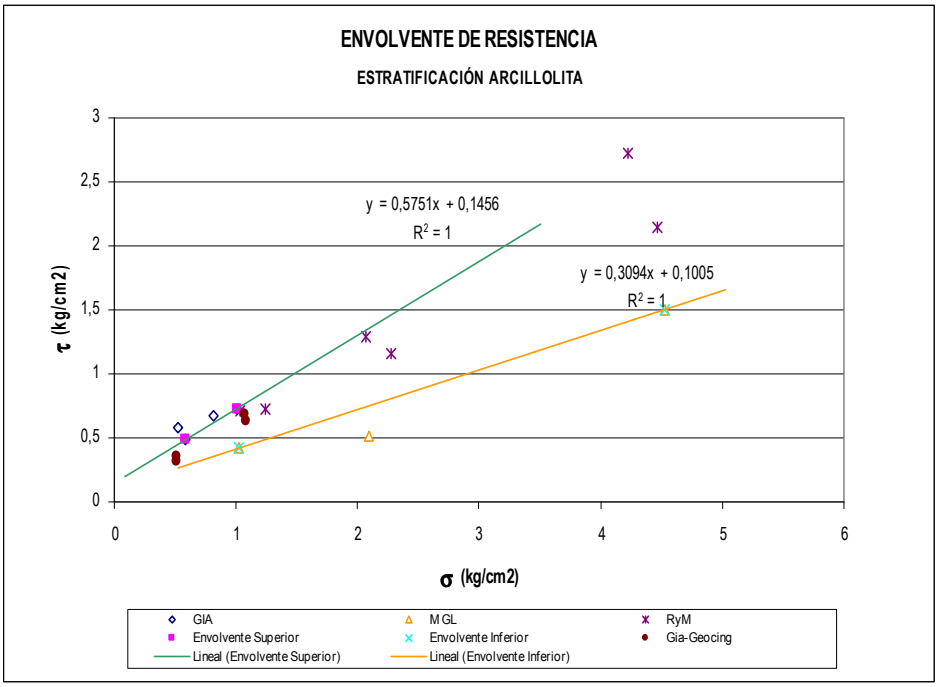


Figura 22. Envolvente de resistencia para discontinuidades en arcillolita



$$a = 0.00002 \cdot Dcr^2 - 0.0026 \cdot Dcr + 0.0849$$

$$b = 0.0076 \cdot Dcr^2 + 2.7685 \cdot Dcr + 40.985$$

Donde:

Dcr: Es la duración de la lluvia crítica (días)

De acuerdo con Castellanos, 1.995, la Dcr es función de la Lluvia crítica, Llcr, (en mm) y se escribe en términos de la precipitación anual, Lla (también en mm), así:

$$Dcr = 3.2829042331 \cdot Llcr^{0.4157115679}$$
$$Llcr = 0.3608995184 \cdot Lla$$

Dado que la precipitación anual multianual, Lla, en la Estación seleccionada, es de 920.8 mm (ver **CAPÍTULO 7**), la precipitación crítica, Llcr, es 332.32 mm; su duración, Dcr, 36 días y su periodo de retorno, Tr, 11.73 años. Los valores de los coeficientes de la distribución Gumbel para esta estación y duración, a y b, son 0.01608/mm y 133.0151 mm, respectivamente, con media de 168.9115 mm y desviación estándar de 79.7606 mm.

Para otros escenarios de exposición se tiene que:

$$p_n = 1 - \exp(-n \cdot p)$$

Donde:

p_n: Probabilidad de ocurrencia de Lld, para una exposición de n años
n: Tiempo de exposición (años)
p: Probabilidad de ocurrencia anual de Lld

Con esta información se construyeron las curvas de Hw/H ilustrada en la **Figura 23** (falla planar sin grieta de tracción) para 1 y 10 años y de Zw/Z que se visualiza en la **Figura 24** (falla planar con grieta de tracción) para los mismos escenarios.

❖ Suelos

La distribución de probabilidad acumulada del nivel de agua, se ajustó a una distribución de probabilidad exponencial truncada, entre el nivel mínimo (referido como 0) y el nivel máximo (referido como 1), teniendo en cuenta el período de retorno de la lluvia crítica (ver numeral 4.5.3):

$$P(N \geq x) = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ e^{-\lambda\left(\frac{x}{1-x}\right)} & 0 \leq x < 1 \\ 0 & x \geq 1 \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{1 - N_c}{N_c} \cdot Ln\left(\frac{1}{T}\right)$$

0

$$Np = \frac{Ln\left(\frac{1}{2}\right)}{\lambda + Ln\left(\frac{1}{2}\right)}$$

Nc : Nivel de agua crítico
T : Período de retorno de la lluvia crítica
Np : Nivel de agua promedio

El nivel de agua crítico se define como el nivel del agua para el cual, en condiciones promedio de resistencia, el talud presenta un factor de seguridad de 1,0; para determinarlo, se realizaron análisis de sensibilidad del factor de seguridad y el nivel del agua para las diferentes secciones de análisis (se tomó como nivel mínimo el contacto con la roca y el nivel máximo la superficie del terreno); los resultados correspondientes se resumen en la **Tabla 44**.

Tabla 44. Parámetros estadísticos para el nivel del agua

Sección	Material	Nc	λ	Np
STD-1	Qram	0,75	-0,88	0,44
STD-2	Qram	0,82	-0,58	0,54
STD-3	Qram	0,70	-1,13	0,38
STD-4	Qras-Qco	1,00	0,0	1,0
STD-5	Qras – Qram	0,86	-0,43	0,62

Sismo

❖ Rocas

Con respecto al sismo, se tienen las siguientes consideraciones:

- El Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, EGASC, determina para Bogotá un a_m de 0.20g, para un período de retorno Tr = 475 años (probabilidad de ocurrencia de 10% en 50 años).
- La Microzonificación Sísmica de Bogotá, MZSB, determina para los cerros de Bogotá (zona 1) un a_m de 0.24g.

Lo anterior significa que, en términos generales, para Villa Nidia, localizado en zona de cerros, el factor de amplificación es 1.5, además, para efectos de análisis seudo-estáticos de estabilidad se toman los 2/3 de am ya que ésta considera valores pico.

Figura 23. Distribución de probabilidad para el nivel del agua (falla planar sin grieta de tracción)

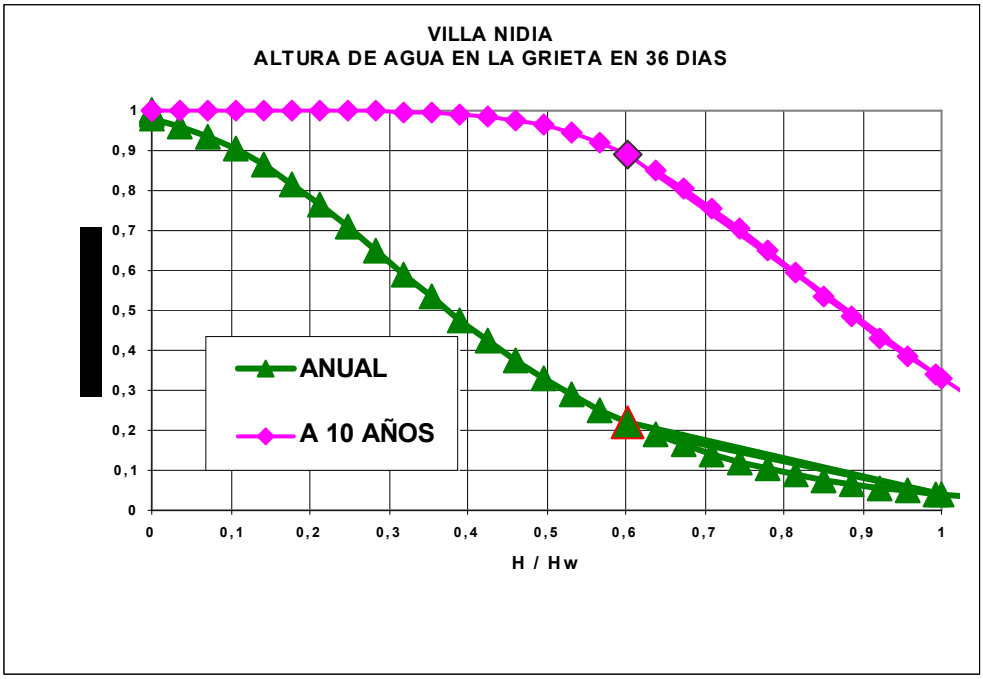
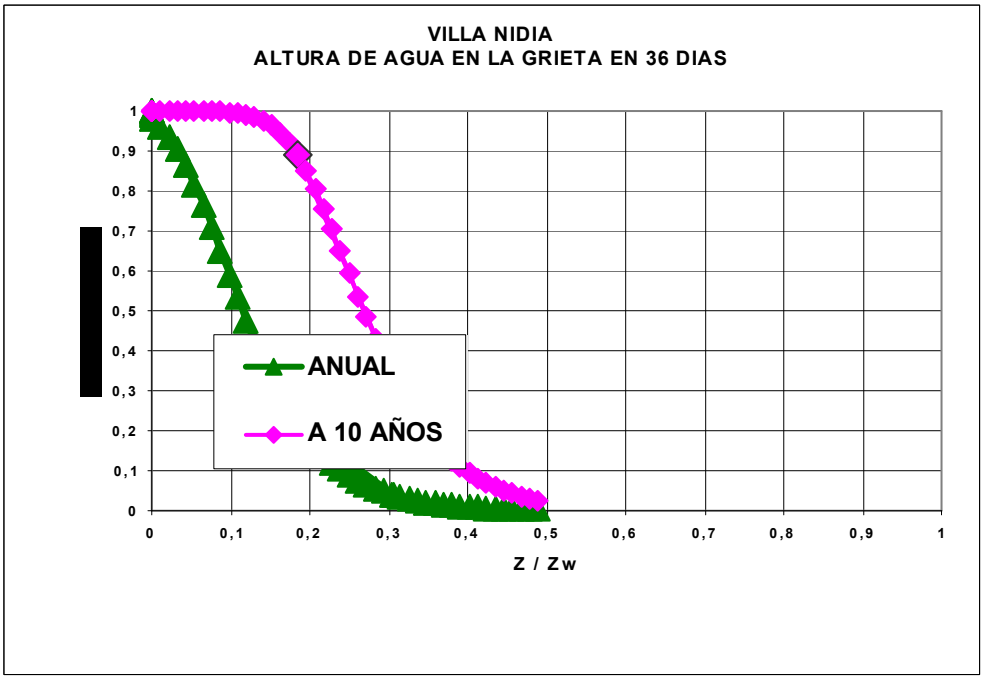


Figura 24. Distribución de probabilidad para el nivel del agua (falla planar con grieta de tracción)



Así, la curva de amenaza presentada por el EGASC para Bogotá se afecta por las consideraciones mencionadas, tal como se presenta en la **Figura 25**, para un escenario de 1 año de exposición y se ajusta a la siguiente distribución Gumbel:

$$p = 1 - \exp\left\{-\exp\left[-a\left(\left(a_h/g\right)^{0.25} - b\right)\right]\right\}$$

Donde:

a_h/g: Coeficiente de aceleración horizontal del terreno
a: Coeficiente de Gumbel = 16.85895
b: Coeficiente de Gumbel = 0.319692

Para otros escenarios se tiene:

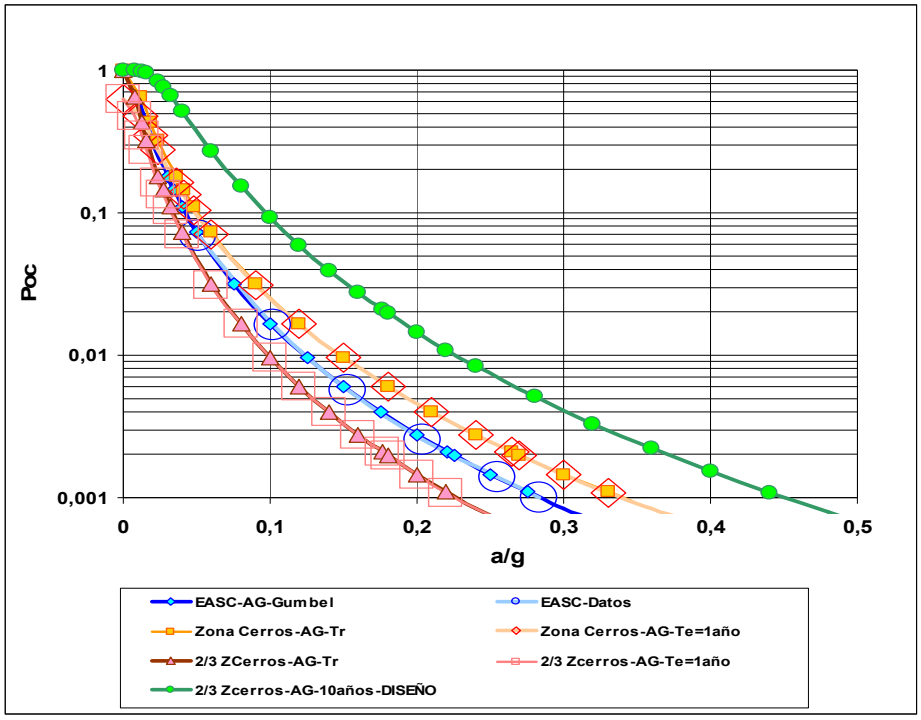
$$p_n = 1 - \exp(-n \cdot p)$$

Donde:

p_n: Probabilidad para exposición de n años
n: Tiempo de exposición (años)
p = probabilidad anual (p = 1/475)

En la **Figura 25**, se muestra también la curva para una exposición de 10 años.

Figura 25. Distribución de probabilidad para la aceleración horizontal del terreno



❖ Suelos

Para determinar la variabilidad de la aceleración máxima horizontal a nivel de roca, se utilizaron los datos del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (AIS, 1997), cuyos datos se presentan en la **Figura 26**; ajustándolos los datos a una función de probabilidad exponencial se obtiene lo siguiente:

$$P(a_h \geq a_x) = \begin{cases} 1 & a_x < a_{\min} \\ e^{-\lambda_s \left(\frac{a_x - a_{\min}}{a_{\max} - a_x} \right)} & a_{\min} \leq a_x < a_{\max} \\ 0 & a_x \geq a_{\max} \end{cases}$$

Donde,

a_{max} :	Aceleración máxima probable, para este caso 0,24 g.
a_{min} :	Aceleración mínima probable, para este caso 0,00 g.
λ_s :	Parámetro de la distribución exponencial, para este caso igual a 0,05.

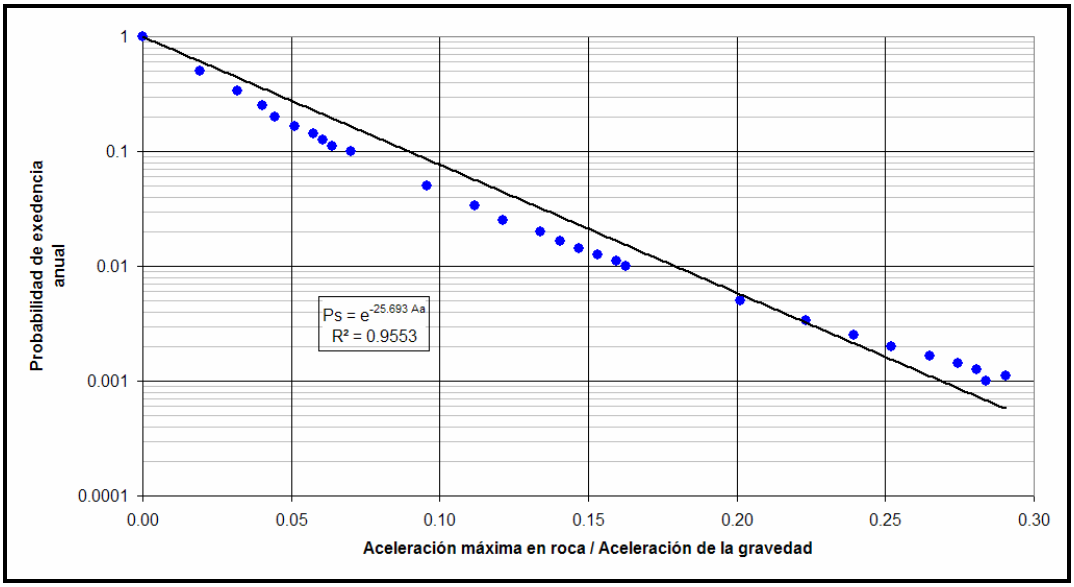


Figura 26. Probabilidad de excedencia del sismo en la zona ajustada a una distribución exponencial

7.2.3 Secciones de análisis

Para los modelos bidimensionales de estabilidad, se seleccionaron las siete (7) secciones de análisis típicas presentadas en el Plano **GE 147-PL1-10**, donde se pueden distinguir tres (3) tipos de materiales en el caso de los suelos (Ver secciones STD 1, STD2, STD3, STD4 y STD5), y los estratos rocosos descritos anteriormente (Ver secciones STR1 y STR 2), tal como se describe en el numeral 6.

7.2.4 Evaluación de amenaza

7.2.4.1 Rocas

La amenaza por fenómenos de remoción en masa, entendida como la posibilidad de falla durante un tiempo de exposición dado, puede hacerse mediante análisis cuantitativos: probabilísticos o determinísticos, o por métodos puramente empíricos. En este estudio, la evaluación se hace en términos cuantitativos – probabilísticos de tal forma que la amenaza es función de múltiples factores, ya sean internos o externos que la controlan, expresados, unos, como valores únicos y, otros, como variables aleatorias. En el caso de los deslizamientos, la amenaza puede describirse mediante la evaluación del factor de seguridad.

Así, para estimar la probabilidad de falla es necesario conocer la distribución estadística del factor de seguridad (González, 2001) específicamente sus dos parámetros: media y desviación estándar. La solución a este inconveniente se plantea aquí al recurrir al método estadístico de Monte Carlo. Cualquiera que sea el método, es preponderante definir las hipótesis de trabajo determinísticas (mecanismo de falla y métodos de análisis), y las hipótesis de trabajo probabilísticas (parámetros de resistencia y agentes detonantes), las últimas mediante funciones de probabilidad y los parámetros que las definen (p. ej. media y desviación estándar).

Todas las determinaciones se efectuaron contemplando dos escenarios de exposición: actual (1 año) y a mediano plazo (10 años) con el fin de establecer sensibilidad con respecto a esta variable. La diferencia entre los cálculos, entre uno y otro escenario, radica en la utilización de las curvas de probabilidad de las variables con incertidumbre temporal: agua y sismo. (Ver las **Figura 23 a la Figura 25**).

Fijos los comportamientos de las fuentes de incertidumbre, las funciones de probabilidad de las variables se constituyeron en elementos fundamentales para la determinación de la función de la probabilidad de falla. En este sentido se determina el FS para múltiples corridas, cinco mil (5000) en total, a partir de la selección aleatoria de los valores de las variables (método de Monte Carlo). Finalmente, con los factores de seguridad (F.S) se calcularon las curvas de densidad, a partir de las cuales se obtuvo la probabilidad de falla como el área bajo la curva para niveles del F.S. menores a la unidad.

7.2.5 Análisis de resultados

7.2.5.1 Roca

Para analizar la falla planar por la estratificación se tomó la sección STR1, localizada junto al talud 35, y por la diaclasa D8 se definió la sección STR2, ubicada cerca al talud 18. Para el primer caso se utilizaron los parámetros para la arcillolita y en el segundo caso los correspondientes a la arenisca.

Para la sección con STR1 solo se realizó el análisis de falla planar con grieta, debido a que el buzamiento de la estratificación no se intersectaba con la superficie del terreno. Adicionalmente se consideró que el nivel del agua (Zw) podría oscilar entre 3 y 5m, con base en los resultados obtenidos en la exploración del subsuelo, razón por la que se trabajó con los valores extremos. Los resultados correspondientes se ilustran en la **Tabla 45** De esta se deduce que a un año la amenaza es baja indistintamente de las condiciones del agua; mientras que para 10 años es media y alta, para los niveles más bajo y más alto, respectivamente.

Para la sección STR2 se realizó el análisis de falla planar con grieta y sin grieta; para el primer caso se tomó la distancia de la grieta hasta 2 m, punto próximo en donde interfecta la diaclasa D8 con la superficie del terreno. Los resultados correspondientes se recopilan en las **Tabla 46** y **Tabla 47**. De estos se deduce que tanto para 1 año como para 10 años la probabilidad es media.

Tabla 45. Resultados análisis de falla planar con grieta en STR1

Fs	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Zw (m)	3	3	3	3	3
Zw/Z (%)	0,43	0,43	0,42	0,41	0,39
B (m)	1,5	3,0	6,0	9,0	15,0
P (1 año)	0,027	0,025	0,026	0,024	0,025
P (10 años)	0,307	0,296	0,313	0,304	0,304
Fs	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Zw (m)	5	5	5	5	5
Zw/Z (%)	0,72	0,71	0,70	0,68	0,64
B (m)	1,5	3,0	6,0	9,0	15,0
P (1 año)	0,60	0,071	0,068	0,071	0,069
P (10 años)	0,63	0,624	0,631	0,627	0,623

Tabla 46. Resultados análisis de falla planar sin grieta en STR2

Fs	1,0	1,1	1,2	1,21
Hw (m)	5,22	3,79	1,24	0
Hw/H (%)	47	34	11	0
P (1 año)	0,244	0,218	0,207	0,209
P (10 años)	0,377	0,31	0,242	0,238

Tabla 47. Resultados análisis de falla planar con grieta en STR2

Fs	1,0	1,0	1,0	1,0	1,14	1,14	1,14	1,14
Zw (m)	0,78	0,78	0,78	0,78	0	0	0	0
Zw/Z (%)	24	31	43	73	0	0	0	0
B (m)	0,5	1	1,5	2	0,5	1	1,5	2
P (1 año)	0,281	0,294	0,285	0,28	0,245	0,24	0,252	0,257
P (10 años)	0,411	0,419	0,43	0,42	0,328	0,322	0,324	0,319

7.2.5.2 Suelos

En el **ANEXO VI-A**, se presenta el análisis probabilístico de estabilidad sobre cada una de las cinco (5) secciones de análisis seleccionadas; cada una de ellas se modeló en las condiciones más críticas, con mecanismos de falla tanto rotacionales como traslacionales, con el fin de definir con cual de éstos se trabajaba. En consecuencia se obtuvo que la situación más desfavorable está dada por los primeros. Los resultados obtenidos se resumen en la **Tabla 48** y se describen a continuación:

Tabla 48. Resumen de los FS críticos en las secciones analizadas

SECCION	TIPO	MINIMA	PROMEDIO	MAXIMA	DESVIACIÓN	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	PROBABILIDAD DE FALLA ANUAL
STD1	ROTAC.	0,50	1,23	1,83	0,281	22,8%	25,1%
	TRASL.	0,88	1,53	2,24	0,313	14,0%	3,1%
STD2 PARTE BAJA	ROTAC.	0,52	1,29	2,00	0,301	23,3%	19,8%
	TRASL.	1,16	2,12	2,66	0,300	11,3%	0,0%
STD2 PARTE ALTA	ROTAC.	0,87	1,57	2,07	0,252	16,1%	0,9%
	TRASL.	1,14	2,02	2,51	0,272	13,5%	0,0%
STD3	ROTAC.	0,50	1,35	1,91	0,254	18,8%	11,3%
	TRASL.	0,93	1,61	2,13	0,238	11,1%	1,2%
STD4	ROTAC.	0,49	1,78	2,74	0,426	24,0%	3,8%
	TRASL.	0,78	2,65	4,15	0,632	15,2%	0,3%
STD5	ROTAC.	1,42	2,45	3,49	0,333	13,6%	0,0%
	TRASL.	1,69	3,06	4,39	0,458	10,4%	0,0%

Para las secciones STD1 y STD2 se realizaron los cálculos de estabilidad actual con el nivel de saturación total, mientras que para la sección STD3 no se consideró la influencia del agua, debido a que no se encontraron niveles freáticos durante la exploración; adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad en donde se varío la profundidad del estrato rocoso, con el fin de obtener la situación más crítica, que está representada en los valores registrados en la **Tabla 47**. Con respecto a las secciones STD4 y STD5, a pesar que no se evidenció nivel freático se evalúo la estabilidad de las mismas en condiciones saturadas, al considerar que por sus condiciones topográficas y estratigráficas podrían almacenar agua.

<u>Sección geotécnica 1. STD1</u>

Los resultados indican una alta probabilidad de falla de talud por deslizamiento, en los alrededores de la cancha múltiple ubicada hacia el centro del barrio. De los análisis probabilísticos de estabilidad se obtuvo el histograma del factor de seguridad crítico (ver **Figura 27**), concluyéndose de este que el valor esperado del factor de seguridad para las condiciones de análisis es del orden de 1,23, desviación estándar de 0,281 y una probabilidad de falla del 25,1 %.

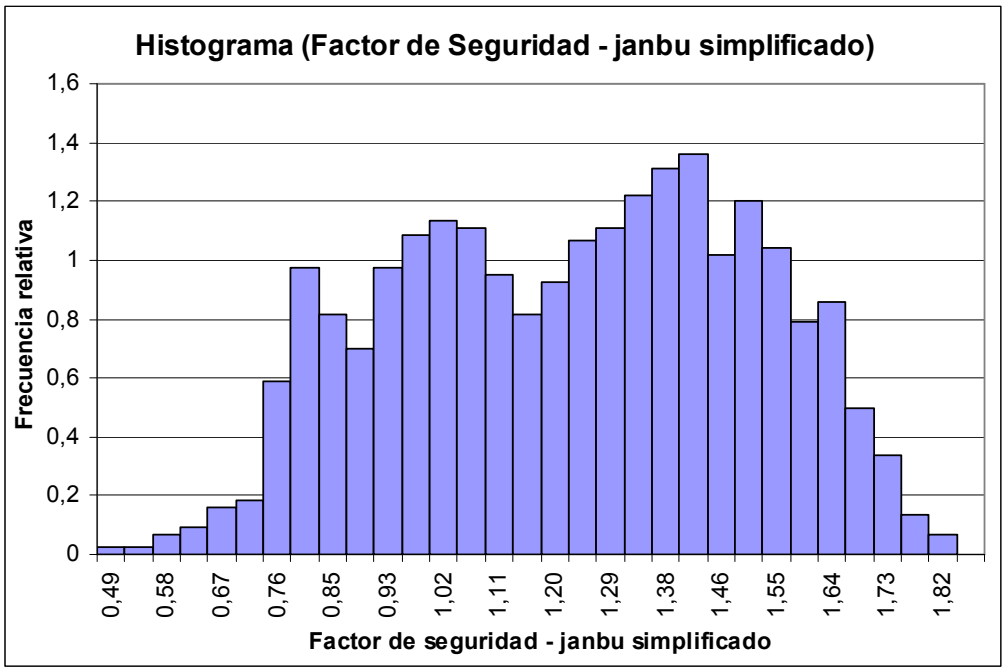


Figura 27. Histograma de frecuencias del FS para STD1

Al realizar un análisis de sensibilidad de los factores detonantes -lluvia y sismo- se determinó que para los estados promedio de resistencia y bajo las condiciones actuales, el talud presentará estabilidad crítica (factor de seguridad de 1,0) para una altura del nivel freático de 0,75 o cualquier aceleración sísmica. Los resultados de los análisis se ilustran en la **Figura 28** y la **Figura 29.**

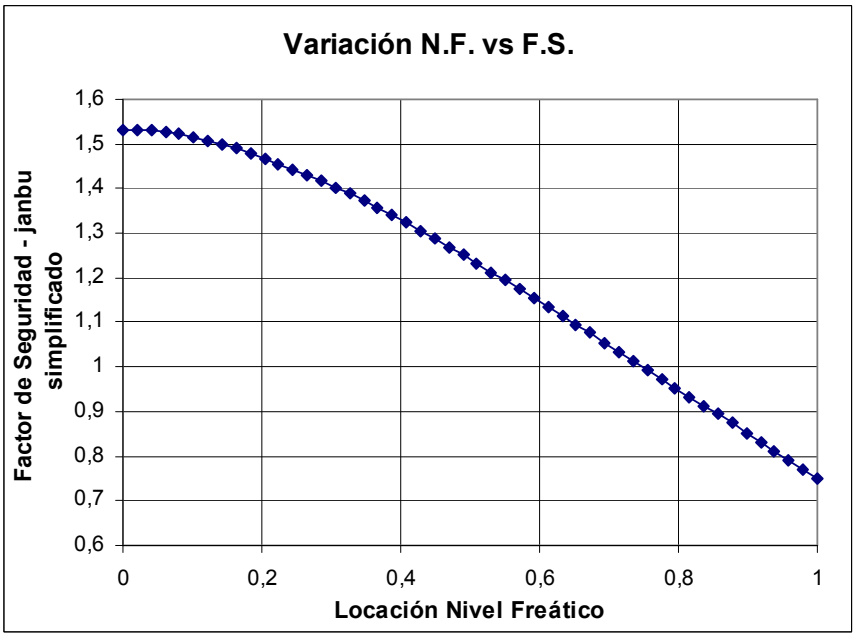


Figura 28. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD1

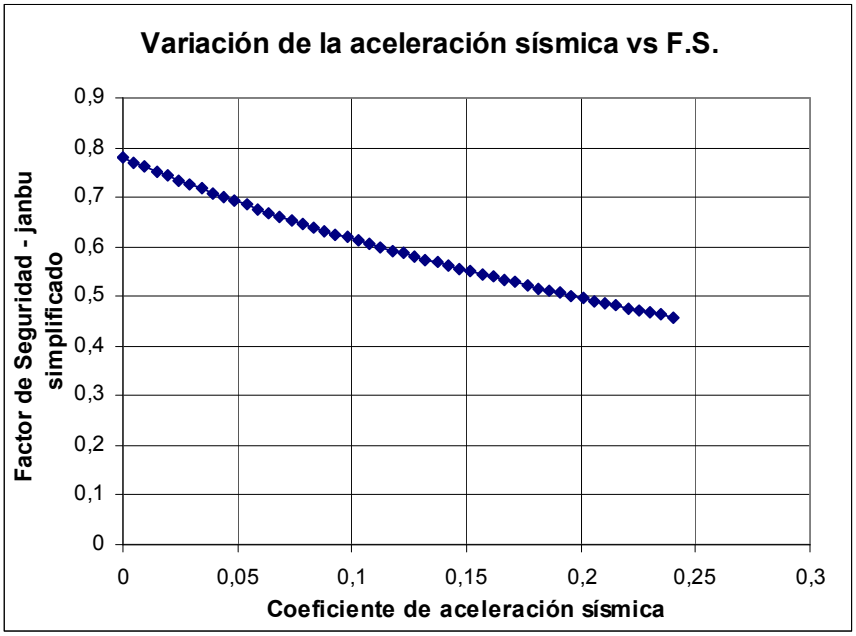


Figura 29. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD1

Los resultados indican que los factores de seguridad varían entre 1,0 y 1,7 con probabilidades de falla correspondientes a 50,0% y 0,0% respectivamente. Como puede observarse en la **Figura 30**.

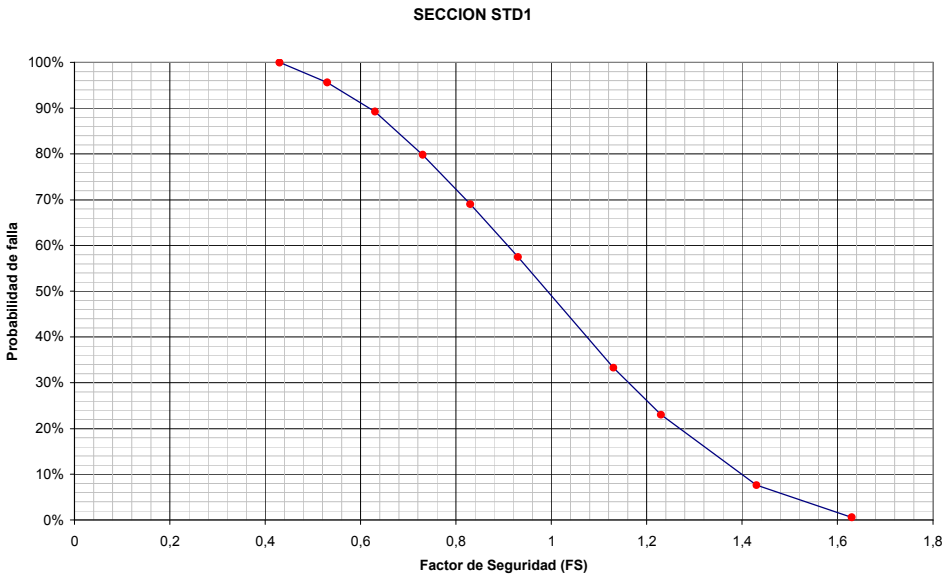


Figura 30. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD1

Sección geotécnica 2. STD2

Los análisis de estabilidad indican una alta probabilidad de falla del talud por deslizamiento. De los análisis probabilísticos de estabilidad se obtuvo el histograma del factor de seguridad crítico (ver **Figura 31**), concluyéndose de este que el valor esperado para las condiciones de análisis es del orden de 1,29, desviación estándar de 0,301 y una probabilidad de falla del 19,8 %.

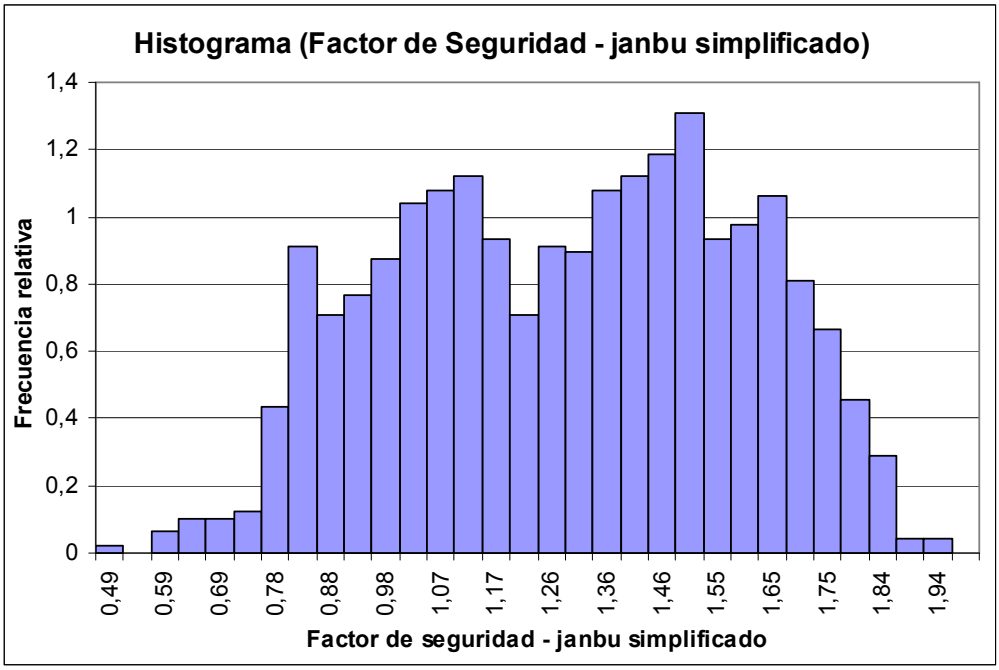


Figura 31. Histograma de frecuencias del FS para STD2

Al realizar un análisis de sensibilidad de los factores detonantes (lluvia y sismo) se determinó que para los estados promedio de resistencia y bajo las condiciones actuales, el talud presentará estabilidad crítica (factor de seguridad de 1,0) para una altura del nivel freático de 0,80 o cualquier aceleración sísmica. Los resultados se pueden observarse en la **Figura 32** y la **Figura 33**.

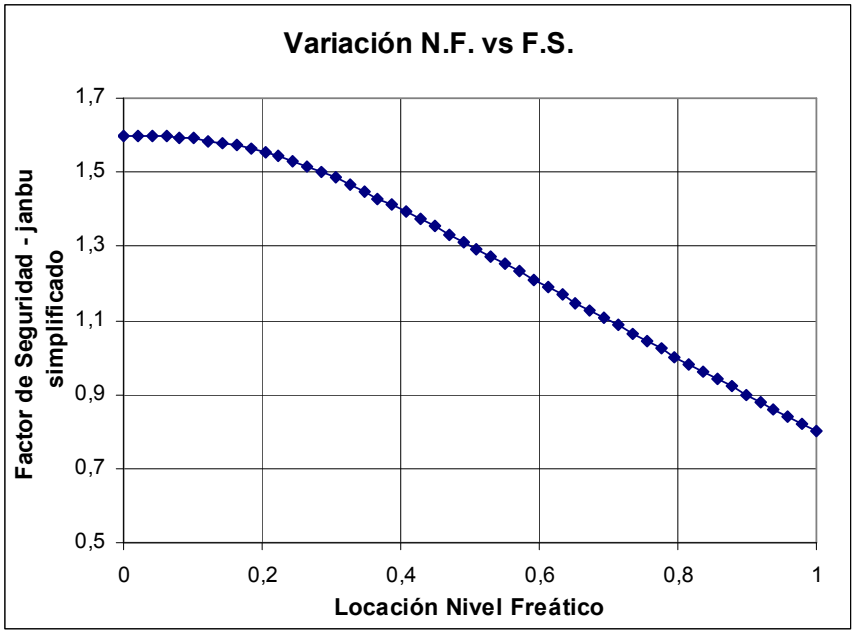


Figura 32. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD2

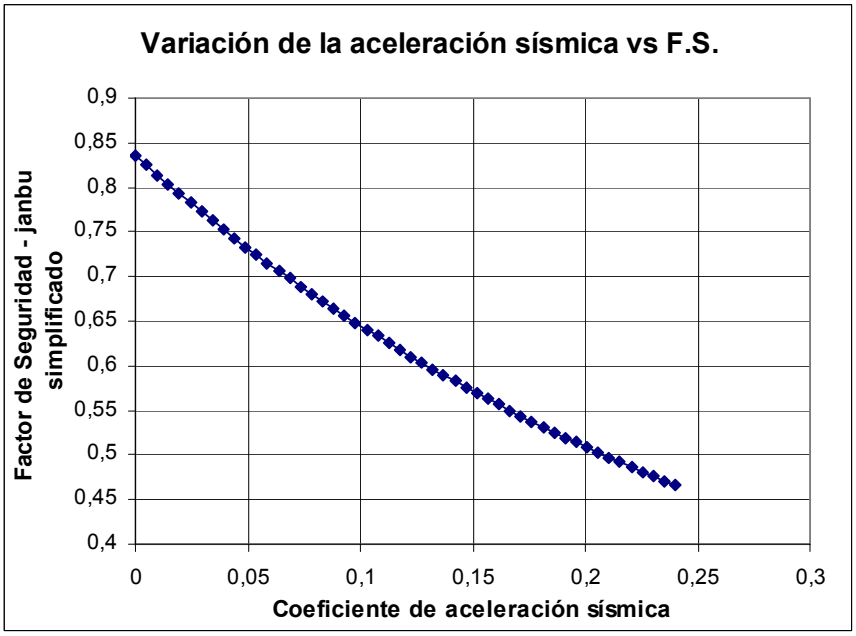


Figura 33**.** Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD2

Los factores de seguridad varían entre 1,0 y 2,1 con probabilidades de falla correspondientes a 50,0% y 0,0% respectivamente. Como puede observarse en la **Figura 34.**

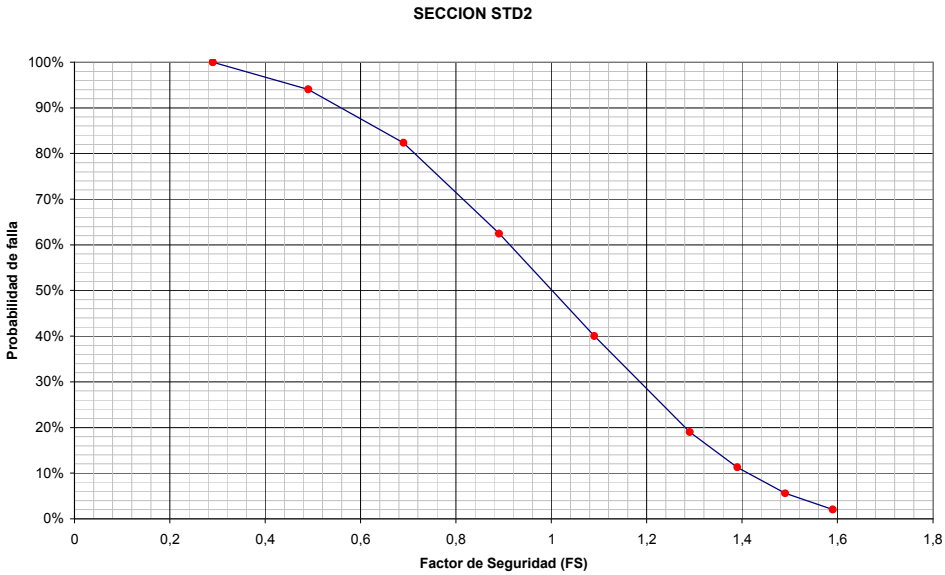


Figura 34. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD2

Sección geotécnica 3. STD3

Los análisis de estabilidad indican una probabilidad de falla de talud media por deslizamiento del suelo Qram. De los análisis probabilísticos de estabilidad se obtuvo el histograma del factor de seguridad crítico (ver **Figura 35**), concluyéndose de este que el valor esperado para las condiciones de análisis es del orden de 1,35, desviación estándar de 0,254 y una probabilidad de falla del 11,3 %.

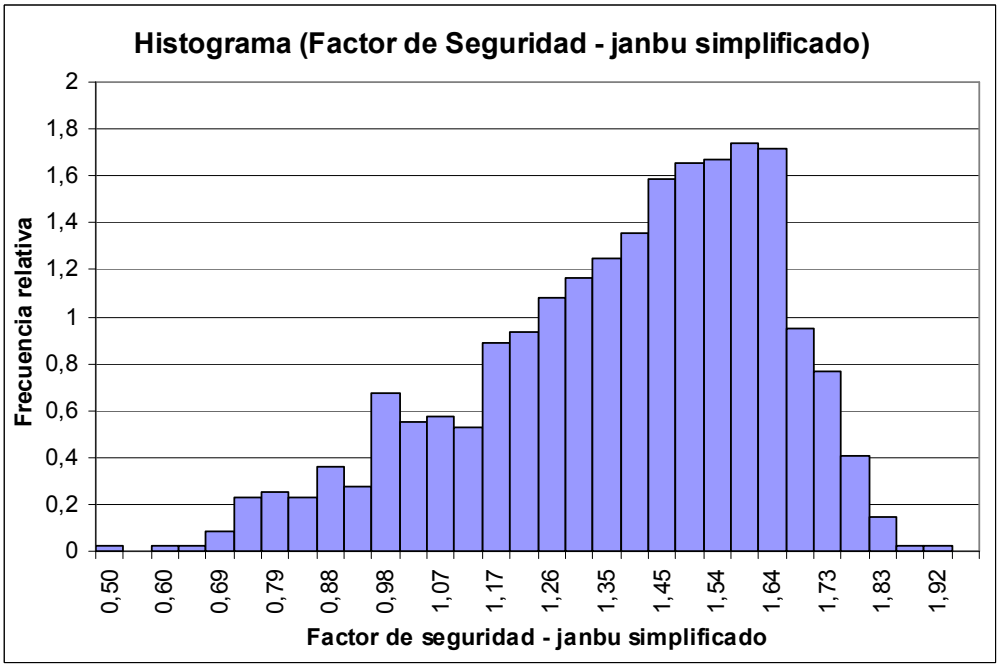


Figura 35. Histograma de frecuencias del FS para STD3

Al efectuar un análisis de sensibilidad de los factores detonantes (lluvia y sismo) se determinó que para las estados promedio de resistencia y bajo las condiciones actuales, el talud presentará estabilidad crítica (factor de seguridad de 1,0) para una altura del nivel freático de 0,70 o una aceleración sísmica de 0,20g (equivalente a un coeficiente da aceleración pseudo-estático, kh, de 0,13). Como puede observarse en la **Figura 36** y en la **Figura 37.**

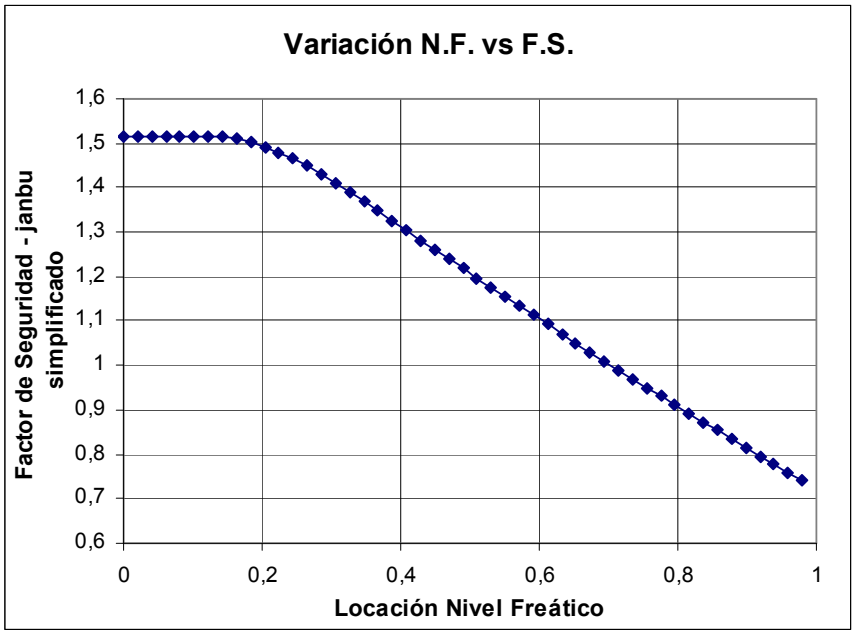


Figura 36. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD3

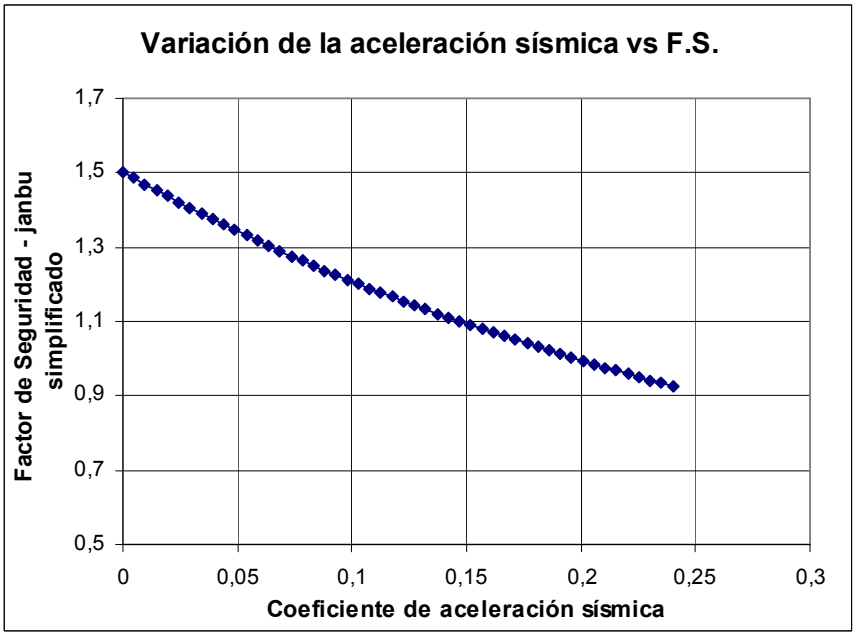


Figura 37. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD3

Los factores de seguridad varían entre 1,3 y 1,8 con probabilidades de falla correspondientes a 11,0% y 0,0% respectivamente. Como puede observarse en la **Figura 38.**

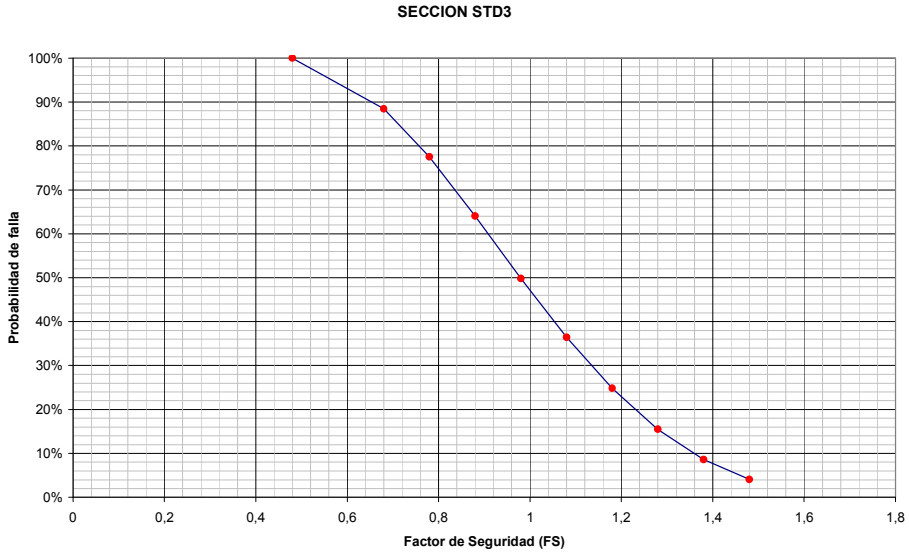


Figura 38**.** Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD3

Sección geotécnica 4. STD4

Los análisis de estabilidad indican una baja probabilidad de falla del talud por deslizamiento. De los análisis probabilísticos de estabilidad se obtuvo el histograma del factor de seguridad crítico (ver **Figura 39**), concluyéndose de este que el valor esperado para las condiciones de análisis es del orden de 1,78, desviación estándar de 0,426 y una probabilidad de falla del 3,8 %.

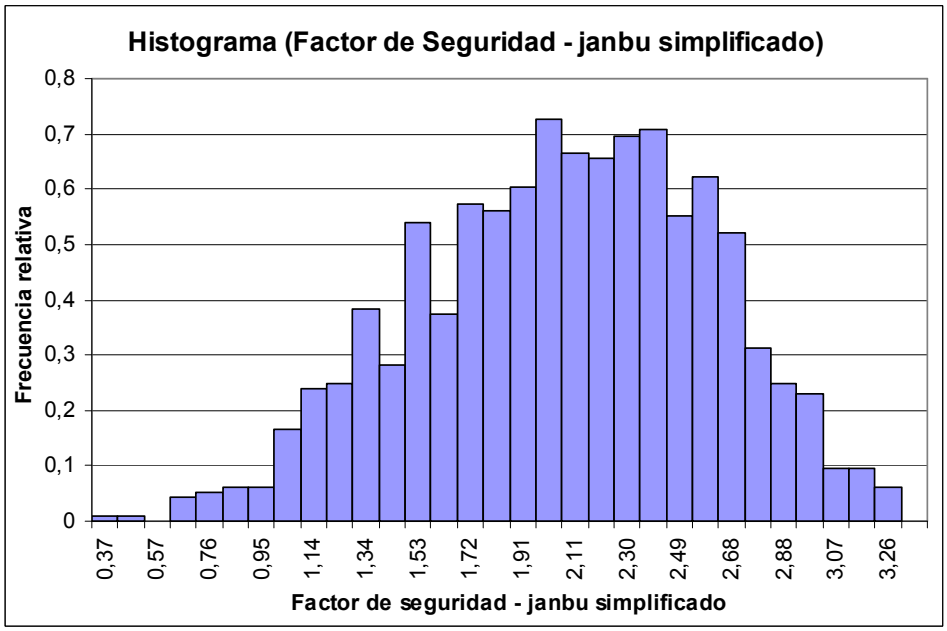


Figura 39. Histograma de frecuencias del FS para STD4

Al realizar un análisis de sensibilidad de los factores detonantes (lluvia y sismo) se determinó que para los estados promedio de resistencia y bajo las condiciones actuales, el talud presentará estabilidad crítica (factor de seguridad de 1,0) para cualquier altura del nivel freático o una aceleración sísmica de 0,24g (máxima esperada equivalente a un coeficiente da aceleración pseudo-estático, kh, de 0,16). Como puede observarse en la **Figura 40** y en la **Figura 41.**

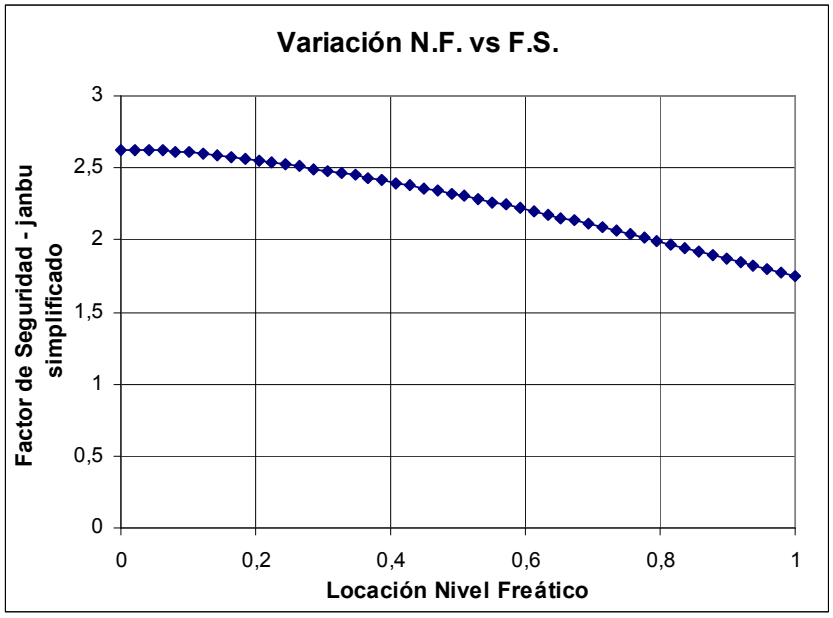


Figura 40. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD4

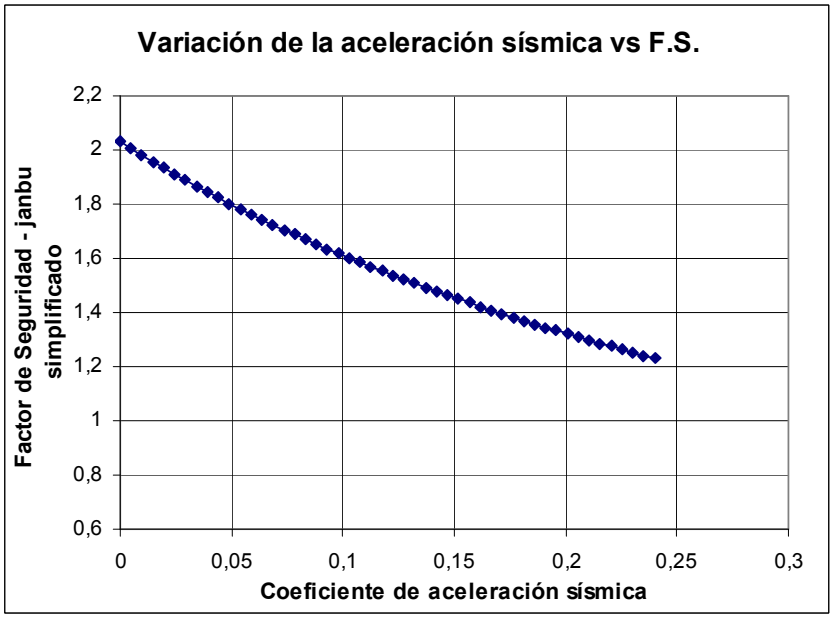


Figura 41. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD4

Los factores de seguridad varían entre 1,8 y 2,6 con probabilidades de falla correspondientes a 8,0% y 0,0% respectivamente. Como puede observarse en la **Figura 42.**

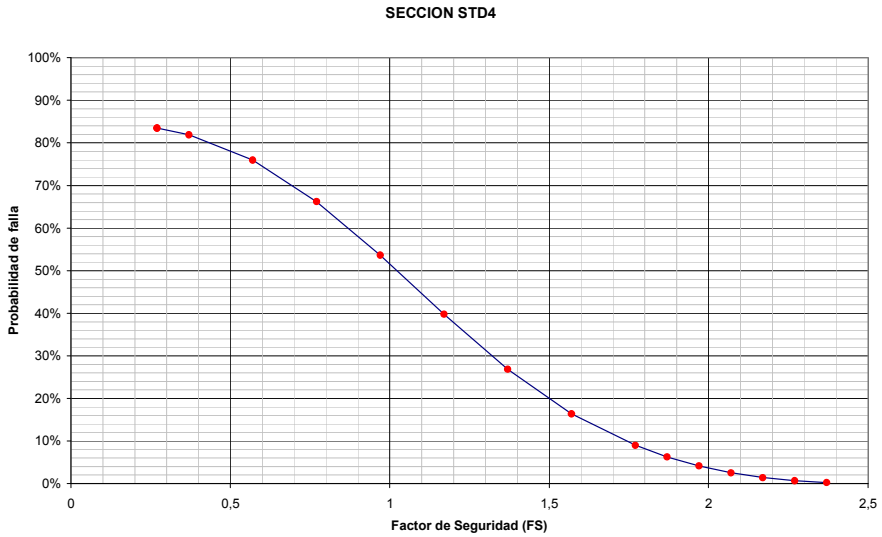


Figura 42. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD4

Sección geotécnica 5. STD5

Los análisis de estabilidad indican una baja probabilidad de falla del talud por deslizamiento. De los análisis probabilísticos de estabilidad se obtuvo el histograma del factor de seguridad crítico (ver **Figura 43**), concluyéndose de este que el valor esperado para las condiciones de análisis es del orden de 2,46, desviación estándar de 0,333 y una probabilidad de falla del 0,0 %.

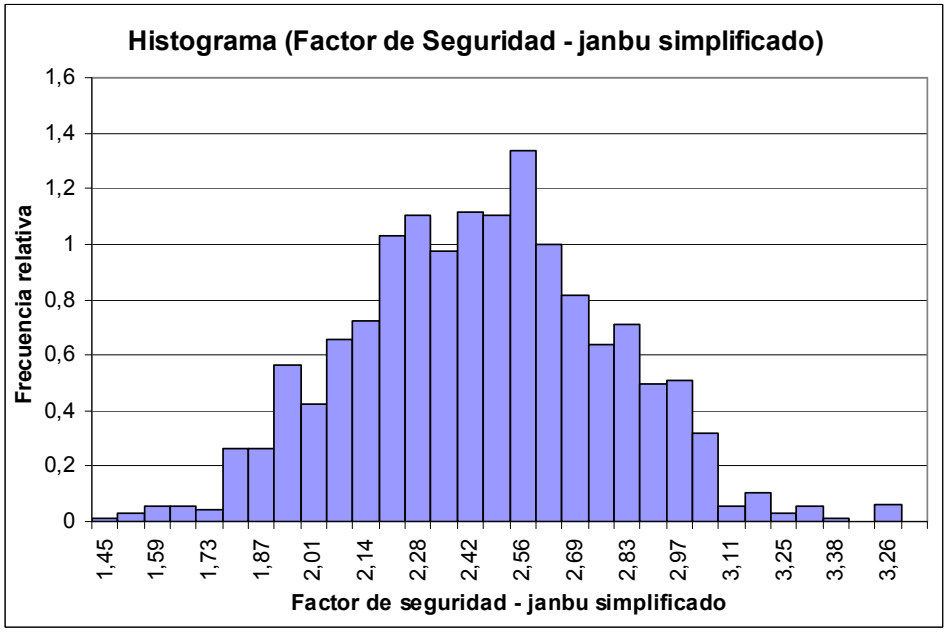


Figura 43. Histograma de frecuencias del FS para STD5

Al realizar un análisis de sensibilidad de los factores detonantes (lluvia y sismo) se determinó que para los estados promedio de resistencia y bajo las condiciones actuales, el talud no presentará estabilidad crítica (factor de seguridad de 1,0) para ninguna altura del nivel freático o aceleración sísmica (máxima esperada 0,24g). Como puede observarse en la **Figura 44** y en la **Figura 45.**

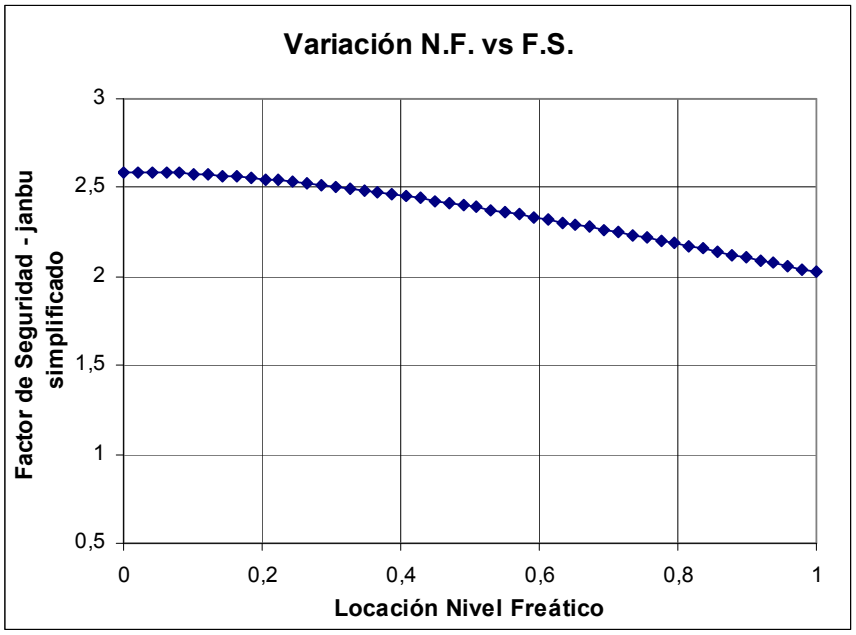


Figura 44. Análisis de sensibilidad del nivel freático en los análisis de estabilidad de STD5

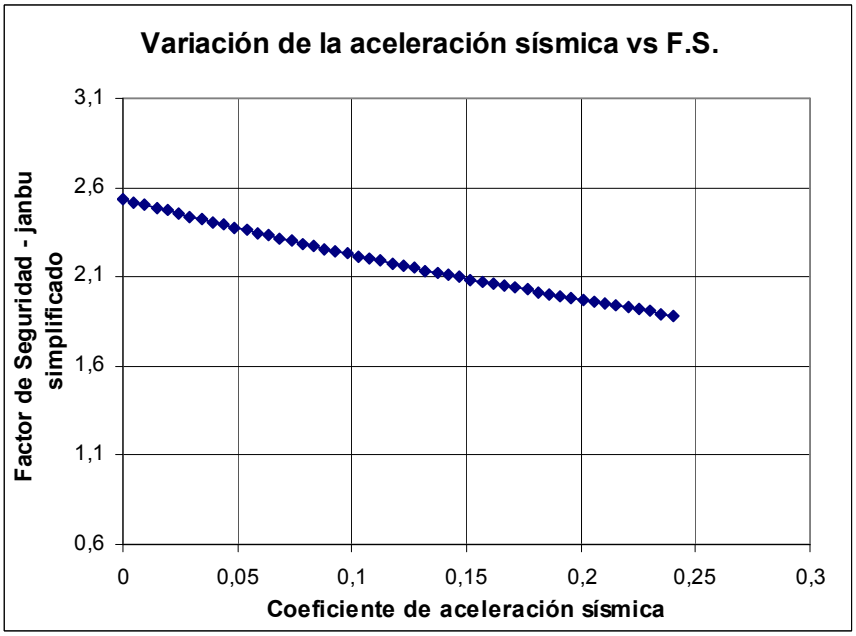


Figura 45. Análisis de sensibilidad del sismo en los análisis de estabilidad de STD5

Los factores de seguridad varían entre 2,4 y 2,9 con probabilidades de falla de 0,0%. Como puede observarse en la **Figura 46.**

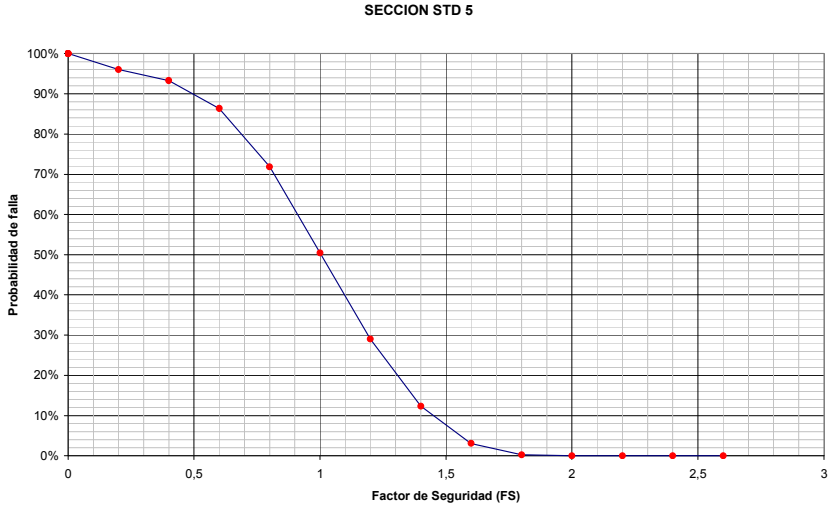


Figura 46. Probabilidad de falla vs Factor de seguridad de STD5

7.2.6 Categorización de la amenaza

Para el caso de los suelos la amenaza se definió con base en el factor de seguridad mínimo en cada una de las zonas analizadas (Lea-3, Lea-6 y Lea-7), de acuerdo con los criterios presentados en la **Tabla 49**; mientras que para el macizo rocoso se estableció a partir de la probabilidad de falla, a partir de los intervalos relacionados en la **Tabla 50**. Con base en los resultados obtenidos se realizó el plano de amenaza por deslizamientos rotacionales y traslacionales, en el caso de los suelos, y el mapa de amenaza por falla planar en el caso del material rocoso, ver plano **GE 147-PL1-11** y plano **GE 147-PL1-12** respectivamente. En el plano **GE 147-PL1-13** se presenta la zonificación definitiva de amenaza por fenómenos de remoción en masa.

Tabla 49. Categorización de la amenaza en la zona de estudio

	Factor de seguridad
Alta	FS menor o igual a 1,2
Media	FS entre 1,2 y 1,9
Baja	FS mayor o igual a 1,9

Tabla 50. Categorización de la Amenaza (adaptado de González y Millán, 1999)

Probabilidad de falla		**Categoría de amenaza**	
DE	A		
0.443	0.957	ALTA	A
0.126	0.443	MEDIA	M
0.004	0.126	BAJA	B

8 EVALUACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD FISICA Y SOCIAL

8.1 Vulnerabilidad

Dado que el objeto del trabajo es el mejoramiento de las condiciones del hábitat del sector y que, por ende, el principal elemento a evaluar son las viviendas (las cuales implican indirectamente a las personas que las habitan), los análisis de vulnerabilidad se encaminaron a determinar los posibles daños en las edificaciones. Para tal efecto, la vulnerabilidad se basó en el cálculo del denominado Índice de Vulnerabilidad Física (IVF), utilizando para tal efecto la metodología propuesta por Leone[5] y modificada por Soler et al[6]. En resumen, el trabajo consistió en:

- Clasificar la tipología de vivienda a nivel lote, determinando el nivel de daño que presenta actualmente la vivienda. Esta información se obtuvo de las encuestas realizadas.
- Calcular los índices de vulnerabilidad física (IVF), dependiendo del tipo de movimiento, la intensidad de las solicitaciones y las características del elemento expuesto (viviendas).

8.1.1 Tipificación de las viviendas

En forma general, la vulnerabilidad es una función tanto de la intensidad del fenómeno como de la resistencia del elemento expuesto. La primera variable consiste en la evaluación de la amenaza; para la segunda variable (resistencia del elemento expuesto), se obtendrá una tipificación de las viviendas teniendo en cuenta los siguientes criterios de resistencia de la estructura (ver **Tabla 51**).

Tabla 51. Criterios de resistencia de las estructuras según el tipo de solicitación[7]

Tipo de solicitación	Modos de daño	Criterio de resistencia de la estructura
Desplazamientos laterales	Transporte. Deformación. Asentamientos. Ruptura.	Profundidad de la cimentación. Arriostramiento de la estructura.
Empujes laterales	Deformación. Ruptura.	Altura de la estructura. Profundidad de la cimentación. Refuerzo.
Impactos	Deformación. Ruptura.	Refuerzo.

[5] Leone, F. (1999) Concept de vulnerabilite appliquea L'evaluation des risques generes par les phenomenes de mouvements de terrein. Tesis de doctorado, Universidad de Grenoble.

[6] Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

[7] Adaptado de Leone (1996)

Teniendo en cuenta los criterios expuestos anteriormente, se decidió adoptar para tipificar las viviendas el criterio de Leone, el cual se resume en la **Tabla 52**.

Tabla 52. Clasificación de la tipología de vivienda

TIPO EDIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
B1	Tugurios (ranchos).
B2	Casas en mampostería o prefabricadas.
B3	Casas de hasta dos niveles de buena calidad de construcción (con estructura).
B4	Casas de más de dos niveles de buena calidad de construcción (con estructura).

Además, se identificaron los lotes donde no hay viviendas como LV ("lotes vacíos").

En el plano **GE 147-PL1-14** se presenta la tipología de cada una de las viviendas encontradas en la zona de estudio, para la fecha de realización de las encuestas (Julio de 2006).

8.1.2 Zona recreativa

En el proyecto fue considerada la vulnerabilidad de la zona recreativa (cancha múltiple) del barrio, la cual se ubica hacia el centro del mismo. Esta vulnerabilidad se cuantifico estimando una población flotante aproximada de 50 personas que puede localizarse en la zona expuesta a los deslizamientos y a la caída de bloques de roca. Actualmente en esta zona se presenta evidencias de un deslizamiento proveniente de la parte alta deslizándose en sentido sur – norte, por lo tanto, presenta un alto grado de exposición ante un evento de deslizamiento pudiendo ser arrastrada más de la mitad de su área. Por esta razón le fue asignado un grado de vulnerabilidad medio.

8.2 Inventario de viviendas

El estudio de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, en este caso las viviendas, se realizó utilizando como instrumento de recolección el "Formulario para la evaluación de daños y estado en edificaciones por fenómenos de remoción en masa". El formato está compuesto por 4 secciones: La primera de ellas denominada: Datos Generales, comprende información concerniente al propietario, a la ubicación espacial y catastral de los predios; a las características orgánicas de las viviendas; al tipo de construcción y su uso, concordante con la clasificación del CIAF (cuarto nivel de detalle). La segunda: Condición Estructural, indaga acerca de las características de fundación y de estructura de las construcciones así como de su calidad constructiva. La tercera titulada: Daños, se enfoca hacia la categorización de las averías o expresiones "patológicas" (a priori) en elementos estructurales y no estructurales, a la auscultación sobre filtraciones, y al planteamiento de alguna medida a priori de acuerdo con lo observado. Y la última condensa datos enmarcados en el contexto social. Finalmente, contiene un espacio para observaciones, en las que se plasman comentarios de los

habitantes o apreciaciones del aforador que en alguna medida contribuyen al estudio. En el **ANEXO VII** se disponen los formatos de inventario de las viviendas y un resumen de los resultados de las encuestas realizadas en los diferentes sectores donde se destacan el número de viviendas, el número de habitantes, el número de pisos, las tipologías de las viviendas, los tipo de sistema estructural, el tipo de cimentación, las características del terreno de fundación, la evaluación de daño y el estado de las edificaciones del proyecto.

De las encuestas realizadas puede concluirse lo siguiente:

1. El promedio de habitantes por casa es de 7 personas, las cuales en su gran mayoría son adultos.
2. Un poco mas del 33% de las viviendas corresponden a viviendas de un solo piso, el 29% de las viviendas son de dos pisos y el 11% de las viviendas son de tres pisos.
3. El 8% de las viviendas corresponden a tugurios o ranchos, el 50% de las viviendas corresponden a viviendas en mampostería o prefabricadas y tan solo el 19% de las viviendas pueden considerarse con buena calidad de construcción, el resto corresponde a lotes vacíos.
4. El sistemas estructural predominante corresponde a un sistema estructural con muros portantes confinados en un 61%, posteriormente con un 27%, el sistema estructural corresponde a muros portantes no confinados.
5. La cimentación de las viviendas en su mayoría corresponde a una cimentación con concreto ciclópeo y vigas de amarre. En un 45% es inexistente.
6. El índice de daño presentado en las viviendas corresponde en su mayoría a un grado 1 (daños ligeros no estructurales) le siguen con un 12% el grado 2 (figuración de muros) y el grado 3 (deformaciones importantes, daños en elementos estructurales) con un 3%. En un 0.4% de las viviendas el grado de daño corresponde a un grado 5 (Derrumbe parcial o total de la estructura).

8.3 Calificación de los daños

En la metodología propuesta por Leone, para calificar los daños producidos en las viviendas por fenómenos de remoción en masa se sigue al criterio del DRM (Délégation aux Risques Majeurs), el cual divide los daños en cinco (5) categorías, a saber:

Tabla 53. Clasificación de los daños según el DRM

Índice de daño	Tipo de daño	Porcentaje de daño
I	Daños ligeros no estructurales. Estabilidad no afectada.	0.0 - 0.1
II	Fisuración de paredes (muros). Reparaciones no urgentes.	0.2 - 0.3
III	Deformaciones importantes. Daños en elementos estructurales.	0.4 - 0.6
IV	Fracturación de la estructura. Evacuación inmediata.	0.7 - 0.8
V	Derrumbe parcial o total de la estructura.	0.9 - 1.0

El porcentaje de daño o índice de pérdidas (IP) lo define Leone, como:

$$IP = \frac{(Vi - Vf)}{Vi}$$

Donde,

Vi: Valor inicial del bien (antes del evento).
Vf: Valor final del bien (después del evento).

Para tener en cuenta el estado actual de las viviendas (de acuerdo con la calidad de la estructura), se determinó para cada una de las edificaciones del barrio el Índice de Daño Actual (IDa).

8.3.1 Solicitaciones

8.3.1.1 *Tipos de movimientos y solicitaciones*

El tipo de solicitaciones depende de la localización del elemento expuesto en referencia al sitio donde ocurre el fenómeno[8], tal como se presenta a continuación.

[8] Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). ***Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia.*** XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

a) Deslizamientos

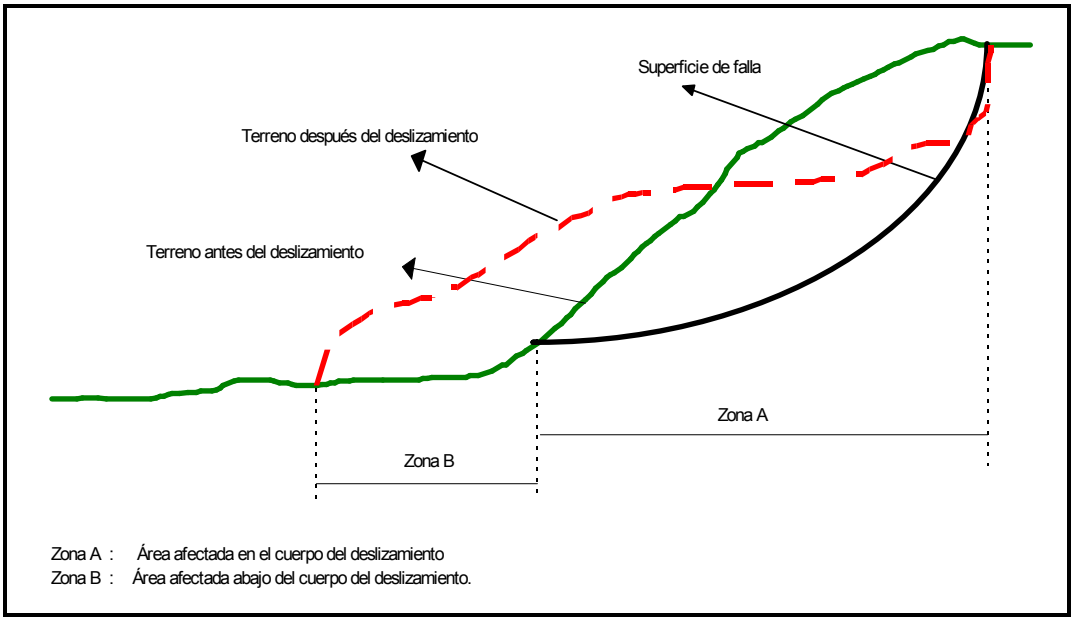


Figura 47. Esquema de deslizamiento

Como se puede observar en la **Figura 47**, se pueden distinguir dos zonas.

En la Zona A (en el cuerpo del deslizamiento) o Zona de Influencia Directa, los daños que van a sufrir las viviendas se pueden relacionar con los desplazamientos laterales (DL) que, a su vez, dependen de la velocidad del movimiento (entre más rápido, los daños pueden ser mayores). Para la caracterización de las velocidades de los movimientos se utilizó la escala propuesta por Cruden y Varnes[9], presentada a continuación.

Tabla 54. Rangos de velocidad utilizadas en el estudio

Descripción	Clase	Velocidad característica
Muy rápido	VM1	Mayor a 50 mm/s
Rápido	VM2	Entre 0,5 mm/s y 50 mm/s
Moderado	VM3	Entre 0,05 mm/s y 0,5 mm/s
Lento	VM4	Entre 0,005 mm/s y 0,05 mm/s
Muy lento	VM5	Menor a 0,005 mm/s

En las zonas abajo del cuerpo del deslizamiento o zonas de influencia indirecta, los daños de las viviendas se pueden relacionar con los empujes laterales (EL) que, igualmente, se pueden asociar con la altura que alcanza la acumulación de material contra la vivienda, así:

[9] Cruden , D. y Varnes D.(1991). ***Landslides types and processes.*** Universidad de Alberta.

Tabla 55. Categorías de presione laterales utilizadas en el estudio

Descripción	Clase	Característica
Presión lateral alta	PL1	Mayor a 2/3 de la altura de la vivienda
Presión lateral media	PL2	Entre 1/3 y 2/3 la altura de la vivienda.
Presión lateral baja	PL3	Menor a 1/3 de la altura de la vivienda

a) Caída de rocas

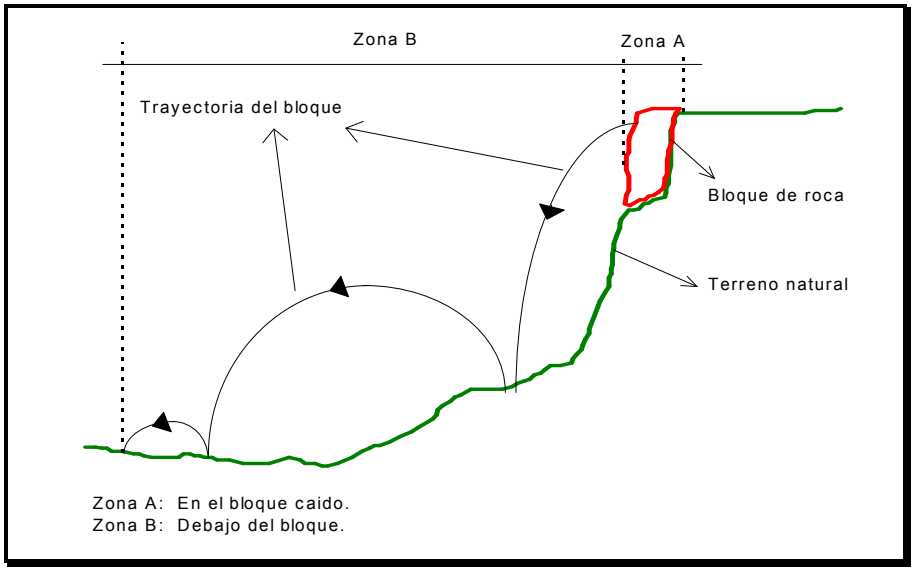


Figura 48. Esquema de caída de rocas.

De igual forma que en el caso anterior, se distinguen dos (2) zonas con diferentes tipos de solicitaciones (ver **Figura 48**). En la Zona A (dentro del bloque caído) o Zona de Influencia Directa, las viviendas sufrirán daños asociados con desplazamientos horizontales instantáneos. En la Zona B (debajo del bloque) o Zona de Influencia Indirecta, los daños en las viviendas se pueden asociar al impacto producido por el bloque, que se puede calificar por medio de la energía cinética del bloque.

Las solicitaciones en la Zona B se le asocian las siguientes categorías de solicitación, dependiendo de la energía cinética del bloque:

Tabla 56. Solicitaciones características de la zona de influencia indirecta por caída de rocas[10].

Categoría	Solicitación	Rangos de la energía cinética (Ec)
Muy baja	EC5	Ec < 1 Kj
Baja	EC4	1 kJ < Ec < 10 Kj
Media	EC3	10 kJ < Ec < 100 Kj
Alta	EC2	100 kJ < Ec < 1000 Kj
Muy Alta	EC1	Ec > 1000 kJ

[10] Adaptada de Leone (1996).

8.3.1.2 Matriz de daño

Se asocian los Índices de Daños Potenciales (IDp) ocasionados por un evento dado, de acuerdo tanto al tipo de solicitud (magnitud del evento) como a la tipología de la vivienda (resistencia del elemento expuesto). A continuación se presenta la matriz de daño utilizada.

Tabla 57. Matriz de daño utilizada en el estudio[11].

TIPO DE SOLICITACIÓN	CLASE DE SOLICITACIÓN	TIPOLOGÍA DE VIVIENDA			
		B1	B2	B3	B4
IMPACTOS	EC1	V	V	V	IV
	EC2	V	V	IV	III
	EC3	V	IV	III	II
	EC4	IV	III	II	I
	EC5	III	II	II	I
DESPLAZAMIENTOS LATERALES	VM1	V	V	V	IV
	VM2	V	V	IV	IV
	VM3	V	IV	III	III
	VM4	IV	III	III	II
	VM5	III	II	I	I
EMPUJES LATERALES	PL1	V	IV	III	III
	PL2	V	IV	III	II
	PL3	IV	III	II	I

8.3.2 Índice de vulnerabilidad física (IVF)

Para la cuantificación de los dos índices de daño determinados anteriormente (IDa y IDp) se utilizó la teoría de los conjuntos difusos (ver **Figura 49**), adoptando la metodología utilizada para la evaluación de daños durante sismos[12]; de esta forma se determina el porcentaje de daño o índice de pérdidas (IPa, asociado al IDa; y el IPp, asociado al IDp.

[11] Ver Tablas 4.3. para el tipo de daño y Tablas 3.2, 3.3 y 3.4 para el tipo de solicitación.

[12] Sánchez-Silva, M. Taylor, C.A. & Blockley, D.I. *HAZARD MANAGEMENT OF PROJECTS IN A EARTHQUAKE.* In: Applications of Statistics an Probability. Lemaire, Favre & Marbarki (eds). Balkema, Rotterdam. 1995.

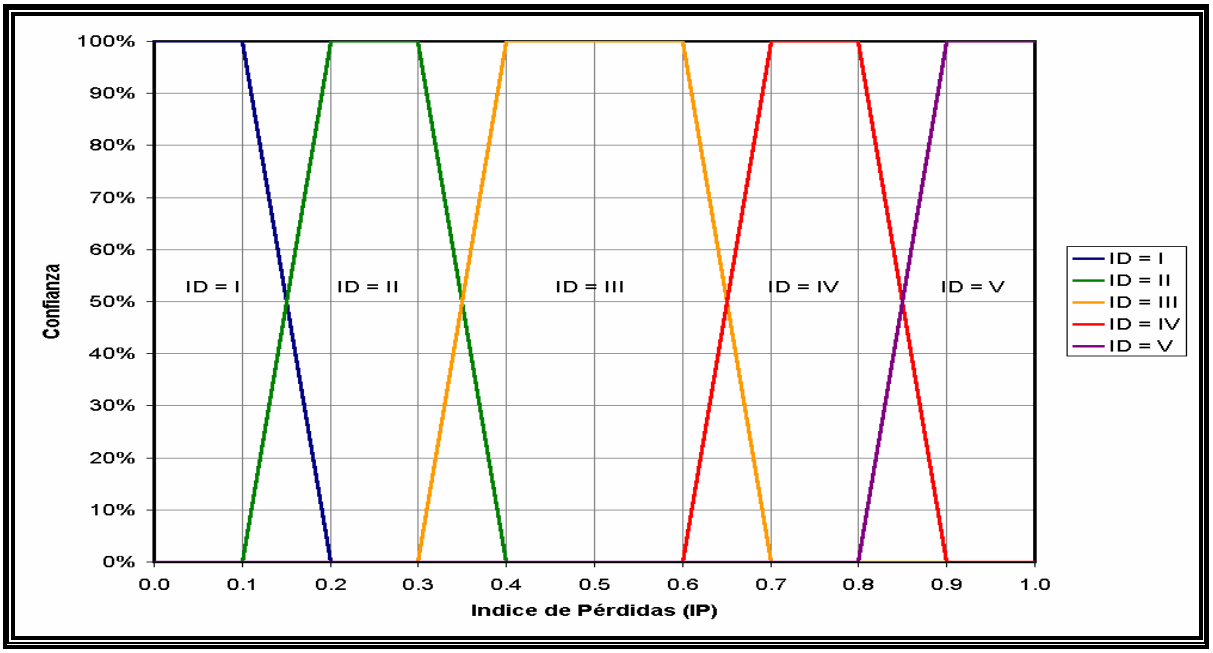


Figura 49. Valoración del ID utilizando conjuntos difusos

En teoría, la evaluación de la vulnerabilidad debería estar dada como la probabilidad de los daños debido al fenómeno dado una condición o predisposición del elemento expuesto. Si se está evaluando la vulnerabilidad física, determinada como un Índice de Vulnerabilidad Física (IVF), teniendo en cuenta los dos índices de pérdidas definidos anteriormente (IPa e IPp), se debe evaluar el índice de pérdidas; lo expuesto se puede expresar probabilísticamente como:

$$IVF = P(IPp/IPa)$$

Esta expresión es muy difícil de evaluar ya que las variables involucradas (IPp e IPa) son dependientes; es por ello que, para la valoración de la vulnerabilidad física ante fenómenos de remoción en masa (IVF) se utilizó la expresión empírica propuesta por Soler et al[13] para involucrar otras variables diferentes al tipo de solicitación y la tipología de vivienda. De esta forma:

$$IVF = \left[1-(1-IPp)^{\frac{1}{(1-\alpha\, IPa)}} \right]^{(1-\alpha\, IPa)}$$

Donde α es la dependencia o importancia del IPa en la valoración del IVF (0 cuando es mínima y 1 cuando es máxima). Como ejemplo, a continuación se presenta en la **Figura 50** la relación entre el IPp y el IPa con el IVF para un α=0,6.

[13] Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

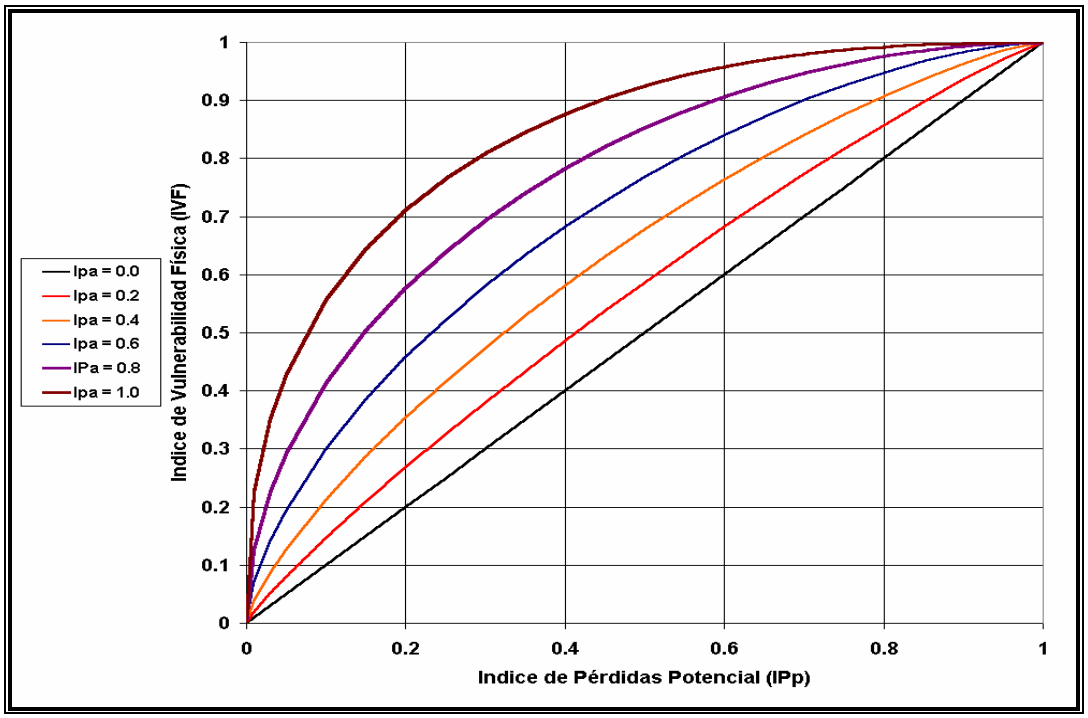


Figura 50. Gráfica para determinar IVF con un α=0,6

Para la selección del valor de α se utilizaron los siguientes criterios, dependiendo del grado de amenaza por fenómenos de remoción en masa a que esté sometida la estructura.

Tabla 58. Selección del valor de α

Grado de amenaza	Valor de α
Muy Baja	0.0
Baja	0.2
Media	0.4
Alta	0.6
Muy Alta	0.8

Es de notar que, por cada uno de los lotes existen dos IVF (máximo y mínimo) que determinan la incertidumbre del modelo.

8.3.3 Resultados obtenidos

Con base en los resultados de los análisis de vulnerabilidad, se procedió a categorizar el valor del IVF de acuerdo con criterios establecidos en estudios previos realizados en

Bogotá por F. Soler, A. J. González y otros, los cuales se presentan en la **Tabla 59**. Los resultados se plasman en el Plano **GE 147-PL1-15**.

Tabla 59. Criterios de categorización de la vulnerabilidad ante deslizamientos

Vulnerabilidad ante deslizamientos	Criterio	Descripción
ALTA	IVF promedio ≥ 0.65	La probabilidad de pérdidas materiales es mayor al 65% en caso de ocurrencia de un deslizamiento.
MEDIA	0.35 ≤ IVF promedio < 0.65	La probabilidad de pérdidas materiales está entre el 35% y el 65% en caso de ocurrencia de un deslizamiento.
BAJA	IVF promedio < 0.35	La probabilidad de pérdidas materiales es menor al 35% en caso de ocurrencia de un deslizamiento.

Las viviendas con grado de vulnerabilidad medio son:

- Ladera en depósito al norte de la quebrada (STD3):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
29	JESUS FERNANDO LOPEZ	CRA 9A 162C-20 INT 2
30	CERAFIN LOPEZ	CRA 9A 162C-20
31	MARIA GARZON	CRA 9A 162C-12
32	JOSE LA VERDE	CRA 9A 162C-06

Las viviendas con grado de vulnerabilidad alto son:

- Ladera Aguas Arriba de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
80	JUNTA DE ACCION COMUNAL	SIN DIRECCIÓN

- Ladera Aguas Abajo de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
33	MUSENO VELANDIA	CLL 162BIS CRA 9A
38	DESCONOCIDO	SIN DIRECCION
39	DESCONOCIDO	CLL 160C 9-12

- Ladera superior, central (Sección STR1 y STD4):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
64	GUILLEVARDO HERNANDEZ	CRA 8A 161A-40
65	LUZ HERNANDEZ	CRA 8A 161-40
72	JOSE MARIA INVAJOA	CRA 8 BIS A 162-19
73	MARIA EUGENIA MENDEZ	CRA 8C 162-13
74	JOSE HECTOR NIÑO	CRA 8C 162-80

9 RIESGO POR DESLIZAMIENTOS

9.1 Método de análisis

El denominado riesgo (económico, social o ambiental, según sea el sector que represente al usuario) se puede simular mediante el modelo dinámico del tipo integral (Rivera, 2001):

$$R_{E,\,S,\,A} = \int P(e)\ \mathrm{P}_{(E,\,S,\,A)}$$

en donde,

$R_{E,\,S,\,A}$ Es el riesgo ya sea económico (E), social (S) o ambiental (A).

$P(e)$ Es la probabilidad cuantitativa del evento que se pronostica; denominado también amenaza (H).

$\mathrm{P}_{(E,\,S,\,A)}$ Es la pérdida en el sector ya sea económico (E), social (S) o ambiental (A) que se relaciona con el evento natural que se predice; también se suele denominar vulnerabilidad (V).

Para el caso en estudio, y una vez obtenida la amenaza y la vulnerabilidad, se puede estimar el riesgo físico individual de cada edificación definiendo el índice de riesgo (IR) como:

$$IR = P_f \cdot IVF$$

Teniendo en cuenta que la amenaza se definió como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y la vulnerabilidad como un índice de pérdidas, representado como un conjunto difuso, el índice de riesgo también es un conjunto difuso que, para el caso utilizado de conjuntos difusos trapezoidales, se puede representar por la función presentada en la **Figura 51**.

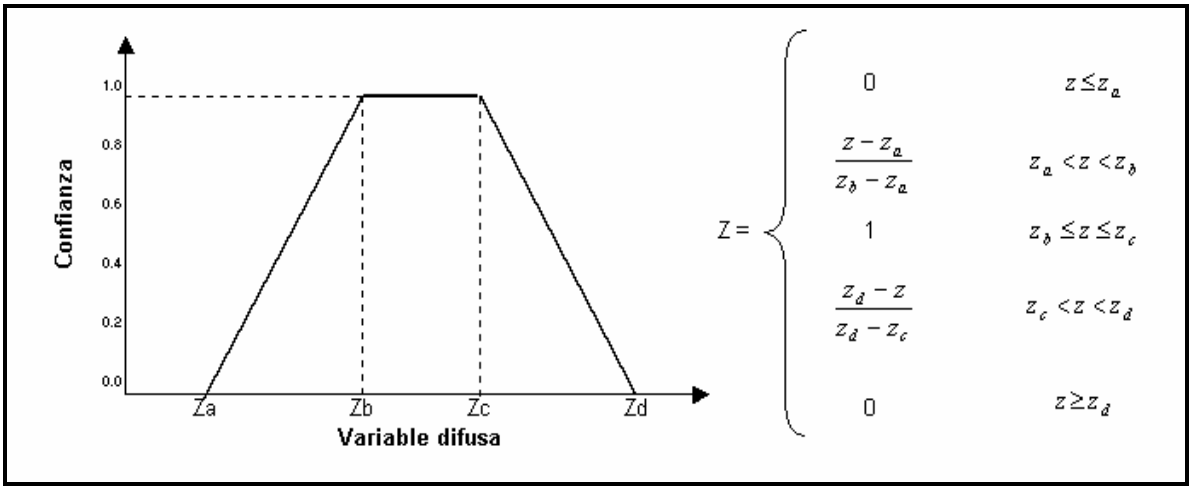


Figura 51. Conjuntos difusos trapezoidales

Una vez calculado el índice de riesgo representado como una variable difusa se puede calcular el riesgo como la probabilidad de excedencia de las pérdidas, habiendo dos posibilidades de calcularla:

9.1.1 Hipótesis 1

En este caso se pueden determinar la esperanza y la varianza del factor de seguridad como el primer momento y el radio de giro con respecto a la media de la función difusa, respectivamente. Es decir,

Media

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} z \cdot f(z)\, dz \,, \qquad \text{para la esperanza o media.}$$

Para el conjunto difuso trapezoidal se tiene que:

$$\mu = z_a + \frac{1}{A}\left[\frac{4\,A_1^{\,2}}{3} + A_2\left(\frac{A_2}{2} + 2\,A_1\right) + A_3\left(A_2 + 2\,A_1 + \frac{2\,A_3}{3}\right)\right]$$

Donde,

$$A_1 = \frac{z_b - z_a}{2}$$

$$A_2 = z_c - z_b$$

$$A_3 = \frac{z_d - z_c}{2}$$

$$A = A_1 + A_2 + A_3$$

Varianza

$$V(z) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (z-\mu)^2 \cdot f(z)\, dz$$

Para el conjunto difuso trapezoidal

$$\sigma^2 = \frac{I_\mu}{A} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{A}$$

Donde,

$$I_1 = \frac{(z_b - z_a)^3}{36} + A_1 \left[\mu - \left(\frac{2z_b + z_a}{3} \right) \right]^2$$

$$I_2 = \frac{(z_c - z_b)^3}{12} + A_2 \left[\mu - \left(\frac{z_c + z_b}{2} \right) \right]^2$$

$$I_3 = \frac{(z_d - z_c)^3}{36} + A_3 \left[\mu - \left(\frac{z_d + 2z_c}{3} \right) \right]^2$$

Con la esperanza (o media) y la desviación estándar del IR se puede calcular la probabilidad de excedencia de cierto valor de referencia (que son las pérdidas admisibles por el decidor, es decir un riesgo aceptado, y denominado en este estudio IRo), ajustándolo a una función de distribución de probabilidad (se debe a la de mejor ajuste, ya bien sea normal, log-normal, beta, etc.).

9.1.2 Hipótesis 2

Se calcula la probabilidad de excedencia de un valor dado como,

$$R = \frac{\int_{IR_0}^{\infty} Z\, dz}{\int_{-\infty}^{\infty} Z\, dz} \qquad Z \equiv IR$$

Para un conjunto difuso trapezoidal, la anterior ecuación da como resultado lo presentado en la **Figura 52**.

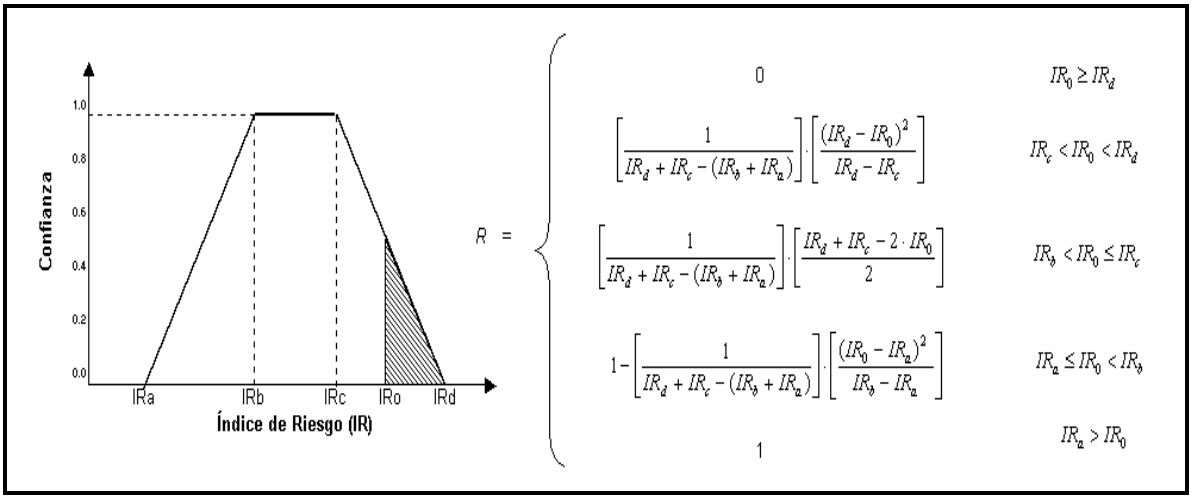


Figura 52. Cálculo del riesgo por conjuntos difusos trapezoidales

9.2 Criterios aplicados y resultados obtenidos

Para el caso de estudio se aplicó la Hipótesis 1, determinando los niveles de riesgo según la probabilidad de excedencia de las pérdidas probables admisibles (IRo), definidas en un 10%, de acuerdo con los criterios establecidos en la **Tabla 60**.

Tabla 60. Categorización del riesgo

Nivel de riesgo	Criterio
Bajo	La probabilidad de excedencia de las pérdidas máximas admisibles (definidas como 10%, valor de IRo) es menor al 2%.
Medio	La probabilidad de excedencia de las pérdidas máximas admisibles (definidas como 10%, valor de IRo) está entre el 10% y el 2%
Alto	La probabilidad de excedencia de las pérdidas máximas admisibles (definidas como 10%, valor de IRo) es mayor al 10%.

En el Plano **GE 147-PL1-16** se presenta la categorización del riesgo para cada uno de las edificaciones existentes en el área de estudio. En el **ANEXO VIII-A** se presenta los resultados de los cálculos obtenidos.

9.3 Viviendas afectadas:

De acuerdo con la metodología anteriormente descrita, las viviendas con grado de riesgo medio y alto se enumeran a continuación:

- Ladera Aguas Arriba de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
80	JUNTA DE ACCION COMUNAL	SIN DIRECCIÓN
--	ZONA RECREATIVA	--

El costo total aproximado de los predios es de: $ 116 000 000

- Ladera Aguas Abajo de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
33	MUSENO VELANDIA	CLL 162BIS CRA 9A
38	DESCONOCIDO	SIN DIRECCION
39	DESCONOCIDO	CLL 160C 9-12

El costo total aproximado de los predios es de: $ 144 000 000

- Ladera en depósito al norte de la quebrada (STD3):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
29	JESUS FERNANDO LOPEZ	CRA 9A 162C-20 INT 2
30	CERAFIN LOPEZ	CRA 9A 162C-20
31	MARIA GARZON	CRA 9A 162C-12
32	JOSE LA VERDE	CRA 9A 162C-06

El costo total aproximado de los predios es de: $ 120 000 000

- Ladera superior, central (Sección STR1 y STD4):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
64	GUILLEVARDO HERNANDEZ	CRA 8A 161A-40
65	LUZ HERNANDEZ	CRA 8A 161-40
72	JOSE MARIA INVAJOA	CRA 8 BIS A 162-19
73	MARIA EUGENIA MENDEZ	CRA 8C 162-13
74	JOSE HECTOR NIÑO	CRA 8C 162-80

El costo total aproximado de los predios es de: $ 265 000 000

- Corredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
29	JESUS FERNANDO LOPEZ	CRA 9A 162C-20 INT 2
30	CERAFIN LOPEZ	CRA 9A 162C-20

El costo total aproximado de los predios es de: $ 91 000 000

10 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN

10.1 DESCRIPCION DE LAS ALTERNATIVAS DE MITIGACION

El planteamiento de las alternativas de mitigación fue realizado tomando como base la zonificación y la caracterización del riesgo definido para el área en estudio. A continuación se describen las alternativas para cada una de las laderas en que se generan procesos de remoción en masa, los esquemas de estas alternativas pueden ser observados en los planos **GE 147-PL1-17** a **GE 147-PL1-20** Las alternativas se dividieron en cinco (5) zonas, descritas a continuación:

Tabla 61. Descripción zonas de intervención.

ZONA	LOCALIZACION	DESCIPCION DE LA AMENAZA ACTUAL	F.S. PROMEDIO	PROBABILIDAD DE FALLA ACTUAL	PERDIDAS ESPERADAS[14]
1	LADERA AGUAS ARRIBA ZONA RECRETIVA	Deslizamiento rotacional	1,23	25,10%	$ 232 000 000
2	LADERA AGUAS ABAJO ZONA RECRETIVA	Deslizamiento rotacional	1,29	19,80%	$ 288 000 000
3	LADERA EN DEPOSITO AL NORTE DE LA QUEBRADA	Deslizamiento rotacional	1,35	11,30%	$ 240 000 000
4	LADERA SUPERIOR CENTRAL	Falla planar	1,35	7,10%	$ 530 000 000
5	CORREDOR PARALELO AL ESCARPE ROCOSO	Caida de bloques	1,14	28,00%	$ 182 000 000

10.1.1 Zona 1: Ladera Aguas Arriba de la cancha (Secciones STD1 y STD2)

- Alt 1. Terráceo, drenaje superficial y muro en gaviones

Retirar el material deslizado sobre la cancha y construir un muro en gaviones de 3 metros de altura y 3 m de base, como obra de contención. Que debe quedar recubierto en geotextil no tejido hacia la cara posterior.

A partir de la obra de contención conformar terrazas con bermas de 3 m de ancho y taludes de 2 m de altura y con inclinación 1,5H:1V, hasta que se intercepte con la roca. En cada explanación se deberán dejar cunetas que recojan el agua de escorrentía y eviten su infiltración. Con el mismo fin, se deberán empradizar los taludes y las bermas, y dejar bombeos hacia las obras de drenaje.

- Alt 2. Drenaje subsuperficial y muro en gaviones

Disponer sobre la ladera trincheras drenantes de 2,0 m de altura y 0,6 m de ancho, en forma de espina de pescado con el fin de drenar el depósito.

Retirar el material deslizado sobre la cancha y construir un muro en gaviones de 3 metros de altura y 3 m de base, como obra de contención. Que debe quedar recubierto en geotextil no tejido hacia la cara posterior.

[14] Se refiere al costo de las perdidas materiales.

10.1.2 Zona 2: Ladera Aguas Abajo de la cancha (Secciones STD1 y STD2)

- Alt. 1 Contención de la cancha con muro de gaviones, subdrenaje y muro en gaviones inferior

Instalar en el borde noroccidental de la cancha se construirá un muro de gaviones de dos niveles, con el fin de cortar la superficie de falla que se genere en este sector y de reconformar los sitios donde se evidencian procesos de erosión al borde de la explanación. A su vez, se debe retirar la cuña de material que cubra los dos metros de los gaviones. El drenaje consistirá en trincheras, en forma de espina de pescado, aguas abajo del terráceo.

Hacia la parte baja se deberá construir otro muro en gaviones que no permita la movilización del sector del depósito localizado aguas debajo de los pilotes.

- Alt. 2 Anclajes, terráceo, subdrenaje, drenaje superficial y muro en gaviones

Hacia el borde noroccidental de la cancha efectuar un corte de tres metros de altura, sobre el cual se construirá una fila de anclajes de aproximadamente 20 m de longitud; y a partir de este conformar dos taludes a 45°, de 2,5 m de altura, espaciados por una berma de 3,0 m de ancho y finalizar la descarga con una explanación de aproximadamente 3,6 m de ancho hasta que corte la superficie del terreno.

En la parte interna de las bermas se deberán construir cunetas que colecten y conduzcan la escorrentía. El subdrenaje se debe complementar con trincheras, en forma de espina de pescado, aguas abajo del terráceo, que lleguen hasta la roca, por lo que tendrán profundidades entre 2 y 3 m de altura.

Finalmente se debe emplazar un muro en gaviones hacia la parte baja de la ladera, que tenga 3,5 m de altura y 3 m de ancho, revestido en geotextil no tejido hacia la parte interna de la estructura.

10.1.3 Zona 3: Ladera en depósito al norte de la quebrada San Cristóbal (STD3)

- Alt. 1. Terráceo y trincheras drenantes

En este caso el terráceo mantendrá un ancho de las bermas de 5,0m, los taludes están definidos con inclinación 2H:1V y alturas de dos metros; igualmente se extenderá hasta el talud rocoso. Con esta configuración se logra manejar trincheras en el interior de cada berma, con alturas que permitan llegar al substrato rocos, entre 1 y 2,0 m de profundidad y 0,6 m de ancho, previa instalación de las cunetas.

- Alt. 2. Terráceo y drenes horizontales

Desde la parte baja de la ladera conformar el terráceo, con bermas de cinco m de ancho y taludes de tres metros de altura, con pendiente 1,5H:1V, hasta que se

intersecte con el escarpe rocoso producto de las actividades mineras del pasado. Adicionalmente, en todas las explanaciones se construirán cunetas hacia la parte interna.

En la primera y segunda berma se dejarán drenes horizontales para secar el depósito de 18 y 15 m de longitud, respectivamente. Adicionalmente, en todas las explanaciones se construirán cunetas hacia la parte interna.

10.1.4 Zona 4: Ladera superior, central (Sección STR1 y STD4)

- Alt 1. Fila de anclajes

Sobre el escarpe, se implementarán dos filas de anclajes de 8,5 y 12,5 m de longitud respectivamente, espaciados cada 2 m, con el fin de controlar la falla planar que se pueda generar por nivel guía arcilloso.

- Alt 2. Drenaje subterraneo

Instalar cuatro filas de drenes horizontales entre 6.5 y 25.5 m del escarpe, a una profundidad de 25 m, espaciados cada 3 m y con una inclinación de 5°. Se deben conformar con tubería en pvc de 4” perforada y recubierta en geotextil no tejido.

10.1.5 Zona 5: Lorredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior

- Alt 1. Malla eslabonada

Como primera alternativa se sugiere la colocación de una malla eslabonada pernada a todo lo largo del escarpe para evitar el desprendimiento de los bloques.

- Alt 2. Barrera parapeñascos

Al considerar que el escarpe rocoso se desprenden bloques, se propone la construcción de una malla de aislamiento que limite la zona de riesgo o como alternativas una barrera que intercepte los fragmentos de roca durante las caídas.

En general como tercera alternativa se considero la reubicación de las viviendas con riesgo de afectación medio o alto. Tomando un valor de confiabilidad del 50% debido a los factores sociales y temporales para realizar esta reubicación.

10.2 EVALUACION COMPARATIVA DE LAS ALTERNATIVAS DE MITIGACION

Para cada una de las alternativas descritas en el numeral anterior fue realizada una comparación de las mismas por medio de una evaluación económica en donde se tuvo en cuenta su eficacia con respecto a la condición actual. Para esta evaluación

probabilística fue requerido realizar cálculos de estabilidad con las obras de mitigación propuestas, con el fin de determinar los factores de seguridad y probabilidades de falla. Dicha evaluación económica se puede calcular como el costo esperado de las obras más las pérdidas acontecidas por la falla de la obra, así:

$$E(A_i) = C_{0i} + P_{fi}\,(C_{0i} + C_d)$$

en donde:

$E(A_i)$ = costo esperado de las obras mas el costo de las pérdidas debido a la falla de la alternativa *i* (pesos)
C_{0i} = costo de la alternativa de mitigación *i* (pesos)
C_d = costo de la los daños probables y reparaciones (pesos)
P_{fi} = probabilidad de falla del talud afectado con la alternativa de mitigación *i,* en la vida útil.

De otra parte, la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento para un período de exposición dado (Td, o vida útil del proyecto) será:

$$P_{Fi} = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{Td}$$

Donde Tr es el período de retorno (inverso de la probabilidad de falla anual) del deslizamiento.

Los resultados de los cálculos se presentan en la **Tabla 62**, estimando una vida útil de 50 años. Los resultados de la evaluación se presentan en el **ANEXO IX – A**.

Tabla 62. Cuadro comparativo de alternativas de mitigación

ZONA	ALT.	F.S. PROMEDIO	PROBABILIDAD DE FALLA CON OBRA ANUAL	PROBABILIDAD DE FALLA CON OBRA VIDA UTIL	[15]COSTO OBRA INTERVENCION	COSTO ESPERADO
1: LADERA AGUAS ARRIBA ZONA RECRETIVA	1	1,86	0,3%	13,9%	$ 170 364 000	$ 186 545 000
	2	2,49	0,0%	0,0%	$ 74 294 000	$ 74 294 000
	3	1,23	25,10%	100%	$ 0	$ 232 000 000
2: LADERA AGUAS ABAJO ZONA RECRETIVA	1	1,85	1,2%	16,6%	$ 86 837 000	$ 110 689 000
	2	2,05	0,4%	9,5%	$ 112 152 000	$ 126 468 000
	3	1,29	19,80%	100%	$ 0	$ 288 000 000
3: LADERA EN DEPOSITO AL NORTE DE LA QUEBRADA	1	3,52	0,0%	0,0%	$ 156 580 000	$ 156 580 000
	2	2,57	0,0%	0,0%	$ 267 709 000	$ 267 709 000
	3	1,35	11,30%	100%	$ 0	$ 240 000 000
4: LADERA SUPERIOR CENTRAL	1	> 5,0	0,0%	0,0%	$ 110 800 000	$ 110 800 000
	2	1,35	0,1%	3,4%	$ 121 500 000	$ 130 618 000
	3	1,35	7,10%	100%	$ 0	$ 530 000 000
5: CORREDOR PARALELO AL ESCARPE ROCOSO	1	> 5,0	0,0%	0,0%	$ 820 080 000	$ 820 080 000
	2	---	0,5%	22,2%	$ 74 970 000	$ 95 144 000
	3	1,14	28,00%	100%	$ 0	$ 182 000 000

[15] El costo definitivo de las obras seleccionadas se describen en el capitulo detallado de obras.

Como puede concluirse de la **Tabla 62**, todas las alternativas propuestas reducen la probabilidad de ocurrencia de una inestabilidad con respecto a la condición actual del escarpe (sin obras).

Con base en los prediseños de las alternativas fue calculado para cada zona el costo aproximado de cada una de ellas. La comparación de las diferentes alternativas para cada zona tomó como parámetros la probabilidad de ocurrencia de una inestabilidad después de construidas las obras, el costo de las mismas y el beneficio obtenido.

La comparación de las alternativas para cada zona considerando estos criterios se presenta en el **ANEXO IX – A**. Finalmente la alternativa seleccionada corresponde a la alternativa que presente el menor costo esperado.

10.3 ALTERNATIVAS DE MITIGACION RECOMENDADAS

Por las razones anteriormente expuestas, se recomienda para la ladera aguas arriba de la cancha la Alternativa No. 2, consistente en el drenaje subsuperficial y el muro en gaviones. Para la ladera aguas debajo de la cancha se recomienda la alternativa No. 1, consistente en la cortina de pilotes, subdrenaje y muro en gaviones. Para la ladera en depósito al norte de la quebrada se recomienda la alternativa No. 1, consistente en terraceo y trincheras drenantes. Para la ladera superior central se recomienda la alternativa No. 1, consistente en la construcción de un sistema de anclajes y finalmente para el corredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior, se recomienda la alternativa No. 2, consistente en la barrera parapeñascos. En el plano **GE 147-PL1-21** se presenta la zonificación de la amenaza con obras para la zona del proyecto.

Tabla 63. Cuadro de alternativa seleccionada

ZONA	ALT.	F.S. PROMEDIO	PROBABILIDAD DE FALLA CON OBRA ANUAL	COSTO ESPERADO OBRA
1: LADERA AGUAS ARRIBA ZONA RECRETIVA	2	2,49	0,0%	$ 74 294 000
2: LADERA AGUAS ABAJO ZONA RECRETIVA	1	1,85	1,2%	$ 110 689 000
3: LADERA EN DEPOSITO AL NORTE DE LA QUEBRADA	1	3,52	0,0%	$ 156 580 000
4: LADERA SUPERIOR CENTRAL	1	>5,0	0,0%	$ 110 800 000
5: CORREDOR PARALELO AL ESCARPE ROCOSO	2	---	0,5%	$ 95 144 000

11 DISEÑO DETALLADO DE OBRAS Y MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

11.1 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS

Para la mitigación de riesgo se han planteado obras en las diferentes zonas de análisis, las cuales tendrán como propósito incrementar los factores de seguridad frente al deslizamiento y la caída de bloques de roca, como puede observarse en la **Tabla 63**.

La localización de las obras propuestas puede observarse en el Plano **GE 147-PL1-22** Los detalles constructivos de las mismas pueden ser observados en el Plano **GE 147-PL1-23** .

11.2 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO

Las cantidades de obra fueron calculadas de acuerdo a los planos de diseño definitivos. En el **ANEXO X.**se presenta el cálculo de las cantidades de obra, los precios unitarios y el presupuesto estimado de las obras de estabilización propuestas. Tanto las cantidades de obras como los presupuestos se encuentran especificados en la **Tabla 64**.

Tabla 64 Cantidades y presupuesto estimado de las obras para el barrio Villa Nidia

ITEM	UND	CANT.	Valor unitario	Valor total del item
LOCALIZACIÓN Y REPLANTEO				**$ 3.000.000**
Localización y replanteo	GL	1	$ 3.000.000	$ 3.000.000
ZONA 1: LADERA AGUAS ARRIBA DE LA ZONA RECREATIVA				**$ 55.284.018**
Cerramiento en malla provisional	ML	37	$ 15.283	$ 565.471
Cuneta en concreto (Trinchera drenante.)	ML	35	$ 22.141	$ 774.934
Trinchera drenante (prf.2,00x0,60m.)	ML	35	$ 130.304	$ 4.560.630
Trinchera drenante espina de pescado (prf.2,00x0,60m.)	ML	142	$ 139.474	$ 19.805.265
Caja colectora	UN	8	$ 124.311	$ 994.486
Tuberia PVC diámetro=12"	ML	72	$ 66.355	$ 4.777.560
Cuneta en concreto (Rectangular.)	ML	14	$ 22.141	$ 309.973
Cargue, transporte y disposición final de escombros a sitios autorizados.	M3	68	$ 12.882	$ 875.956
Gaviones	M3	240	$ 90.221	$ 21.653.040
Geotextil no tejido	M2	80	$ 2.855	$ 228.400
Reubicación de postes de concreto	UN	2	$ 76.092	$ 152.184

ITEM	UND	CANT.	Valor unitario	Valor total del item
Tala y Desenraíce de Árboles Medianos	UN	8	$ 73.265	$ 586.120
ZONA 2: LADERA AGUAS ABAJO DE LA ZONA RECREATIVA				**$ 78.534.364**
Cerramiento en malla provisional	ML	38	$ 15.283	$ 580.754
Demolición cancha estructural manual (Carge, transporte de escombros y disposición final)	M3	5	$ 59.045	$ 295.225
Empradización cespedón (Incluye relleno entierra e=7cm.)	M2	588	$ 7.381	$ 4.340.028
Excavación mecánica (incluye retiro)	M3	550	$ 15.053	$ 8.278.930
Gaviones	M3	216	$ 90.221	$ 19.487.736
Geotextil no tejido	M2	110	$ 2.855	$ 314.050
Trinchera drenante espina de pescado (prf.2,00x0,60m.)	ML	85	$ 139.474	$ 11.855.265
Caja colectora	UN	7	$ 124.311	$ 870.175
Tubería PVC diámetro=12"	ML	52	$ 66.355	$ 3.450.460
Cuneta en concreto (Rectangular.)	ML	25	$ 22.141	$ 553.524
Tala y Desenraíce de Árboles Medianos	UN	36	$ 73.265	$ 2.637.540
Cuneta en concreto (trapezoidal h=0,20m.)	ML	99	$ 41.425	$ 4.101.035
Reubicación de postes de concreto	UN	4	$ 76.092	$ 304.368
RECONFORMACION DE LA CANCHA				**$ 21.465.274**
Excavación mecánica (incluye retiro)	M3	146	$ 15.053	$ 2.197.680
Geotextil no tejido	M2	120	$ 2.855	$ 342.600
Gaviones	M3	120	$ 90.221	$ 10.826.520
Malla electro soldada Q5.	M2	364	$ 8.421	$ 3.065.244
Material seleccionado	M3	62	$ 7.327	$ 454.274
Canal escalonado (en piedra pegada)	ML	4	$ 33.233	$ 132.932
Concreto cancha	M3	60	$ 74.100	$ 4.446.024
ZONA 3: LADERA EN DEPOSITO AL NORTE DE LA QUEBRADA				**$ 154.708.324**
Cerramiento en malla provisional	ML	52	$ 15.283	$ 794.716
Excavación mecánica (incluye retiro)	M3	7160	$ 15.053	$ 107.776.616
Empradización cespedón (Incluye relleno entierra e=7cm.)	M2	1564	$ 7.381	$ 11.543.884
Cuneta en concreto (Trinchera drenante.)	ML	225	$ 22.141	$ 4.981.716
Trinchera drenante (prf.2,00x0,60m.)	ML	225	$ 130.304	$ 29.318.333
Tala y Desenraíce de Árboles Medianos	UN	4	$ 73.265	$ 293.060

ITEM	UND	CANT.	Valor unitario	Valor total del item
ZONA 4: LADERA SUPERIOR CENTRAL				**$ 197.684.029**
Cerramiento en malla provisional	ML	30	$ 15.283	$ 458.490
Anclaje (incluye toron de acero, mortero de 3000 Psi, tuberia y accesorios)	ML	483	$ 379.226	$ 183.166.158
Bloque de anclaje	UN	46	$ 139.938	$ 6.437.148
Cuneta en concreto (Trinchera drenante.)	ML	50	$ 22.141	$ 1.107.048
Trinchera drenante (prf.2,00x0,60m.)	ML	50	$ 130.304	$ 6.515.185
ZONA 5: CORREDOR PARALELO AL MACIZO ROCOSO				**$ 47.781.762**
Cerramiento en malla provisional	ML	21	$ 15.283	$ 320.943
Fijación perfil (Para Barrera para peñasco)	UN	82	$ 290.034	$ 23.782.788
Red metálica (Para Barrera para peñasco)	ML	244	$ 81.422	$ 19.866.968
Cuneta en concreto (trapezoidal h=0,20m.)	ML	92	$ 41.425	$ 3.811.063
VALOR TOTAL DE LA OBRA				**$ 536.992.497**
TOTAL COSTO DIRECTO				**$ 536.992.497**
ADMINISTRACION 18,48%				**$ 99.236.214**
IMPREVISTOS 2.75%				**$ 14.767.294**
UTILIDAD 9.5%				**$ 51.014.287**
IVA (SOBRE UTILIDAD) 16%				**$ 8.162.286**
PRESUPUESTO TOTAL ESTIMADO				**$ 710.172.578**

El valor total es de la obra es del orden de $710.000.000.

En el **ANEXO XI** se presentan las especificaciones técnicas de construcción.

11.3 PROCESO CONSTRUCTIVO Y OBRAS PRIORITARIAS

Como pudo concluirse a partir de las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, existen en el área estudiada diferentes niveles de riesgo. En caso de que el FOPAE deba contratar las obras en varias etapas de construcción se recomienda acometer las mismas en el siguiente orden de prioridades:

- Prioridad 1: Ladera aguas arriba de la cancha (Drenaje subsuperficial y muro en gaviones)
- Prioridad 2: Ladera aguas debajo de la cancha (Cortina de pilotes, subdrenaje y muro en gaviones)
- Prioridad 3: Ladera superior central (Fila de anclajes)
- Prioridad 4: Ladera en depósito al norte de la quebrada San Cristóbal (Terraceo y trincheras drenantes)
- Prioridad 5: Corredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior (Barrera Parapeñascos)

En la construcción de las obras en cada zona se recomienda seguir la secuencia propuesta a continuación. Los procesos constructivos detallados para cada item se encuentran descritos en las Especificaciones Técnicas de Construcción del **ANEXO XI**. Se deberá en lo posible emplear mano de obra local.

Ladera aguas arriba de la cancha (Drenaje subsuperficial y muro en gaviones)

1. Localización y replanteo
2. Delimitación del área de trabajo e instalación de señalización preventiva (Cerramiento)
3. Tala y desenraice de árboles.
4. Excavación de obras.
5. Cargue, trasporte y disposición final de escombros a sitio autorizado.
6. Construcción de trinchera cuneta drenante perimetral
7. Construcción de trinchera drenante con forma de espina de pescado
8. Construcción muro de gaviones
9. Retiro cerramiento

Ladera aguas debajo de la cancha (Subdrenaje y muro en gaviones)

1. Localización y replanteo
2. Delimitación del área de trabajo e instalación de señalización preventiva (Cerramiento)
3. Tala y desenraice de árboles.
4. Demolición zona cancha.
5. Excavación de obras y retiro.
6. Construcción muro de gaviones cancha
7. Relleno en material seleccionado zona cancha.
8. Reconstrucción zona cancha (malla electrosoldada y concreto)

9. Empradización talud
10. Construcción de trinchera drenante con forma de espina de pescado
11. Construcción de cunetas en concreto
12. Construcción muro de gaviones quebrada
13. Retiro cerramiento

Ladera superior central (Drenaje subterraneo)

1. Localización y replanteo
2. Delimitación del área de trabajo e instalación de señalización preventiva (Cerramiento)
3. Tala y desenraice de árboles.
4. Excavación de obras.
5. Cargue, trasporte y disposición final de escombros a sitio autorizado.
6. Construcción de trinchera cuneta drenante perimetral
7. Empradización talud.
8. Retiro cerramiento

Ladera en depósito al norte de la quebrada San Cristóbal (Sistema de anclaje)

1. Localización y replanteo
2. Delimitación del área de trabajo e instalación de señalización preventiva (Cerramiento)
3. Instalación de los anclajes
4. Construcción bloque de anclaje
5. Construcción cunetas trincheras drenantes
6. Retiro cerramiento

Corredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior (Barrera Parapeñascos)

1. Localización y replanteo
2. Construcción barrera parapeñasco

11.4 CRONOGRAMA DEL PROYECTO

A continuación en la **Figura 53** se presenta el cronograma proyectado para la ejecución de las obras en cada una de las zonas del proyecto.

Figura 53 Cronograma del proyecto estimado de las obras para el barrio Villa Nidia

11.5 VIABILIDAD DE LAS OBRAS

Las obras diseñadas en general NO presentan ningún inconveniente ya que no se intervendrá en predios privados. Los únicos inconvenientes que se pudieran presentar hacen referencia al manejo de la obra en cuanto a limpieza, manejo de maquinaria entre otros.

11.6 PLAN DE ACCIÓN

Además de las obras recomendadas para mitigar el riesgo por fenómenos de remoción en masa, se requiere la construcción de obras de infraestructura básica complementarias, tales como las que se describen a continuación:

- Redes de servicio publico: Es necesario realizar un estudio de viabilidad técnica acerca de la construcción de un sistema de alcantarillado en la zona suroccidental del área de estudio entre las casas Tv 9 con Cll 160-36 y Kr 8C con Cll 160B-93. Debido a que estas viviendas están sirviendo sus aguas negras sobre el talud inferior y producto de esta influencia antrópica, pueden verse afectadas las condiciones geomecánicas de los materiales.

- Amoblamiento urbano: Se requiere la adecuación de la cancha múltiple y la reconstrucción de la zona recreativa al sur de la misma.

- Vías vehiculares y espacio urbano: Se deberá recuperar el espacio público mediante el establecimiento de caminos peatonales, cunetas para la recolección de lluvias, finalización de la pavimentación de las vías y sitios de recolección de basuras.

- Crear una gran área verde que integre la antigua cantera, la ronda de la quebrada y los terrenos desocupados de las viviendas que deban ser reubicadas. Reforestación de zonas erosionadas.

Estas actividades deben enmarcarse dentro de otros proyectos, los cuales deben ser coordinados con las entidades competentes (DAMA, EAAB, IDRD, DPAE, IDU, etc). El mapa institucional estará conformado por las siguientes entidades:

- Diagnostico e identificación de viviendas en riesgo: DPAE
- Acompañamiento social y reasentamiento de viviendas: CVP
- Rehabilitación del sector: DAMA, DPAE, EAAB, ESP, IDU, IDRD, jardín botánico y la alcaldía menor de Usaquén.

Es necesario incluir en los términos de referencia para la construcción los siguientes ítems:

- Plan de manejo social para la construcción
- Plan de emergencias

- Manual y reglamente de obra

11.7 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Para la realización de la obra se deberá realizar el manual de mantenimiento en donde se enmarque los procedimientos de trabajo y de control ajustándose a las disposiciones de la comunidad y la empresa constructora.

En el manual de mantenimiento de la empresa constructora se deben indicar los procedimientos de trabajo utilizados en la ejecución de la obra, de control y las acciones correctivas. Estos procedimientos deben tener las instrucciones en un lenguaje común y de fácil compresión para la comunidad. El diseño del manual de mantenimiento debe contemplar que existen algunas obras las cuales requieren mantenimiento continuo por parte de la comunidad y de la DPAE.

La comunidad debe realizar las siguientes intervenciones:

- Empradización talud: Requiere estar regando constantemente y por lo menos cada semana durante los primeros dos meses y posteriormente cada dos semanas durante seis meses.

- Cunetas y sumideros: Limpieza de basuras, tierra y demás desechos. La EAAB deberá realizar una revisión periódica de sumideros y cajas de inspección acompañados de la comunidad con el fin de aprender del tema.

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

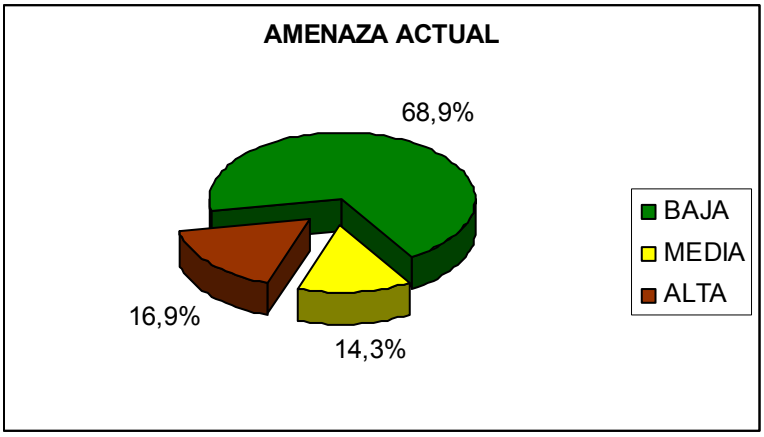
Con base en los análisis y los resultados obtenidos en el presente estudio, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En las laderas del barrio Villa Nidia se exponen los dos tipos básicos de materiales térreos: los suelos y las rocas. Los primeros corresponden principalmente a depósitos cuaternarios de tipo antrópico y en menor proporción a coluviones; y las segundas pertenecen exclusivamente a la Formación Labor del Grupo Guadalupe, de edad cretácica. Con el propósito de tener una aproximación a la caracterización geomecánica de ambos se establecieron como puntos de partida: a) la realización de visitas de campo durante las que se definieron los contactos roca-depósito y b) la descripción visual de los materiales encontrados. En las descripciones de las unidades de roca, se incluyeron aspectos como: tamaño de grano, composición mineralógica, litología, angularidad de las partículas, gradación, etc.

- En al área fueron definidas cinco (5) zonas geotécnicas asociadas con los fenómenos de inestabilidad descritos anteriormente.

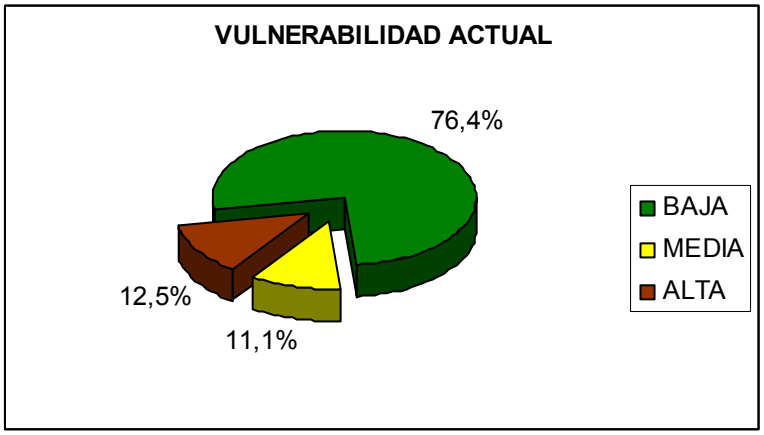
- Del área estudiada, el análisis de amenaza por fenómenos de remoción en masa actual arrojo los siguientes resultados:

Figura 54 Amenaza actual por fenómenos de remoción en masa



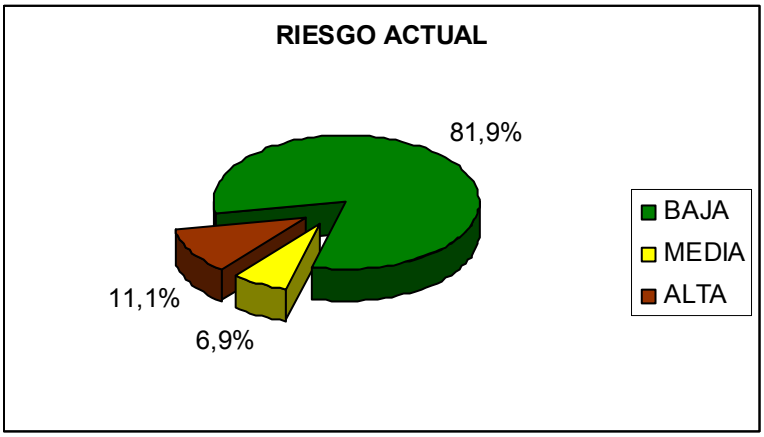
- De las viviendas del área estudiada, el análisis de vulnerabilidad por fenómenos de remoción en masa actual arrojo los siguientes resultados:

Figura 55 Vulnerabilidad actual por fenómenos de remoción en masa



- De las viviendas del área estudiada, el análisis de riesgos por fenómenos de remoción en masa actual arrojo los siguientes resultados:

Figura 56 Riesgo actual por fenómenos de remoción en masa.



- Las viviendas con grado de riesgo medio y alto se enumeran a continuación:

  - Ladera Aguas Arriba de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
80	JUNTA DE ACCION COMUNAL	SIN DIRECCIÓN
--	ZONA RECREATIVA	--

El costo total aproximado de los predios es de: $ 116 000 000.

- Ladera Aguas Abajo de la cancha (Secciones STD1 y STD2):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
33	MUSENO VELANDIA	CLL 162BIS CRA 9A
38	DESCONOCIDO	SIN DIRECCION
39	DESCONOCIDO	CLL 160C 9-12

El costo total aproximado de los predios es de: $ 144 000 000.

- Ladera en depósito al norte de la quebrada (STD3):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
29	JESUS FERNANDO LOPEZ	CRA 9A 162C-20 INT 2
30	CERAFIN LOPEZ	CRA 9A 162C-20
31	MARIA GARZON	CRA 9A 162C-12
32	JOSE LA VERDE	CRA 9A 162C-06

El costo total aproximado de los predios es de: $ 120 000 000.

- Ladera superior, central (Sección STR1 y STD4):

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
64	GUILLEVARDO HERNANDEZ	CRA 8A 161A-40
65	LUZ HERNANDEZ	CRA 8A 161-40
72	JOSE MARIA INVAJOA	CRA 8 BIS A 162-19
73	MARIA EUGENIA MENDEZ	CRA 8C 162-13
74	JOSE HECTOR NIÑO	CRA 8C 162-80

El costo total aproximado de los predios es de: $ 265 000 000.

- Corredor paralelo al escarpe rocoso-parte inferior

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
29	JESUS FERNANDO LOPEZ	CRA 9A 162C-20 INT 2
30	CERAFIN LOPEZ	CRA 9A 162C-20

El costo total aproximado de los predios es de: $ 91 000 000.

- El costo esperado de pérdidas por fenómenos de inestabilidad asciende a $503’000.000.
- El riesgo por fenómenos de inestabilidad es mitigable por medio de la construcción de obras.

- Para la mitigación del riesgo fueron evaluadas de manera comparativa varias alternativas. La alternativa recomendada para cada zona es la que presenta el menor costo esperado y la mayor garantía desde el punto de vista técnico.

- El riesgo por fenómenos de remoción en masa con obras para toda la zona de estudio es bajo.

- El costo de las obras de mitigación asciende a $710.000.000.

- Las obras diseñadas pretenden mitigar el riesgo geotécnico estático y sísmico asociado con la estabilidad del terreno. Estas obras, sin embargo, no mitigarán el riesgo sísmico asociado a las características estructurales de las casas. Lo anterior significa, que en el caso de un evento sísmico, el escarpe puede conservar su estabilidad pero las casas pueden ser averiadas por el movimiento telúrico.

- Las metodologías de evaluación y zonificación del riesgo son herramientas para ponderar la probabilidad de daño de elementos expuestos como consecuencia de un fenómeno amenazante. Los resultados obtenidos por este medio deben ser necesariamente revisados y ajustados de manera crítica y a la luz de la experiencia de los profesionales involucrados en el proyecto.

12.1 Recomendaciones:

- La ejecución de las obras se deberán realizar con la asesoria de un ingeniero geotecnista.

- En el área del proyecto se deberá estudiar la viabilidad de la posible realización de las obras de pavimentación e instalación del alcantarillado de aguas lluvias, las cuales deben ser coordinadas por las instituciones competentes. Se recomienda establecer un contacto Inter-institucional para coordinar de manera adecuada estos trabajos con los de la construcción de obras de mitigación.

- El control de la erosión será realizado por medio de una adecuada disposición de las aguas de escorrentía y la cobertura del suelo en donde éste carezca de cobertura vegetal

- Se recomienda adicionalmente establecer medidas de reducción de la amenaza por fenómenos de deslizamiento puntual producto de la mala construcción de las viviendas, sobretodo en las viviendas que presentan una inadecuada calidad constructiva de su cimentación, las cuales se enumeran a continuación:

Tabla 65 Viviendas con inadecuada calidad constructiva.

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
16	MARIA SANDOVAL	CLL 162 BIS 9A-04
24	JOSE MIGUEL ROJAS	CLL 162 10-30
28	JAIME GARCIA	CLL 162BIS 9A-13
35	VICENTE MUÑOS	CLL 162 9-25
36	JESUS LOPEZ	CLL 162A 9A-17
37	MERCEDES FERNANDEZ	CLL 162 9-25
40	ESTELA OCHOA	DG 161 9-26
48	JAIRO ORTIZ	TV 9 160C-36
49	MARIA BENAVIDES	TV 9 160C-37
50	JULIO CORTEZ	TV 9 160C-36 INT 2
54	GUILLERMO ROJAS	CRA 8C 160B-93
57	DESCONOCIDO	CLL 161 8A-54
60	MARIA RUGE	CRA 8A 161-07
61	TEUICINDO GOHEHECHE	CRA 8A 131-31

- Por otra parte es conveniente conducir mediante mangueras el efluente del nacedero Moya, hacia la quebrada San Cristóbal.

- Se recomienda reubicar las viviendas que se enlistan en la **Tabla 66**, debido a que estas viviendas no cuentan con un sistema de alcantarillado legal, ya que están localizadas sobre una cota más baja con respecto a la red, y por ello disponen las aguas negras sobre el talud.

Tabla 66 Viviendas a reubicar por deficiencia en el sistema de alcantarillado.

ID	NOMBRE	DIRECCIÓN
47	JAIRO ORTIZ	TV 9 160C-36
48	JAIRO ORTIZ	TV 9 160C-36
49	MARIA BENAVIDES	TV 9 160C-37
50	JULIO CORTEZ	TV 9 160C-36 INT 2
52	DESCONOCIDO	LOTE VACIO
53	JESUS PEÑA	CRA 8C 160B-85
54	GUILLERMO ROJAS	CRA 8C 160B-93
55	JUAN GOMEZ	CLL 161 8A-21

- A pesar que estos predios disponen las aguas negras mediante sistemas que permiten el escape del fluido sobre el talud; se podrán dejar si no es viable su reubicación construyendo un sistema de alcantarillado diseñado y aprobado por la EAAB.

- Se deberá delimitar la ronda de la quebrada San Cristóbal.

13 LIMITACIONES

Las recomendaciones dadas en este trabajo se basan en los resultados de los trabajos de Investigación del Subsuelo realizados; si durante los trabajos de construcción se llegan a encontrar características diferentes a las aquí mencionadas se deberá dar aviso al ingeniero geotecnista para que haga los ajustes del caso.

14 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

D.A.M.A. DEPARTAMENTO TECNICO ADMINISTRATIVO MEDIO AMBIENTE. Modelo Hidrogeológico para los acuíferos de Bogotá D.C. Julio 2002.

GUTIERREZ & COLEGIAL. 1987. Geología y aspectos geotécnicos de la parte central del sector denominado "Ciudad Bolívar" en el Distrito Especial de Bogotá, Trabajo de Grado. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia.

HERNANDEZ BORDA. P, 2001. Principios básicos de geomorfología, unidades geomorfológicas, su cartografía para fines geotécnicos. Universidad Nacional de Colombia, Unidad Académica de Geotecnia.

INGEOMINAS (1997) Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Subproyecto No. 7. Estudios Geofísicos. Santa Fe de Bogotá D.C.

INGEOCIM LTDA. – UPES – FOPAE. 1998. Zonificación de riesgos por inestabilidades del terreno para diferentes localidades de Bogotá.

JULIVERT. m. 1961. Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Boletín de Geología No. 7:5-36. Bucaramanga.

VAN DER HAMEN. T. 1995. Memoria Explicativa de los Mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Revista Análisis geográficos No. 24. IGAC. Bogotá.

Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá. IRH INGENIERÍA y RECURSOS HÍDRICOS LTDA. – EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ, Noviembre de 1995.

Estudio de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá. INGEOMINAS, 1997.

Estudio para la Zonificación de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa de las Localidades de Ciudad Bolívar, San Cristóbal, Rafael Uribe Uribe, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba. INGEOCIM LTDA. – UPES. Octubre de 1998.

Unión Temporal IGR – GIA Consultores Ltda. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR REMOCIÓN EN MASA DE LOS BARRIOS CORDILLERA SUR, TIERRA LINDA Y LOS ALPES. Escala Variable.

GUTIÉRREZ & COLEGIAL 1987. Trabajo de Grado Universidad Nacional de Colombia; INGEOMINAS (1997). Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Subproyecto No. 7. Estudios Geofísicos. Santa Fe de Bogotá D.C; INGEOCIM Ltda. – UPES – FOPAE (1998) – Escala 1:10.000

INGEOMINAS 1997, Estudio Geológico para el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá, Escala 1:50.000.

Geología de la Plancha 246 de Fusagasuga. INGEOMINAS escala 1:100.000

INGEOCIM LTDA. – UPES – FOPAE. 1998, Escala 1:10.000.

HELMENS KARIN & VAN DER HAMMEN. Plioceno y Cuaternario del Altiplano de Bogotá y alrededores. En Análisis Geográficos No. 24. IGAC. Subdirección de Geografía.

Estudio de Zonificación de Amenaza por Remoción en Masa para los Asentamientos Brisas del Volador Parte Alta y Tabor – Alta Loma, de la Localidad de Ciudad Bolívar, en la Ciudad de Bogotá. GEOCING (2002).

Geología y Aspectos Geotécnicos de la parte central del sector denominado "Ciudad Bolívar" en el Distrito Especial de Bogotá, 1987. Gutiérrez G y Colegial, J.

Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafé de Bogotá, D.C, INGEOCIM LTDA-UPES-FOPAE, 1998.

Zonificación de Amenaza por remoción en masa en los barrios Cordillera Sur, Tierra Linda y Los Alpes de la Localidad de Ciudad Bolívar, UT IGR – GIA, 2003.

Zonificación por remoción en masa en los barrios Villas de Diamante de la Localidad de Ciudad Bolívar, 2003.

Cardona-Arboleda, O, D, (1989). VULNERABILIDAD Y RIESGO POR DESASTRE – TÉRMINOS DE USO COMÚN EN MANEJO DE RIESGO. Primer taller de planificación en manejo de desastres. Oficina Nacional para la Atención de Desastres. Presidencia de la República de Colombia – Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte – La Vialidad Ltda. (1988). Criterios y normas para el diseño geométrico de carreteras: El drenaje como factor determinante en obras viales. Reglamento técnico general de obras viales, Tomo III.

Leone, F. (1999) Concept de vulnerabilite appliquea L'evaluation des risques generes par les phenomenes de mouvements de terrein. Tesis de doctorado, Universidad de Grenoble.

Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

Adaptado de Leone (1996)

Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

Cruden , D. y Varnes D.(1991). Landslides types and processes. Universidad de Alberta.

Sánchez-Silva, M. Taylor, C.A. & Blockley, D.I. HAZARD MANAGEMENT OF PROJECTS IN A EARTHQUAKE. In: Applications of Statistics an Probability. Lemaire, Favre & Marbarki (eds). Balkema, Rotterdam. 1995.

Soler, F., González, A. y Vesga, L. (1999). Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia. XI CPMSIF. Fox de Iguazú, Brasil.

Carvalho, C. GERENCIAMIENTO DE RISCOS GEOTÉCNICOS EM ENCOSTAS URBANAS: UMA PROPOSTA BASEADA NA ANALISE DE DECISAO. Tesis de Doctorado. Universidad de Sao Paulo. 1996