CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias

FOPAE.

CONSORCIO ALTOS DE LA ESTANCIA
CALLE 128B No 57C – 06
BOGOTA, COLOMBIA

DISEÑOS DETALLADOS, PRESUPUESTOS Y ESPECIFÍCACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN DE RIESGOS REQUERIDAS EN EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLIVAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

CONTRATO No. CONS - 410/2007

Informe Final
ORIGINAL

Octubre de 2008

De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos del Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud de reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE

CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y Atención a Emergencias

FOPAE.

CONSORCIO ALTOS DE LA ESTANCIA

CALLE 128B No 57C – 06

BOGOTA, COLOMBIA

DISEÑOS DETALLADOS, PRESUPUESTOS Y ESPECIFÍCACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN DE RIESGOS REQUERIDAS EN EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLIVAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

CONTRATO No. CONS - 410/2007

INFORME FINAL

ORIGINAL

Octubre de 2008

De acuerdo con el artículo 20 de la Ley 23 de 1982, los Derechos del Autor pertenecen al FOPAE. La solicitud de reproducir este documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.



FONDO PARA LA PREVENCION Y ATENCION DE EMERGENCIAS

FOPAE

TITULO: DISEÑOS DETALLADOS, PRESUPUESTOS Y ESPECIFÍCACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN DE RIESGOS REQUERIDAS EN EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLIVAR EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

AUTOR: CONSORCIO ALTOS DE LA ESTANCIA

RESUMEN En éste informe se presentan los diseños de las obras recomendadas, para el tratamiento de los sitios críticos por procesos de remoción en masa en el Sector Altos de La Estancia, de la Localidad de Ciudad Bolívar, de acuerdo con los alcances de los términos de referencia de la invitación pública para contratación directa No. 06 de 2007 emitidos por la DPAE.

PALABRAS CLAVES: SECTOR, ALTOS, ESTANCIA, REMOCION, OBRAS, CRITICOS, RIESGO, MITIGACION, BARRIOS, GEOTECNIA, GEOLOGIA, ESTABILIDAD

TERMINOS PARA GLOSARIO E INDICE: REMOCION EN MASA, DESLIZAMIENTO DE TIERRA, FALLA, INESTABILIDAD, MITIGACION, OBRAS

CLASIFICACION DE SEGURIDAD: CLASIFICADO	**CONTRATO:** De consultaría No 410 de 2007	**IDIOMA:** ESPAÑOL	**NÚMERO DE PAGINAS:** Texto: 382 pp Anexos: 1059 pp Planos: 41	**NÚMERO DE COPIAS:** 2

NOTAS/OBSERVACIONES:



RESUMEN

El área en estudio se encuentra afectada por dos grandes movimientos de ladera conocidos como La Carbonera y El Espino, de tipo retrogresivo, es decir su avance se realiza ladera arriba generando daños a numerosas viviendas que han tenido que ser reasentadas. Por lo anterior, la DPAE dividió el área en tres fases denominadas **Fase I**, en la parte inferior y media de la ladera comprendida por los asentamientos Cerros del Diamante, Santa Helena, San Antonio del Mirador, Espino Sector el Rodeo La Carbonera II y Santa Viviana sector Vista Hermosa, la **Fase II** en la parte intermedia superior comprendida por algunas manzanas de los barrios San Rafael del Alto de la Estancia, Rincón del Porvenir, Mirador de la Estancia, Tres Reyes primera Etapa, Espino I sector, Santo Domingo, Santa Viviana, Santa Viviana sector Vista Hermosa, Carbonera, Espino III sector; los cuales hacen parte de los polígonos declarados en alto riesgo no mitigable y la **Fase III** localizada en la parte superior de la ladera, comprendida por parte de las manzanas de los barrios Espino I sector, Santo Domingo y Santa Viviana, la cual paso de su categoría especial de Zonas prioritarias sujetas a análisis de riesgo en el D.C. a predios en amenaza media y riesgo medio por fenómenos de remoción en masa. Las familias incluidas al programa de reasentamiento de la denominada Fase I ya fueron reasentadas y se encuentra en el proceso de reasentamiento las familias de la Fase II.

Para el planteamiento de las obras de mitigación tanto geotécnicas como hidráulicas, se realizaron análisis para la condición actual del terreno y para varios escenarios de nivel de agua y eventos sísmicos. Con base en estos análisis de estabilidad, se evaluaron distintas alternativas de mitigación, teniendo como criterios generales los escenarios y factores de seguridad establecidos en la Resolución 227 de 2006 de la DPAE.



Teniendo en cuenta la magnitud de los desplazamientos del terreno en los sectores de la Carbonera y El Espino, fue necesario subdividir cado uno de los deslizamientos en tres sectores (superior, medio e inferior), con el fin de optimizar y garantizar el adecuado comportamiento geotécnico de las obras de mitigación. El sector superior corresponde a la parte alta o corona del movimiento, el sector intermedio corresponde al cuerpo de cada deslizamiento y el sector inferior corresponde al pie del deslizamiento; para los cuales se analizaron y diseñaron obras de mitigación que garantizarán la estabilidad de las viviendas e infraestructura de la Fase III.

Finalmente, en el ejercicio de análisis y diseño de las obras de mitigación, se encontró que el material a excavar en el sector del Espino, corresponde a un material de excelentes propiedades ingenieriles (recebo), el cual puede ser comercializado por el Distrito para la obtención de recursos adicionales para el proyecto.



TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES 24

1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO 26
1.2. ORGANIZACIÓN DEL INFORME 28
1.3. METODOLOGIA DE TRABAJO 29
1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SUS CAUSAS 32
1.5. LOCALIZACION Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO 33
1.6. PERSONAL PARTICIPANTE 36

2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 37

2.1. EQUIPO UTILIZADO 37
2.2. CÁLCULOS 38
2.3. MATERIALIZACION DE MOJONES DE REFERENCIA 38

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES E INFORMACIÓN SECUNDARIA 41

3.1. ANTECEDENTES 41
3.2. INFORMES 48
3.2.1. Ingeominas – Fopae 2003 49
3.2.2. Ingeniería y Georiesgos 2004 52
3.2.3. Ingeniería y Geotecnia 1999 54
3.2.4. Consorcio Civiles Ltda. – Hidroconsulta Ltda. 1999 55
3.2.5. Geotecnia y Cimentaciones Ltda. 2001 56
3.2.6. MGL Moya y García Ltda. 2003 56

4. ESTUDIO GEOLÓGICO 57

4.1. MÉTODO DEL ESTUDIO GEOLÓGICO 57
4.2. ESTUDIOS GEOLÓGICOS SEMIREGIONALES 59
4.3. GEOLOGÍA DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA 59
4.3.1. Unidades litoestratigráficas 63
4.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 69
4.5. GEOLOGÍA DE DETALLE DE LOS SECTORES DE LA CARBONERA Y EL ESPINO .71
4.5.1. Geología del sector de La Carbonera 72
4.5.2. Geología del Sector El Espino 84
4.6. MODELO GEOLOGICO PARA ANALISIS GEOTECNICOS 94

5. GEOMORFOLOGÍA 95

5.1. GEOMORFOLOGÍA DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA 95
5.2. ASPECTOS MORFOMÉTRICOS 95
5.2.1. Geomorfología detallada de los sectores de los deslizamientos de la Carbonera y el Espino 95
5.2.2. Inclinación de las pendientes 98
5.2.3. Orientación de las pendientes 99
5.3. MORFODINÁMICA 100
5.3.1. Unidades morfodinámicas 105
5.3.2. Elementos morfodinámicos asociados al deslizamiento de El Espino .. 114



5.3.3. Morfología de la zona del montículo de presión (Dze_mdp) y un deslizamiento de rocas (Dze_mdp_dz) sobre él Barrio San Rafael. 121
5.3.4. Movimientos de Terreno en Santa Viviana 122

6. EVALUACIÓN HIDROGEOLOGICA 123

6.1. METODOLOGÍA 123
6.2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 125
6.2.1. Unidades Hidrogeológicas 125
6.2.2. Influencia de las Estructuras Geológicas en el modelo 129
6.2.3. Apreciaciones sobre fuentes de aporte de agua hacia los materiales involucrados en los deslizamientos 131
6.2.4. Interpretación de los niveles piezométricos y zonas húmedas 133
6.3. CÁLCULOS DE FLUJOS EN LOS ACUÍFEROS 145
6.3.1. Sector de El Espino 145
6.3.2. Sector de La Carbonera 147
6.4. ESQUEMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL 149
6.5. NIVELES PIEZOMÉTRICOS NORMALES Y MÁXIMOS 150

7. HIDROLOGÍA Y DRENAJES SUPERFICIALES 153

7.1. ANTECEDENTES 153
7.2. INFORMACIÓN EMPLEADA 156
7.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO 158
7.3.1. Análisis de los datos de lluvia 158
7.3.2. Curva intensidad duración frecuencia (IDF) 160
7.3.3. Cálculo de caudales de escorrentía directa 161
7.3.4. Características de las cuencas de las quebradas Santa Rita, Santo Domingo y La Carbonera 162
7.3.5. Tiempo de concentración 162
7.3.6. Estimación de caudales máximos 163
7.3.7. Balance hídrico 166
7.4. MANEJO DE CUERPO DE AGUA PREVIO A LAS OBRAS DE MITIGACIÓN 174

8. INVESTIGACION DEL SUBSUELO 176

8.1. EXPLORACIÓN 176
8.1.1. Exploración Directa 176
8.1.2. Exploración Indirecta 183
8.1.3. Información secundaria 185
8.2. ENSAYOS DE LABORATORIO 186

9. CARACTERIZACIÓN GEOMECANICA DE LOS MATERIALES 192

9.1. SECTOR DE LA CARBONERA 192
9.1.1. Caracterización de unidades geotécnicas según los parámetros geomecánicos 195
9.2. SECTOR EL ESPINO 205
9.2.1. Caracterización de unidades geotecnicas según los parámetros geomecánicos 214

10. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 219



10.1. CRITERIOS GENERALES 222
10.1.1. Secciones de análisis 222
10.1.2. Aceleración sísmica 224
10.1.3. Escenarios de análisis 225
10.1.4. Método de análisis 225
10.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL SECTOR LA CARBONERA 225
10.2.1. Mecanismos de falla y susceptibilidad de los materiales 225
10.2.2. Materiales y parámetros adoptados 228
10.2.3. Niveles freáticos 230
10.2.4. Análisis de estabilidad condición actual 235
10.3. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL SECTOR EL ESPINO 242
10.3.1. Mecanismos de falla y susceptibilidad de los materiales 242
10.3.2. Materiales y parámetros adoptados 244
10.3.3. Niveles freáticos 247
10.3.4. Modelo geotécnico para análisis de estabilidad 248
10.3.5. Consideraciones para la modelación 248
10.3.6. Análisis de estabilidad condición actual 250
10.3.7. Análisis por caída de bloques Sector San Rafael 263

11. ANALISIS GEOTECNICO E HIDRAULICOS DE MEDIDAS CORRECTIVAS 267

11.1. CRITERIOS APLICADOS A LOS DISEÑOS DE OBRA 267
11.2. MÉTODOLOGIA 268
11.3. DISEÑOS HIDRAULICOS 269
11.3.1. Análisis Hidráulico De La Quebrada Santa Rita 272
11.3.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO (ROSALES) 282
11.3.3. DISEÑO DE CANALES PERIMETRALES 290
11.3.4. Recomendaciones para manejo de aguas de escorrentía 294
11.4. DISEÑOS DE OBRAS GEOTECNICAS 294
11.4.1. Inestabilidad la Carbonera 299
11.4.2. Inestabilidad El Espino 300

12. DISEÑO OBRAS DE MITIGACIÓN 304

12.1. INTRODUCCIÓN 304
12.2. VIABILIDAD DE LAS OBRAS DE MITIGACION 307
12.3. PRIORIZACIÓN DE LAS OBRAS 310
12.4. INSTRUMENTACIÓN 313
12.4.1. Antecedentes De Instrumentación 313
12.4.2. Estado De La Instrumentación Existente 316
12.4.3. Instrumentación Proyectada 317
12.4.4. Importancia y alcance del Proceso de instrumentación 318
12.4.5. Proceso de Instalación 318
12.4.6. Campañas de Lectura y Reportes de Resultados 319
12.4.7. Instrumentación Proyectada 320
12.4.8. Sistemas de Alarma y Protocolos de Aviso 321
12.5. MOJONES Y NIVELETAS 321
12.6. INCLINOMETROS 321
12.7. PIEZÓMETROS 321
12.8. OBRAS HIDRÁULICAS 323



12.9. GENERALIDADES OBRAS DE MITIGACION 326
12.10. INESTABILIDAD LA CARBONERA....327
12.10.1. Alternativa para el Sector Superior – Inestabilidad La Carbonera 330
12.10.2. Alternativa para el Sector Intermedio – Inestabilidad La Carbonera 330
12.10.3. Alternativa para el Sector Inferior – Inestabilidad La Carbonera..... 331
12.11. INESTABILIDAD EL ESPINO....331
12.11.1. Alternativa para el Sector Superior El Espino – Inestabilidad El Espino331
12.11.2. Alternativa para el Sector Intermedio El Espino – Inestabilidad El Espino332
12.11.3. Alternativa para el Sector Inferior El Espino – Inestabilidad El Espino. 332
12.11.4. Alternativa para el Sector San Rafael 332
12.12. PROCESO CONSTRUCTIVO OBRAS 333
12.12.1. Etapas Generales de Construcción..... 333
12.12.2. Pantallas Ancladas y Vigas de Amarre con Elementos Verticales.... 337
12.12.3. Caissons Drenantes 338
12.12.4. Rellenos Reforzado..... 340

13. OBSERVACIONES PARTICULARES..... 341

13.1. CUMPLIMIENTO CON LA RESOLUCIÓN 341
13.2. FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LAS OBRAS 342
13.3. TIEMPO DE EJECUCIÓN 343
13.4. DISEÑOS HIDRÁULICOS....344
13.5. MOVIMIENTOS DE TIERRA Y EXCAVACIONES 344
13.6. MANTENIMIENTO DE OBRAS 346
13.7. OTRAS CONSIDERACIONES 348
13.8. PRIORIZACION DE OBRAS....348

14. PRESUPUESTOS 350

15. CONCLUSIONES 354

15.1. CONCLUSIONES 354
15.2. RECOMENDACIONES 359

16. ESPECIFICACIONES TECNICAS 364

17. ANEXOS 366

18. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 367



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema de localización del proyecto. 34
Figura 2-1. Esquema del área de levantamiento Topográfico 39
Figura 2-2. Poligonal de amarre 40
Figura 2-3. Malla de puntos levantados..... 40
Figura 4-1. Marco geológico regional de acuerdo al Juliver 1963. 61
Figura 4-2. Geología semiregional según Ingeocim, 1998..... 61
Figura 4-3. Mapa geológico regional..... 62
Figura 4-4. Vista 3D del deslizamiento de Terreros en la vertiente sur del Cerro a espaldas de la zona de a Carbonera. Nótese su nicho de arranque y su morfología típica del depósito. 64
Figura 4-5. Vista de depósitos fluvioglaciares en el talud de la vía a Sierra Morena. Nótese la presencia de bloques erráticos en una matriz crema amarillenta. 67
Figura 4-6. Esquema de evolución geológica del Cerro Altos de la Estancia. Georiesgos 2004. 70
Figura 4-7. Esquema del modelo de falla transversal de Rosales. Georiesgos 2004. 70
Figura 4-8. Mapa de estructuras geológicas generales del Cerro Altos de la Estancia. Obsérvese en 3D con gafas de anaglifos rojo izquierdo y azul derecha..... 71
Figura 4-9. Mapa geológico detallado de superficie. 73
Figura 4-10. Mapa geológico de unidades litoestratigraficas del subsuelo .. 74
Figura 4-11. Secciones geológicas típicas de los sectores El Espino y La Carbonera 75
Figura 4-12. Columna la Carbonera 76
Figura 4-13. Vista en imagen de satélite y campo de zonas de aluviones de quebradas menores y laguna en zona de humedal..... 77



Figura 4-14. Detalle de depósitos fluvioglaciares en el sector de la Carbonera. Nótese la presencia de bloques erráticos en esta matriz..... 77
Figura 4-15. Detalle de diferentes materiales rocosos involucrados en el deslizamiento La Carbonera. 79
Figura 4-16. Ejemplos de afloramientos de rocas de la Formación Guaduas Inferior (Tkgi). Obsérvese en todos los casos su carácter de estratificación delgada y su composición arenoarcillosa. 80
Figura 4-17. Localización Columnas 81
Figura 4-18. Columna estratigráfica generalizada, de la Formación Guaduas inferior tomada en la Quebrada La Carbonera. 82
Figura 4-19. Talud de la sección A2 83
Figura 4-20. Columna estratigráfica parte media de la quebrada Rosales. Sector A2 de la Formación Guaduas Inferior. 85
Figura 4-21. Talud de la sección A3, base del Deslizamiento La Carbonera. 86
Figura 4-22. Materiales aluviales muy superficiales asociados al cauce de la Quebrada Rosales..... 88
Figura 4-23. Detalle del material heterogéneo en la zona de El Espino. Nótese los niveles litológico que caracterizan este material. 89
Figura 4-24. Detalle del material deslizado en el deslizamiento El Espino. 89
Figura 4-25. Afloramientos de areniscas de la Formación Guaduas Medio (Tkgm), en el sector de El Espino..... 90
Figura 4-26. Anaglifo 3D mostrando las fallas locales. Obsérvese en 3D con gafas de anaglifos rojo izquierdo y azul derecho. 91
Figura 4-27. Roca muy fracturada a cizallada en la zona de falla de Carbonera – Sierra Morena. Nótese el contraste de fracturamiento sobre la línea negra. 92
Figura 4-28. Rocas cizalladas, deformadas y muy fracturadas en la zona de falla de Rosales. 93



Figura 4-29. Zona de falla Santa Rita afectando arcillolitas y areniscas de la Formación Guaduas Medio. 94
Figura 5-1. Anaglifo del Cerro Altos de la Estancia. Para observar en 3D utilice gafas con lente rojo a la izquierda y azul a la derecha. Mapa imagen orientado en dirección Norte. 96
Figura 5-2. Vista en 3D de las zonas de deslizamiento La carbonera y El Espino. Imagen de Mayo de 2007 97
Figura 5-3. Mapa de relieve con iluminación de sombras 98
Figura 5-4. Mapa de inclinación de las pendientes. 99
Figura 5-5. Mapa de orientación de las pendientes. 100
Figura 5-6. Evaluación temporal del deslizamiento Periodo 1952-2007 102
Figura 5-7. Elementos geomorfológicos de un movimiento en masa (Varnes, 1978) 107
Figura 5-8. Mapa geomorfológico general 110
Figura 5-9. Mapa de grietas 111
Figura 5-10. Mapa con direcciones de movimiento 111
Figura 5-11. Deslizamiento de la Carbonera y sus tres subtipos de movimientos 112
Figura 5-12. Mapa morfodinámico de la zona de deslizamiento La Carbonera. 115
Figura 5-13. Nicho de de antiguo desprendimientos que constituye la zona de deslizamiento potencial de La Carbonera. 115
Figura 5-14. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona y el escarpe principal del deslizamiento 1 de La Carbonera. 116
Figura 5-15. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona y el escarpe principal del deslizamiento 2 de La Carbonera. 117



Figura 5-16. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona, el escarpe principal, la cabeza y el cuerpo del deslizamiento 3 de La Carbonera..... 117

Figura 5-17. Unidades morfodinámicas del deslizamiento El Espino..... 118

Figura 5-18. Vista en la fotografía digital (Skymission) y la imagen de satélite de los tres escarpes de arranque, la cabeza, el cuerpo y el pie de el Deslizamiento El Espino 119

Figura 5-19. Detalle del escarpe principal del deslizamiento El Espino en su flanco izquierdo. Nótese la alta presencia de grietas asociadas a éste. 120

Figura 5-20. Detalle del escarpe principal del deslizamiento El Espino en su flanco derecho. 120

Figura 5-21. Vista de la parte baja del deslizamiento El Espino, indicando algunos de sus elementos morfodinámicos. 121

Figura 6-1. Sector El Espino. Ejemplo de pérdidas en sistemas de abastecimiento (manguera) y acumulación de esta agua en las cañadas aledañas. 132

Figura 6-2. Sector El Espino, parte norte, arriba pero muy cerca de la corona del deslizamiento. En los barrios aledaños es evidente también la pérdida y escurrimiento de aguas servidas. 132

Figura 6-3. Imagen de Satelite en el rango infrarrojo, se destacan las zonas húmedas en tonos rojizos encendidos y los encharcamientos en negro..... 135

Figura 6-4. Comparación de algunas mediciones para establecer la relación entre niveles piezométricos y lluvias. Tomada de Ingeominas (2003). ... 141

Figura 6-5. El piezómetro PZ-4 fue localizado durante la campaña de campo, sin embargo igual que muchos puntos de medición en las áreas afectadas por deslizamiento, se encuentra destruido y sin posibilidades de uso..... 152



Figura 7-1. Precipitación media mensual multianual 159
Figura 7-2. Comparación precipitación media mensual multianual 160
Figura 7-3. Curva IDF estación Casablanca 161
Figura 7-4. Balance Hídrico..... 168
Figura 7-5. Comparación de la evapotranspiración con la precipitación.. 171
Figura 8-1. Registro de perforación CAE-1. Sector La Carbonera 179
Figura 8-2. Registro de perforación CAE-2. Sector La Carbonera 180
Figura 8-3. Registro de perforación CAE-3. Sector El Espino..... 181
Figura 8-4. Registro de perforación CAE-4. Sector La Carbonera 182
Figura 8-5. Registro de perforación CAE-5. Sector El Espino..... 183
Figura 9-1. Clasificación de suelos según la Carta de Plasticidad de Casagrande para el sector La Carbonera..... 193
Figura 9-2. Variación de la humedad con la profundidad, sector La Carbonera 196
Figura 9-3. Variación de la plasticidad con la profundidad, sector La Carbonera 197
Figura 9-4. Variación del peso unitario con la profundidad sector La Carbonera 198
Figura 9-5. Resultados Corte Directo CAE1-M16. Arenisca..... 199
Figura 9-6. Resultados Corte Directo CAE1-M19. Arcillolita 199
Figura 9-7. Resultados Corte Directo CAE1-M20. Arcillolita 200
Figura 9-8. Resultados Corte Directo CAE1-M22. Arcillolita 200
Figura 9-9. Resultados Corte Directo CAE1-M25. Arcillolita 201
Figura 9-10. Resultados Corte Directo CAE2-M12. Arenisca..... 201
Figura 9-11. Resultados Corte Directo CAE2-M15. Arenisca..... 202
Figura 9-12. Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial de la arcillolita. Sector La Carbonera 204
Figura 9-13. Ajuste a una distribución normal de los valores de resistencia a la compresión Uniaxial. Arenisca Sector La Carbonera 205



Figura 9-14. Clasificación de suelos según la Carta de Plasticidad de Casagrande. Sector El Espino 208
Figura 9-15. Variación de la humedad con la profundidad, sector El Espino 209
Figura 9-16. Variación de la plasticidad con la profundidad sector El Espino 210
Figura 9-17. Variación del peso unitario con la profundidad sector El Espino 211
Figura 9-18. Resultados Corte Directo CAE3-M10. Arenisca 212
Figura 9-19. Resultados Corte Directo CAE3-M20. Arenisca 212
Figura 9-20. Resultados Corte Directo BLQ1. Arcillolita 213
Figura 9-21. Ajuste a una distribución normal de los valores de resistencia a la compresión Uniaxial. Arcillolita Sector El Espino 215
Figura 9-22. Envolvente de resistencia del macizo rocoso, Arcillolita sector El Espino 217
Figura 9-23. Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial, Arenisca sector El Espino. 218
Figura 9-24. Envolvente de resistencia Arenisca, sector El Espino 218
Figura 10-1. Secciones para análisis de estabilidad 223
Figura 10-2. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-1 232
Figura 10-3. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-2 233
Figura 10-4. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-3 234
Figura 10-5. Sección DZ-1. Estabilidad con nivel de agua máxima y sin sismo 236
Figura 10-6. Sección DZ-1. Estabilidad con nivel de agua mínimo y con sismo 237
Figura 10-7. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua máximo y sin sismo 237



Figura 10-8. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo 238
Figura 10-9. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua mínimo y con sismo 238
Figura 10-10. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua máximo y con sismo para la parte de ladera arriba del escarpe principal 239
Figura 10-11. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua máximo y sin sismo 239
Figura 10-12. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo 240
Figura 10-13. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo para la parte de ladera arriba del escarpe principal 240
Figura 10-14. Sección típica de análisis Sector El Espino. Sección E-E..... 251
Figura 10-15. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual sin sismo y sin Agua..... 252
Figura 10-16. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua 253
Figura 10-17. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua 253
Figura 10-18. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua..... 254
Figura 10-19. Sección E-E. El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 256
Figura 10-20. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua 256
Figura 10-21. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Con Agua 257
Figura 10-22. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua..... 257



Figura 10-23. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 258
Figura 10-24. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 259
Figura 10-25. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 260
Figura 10-26. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 260
Figura 10-27. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua 262
Figura 10-28. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Sin Sismo y Con Agua 262
Figura 10-29. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua..... 263
Figura 11-1. Sección transversal Quebrada Santa Rita..... 274
Figura 11-2. Perfil longitudinal Quebrada Santa Rita..... 275
Figura 11-3. Alcantarilla Quebrada Santa Rita 281
Figura 11-4. Perfil longitudinal Quebrada Santo Domingo (Rosales) 284
Figura 11-5. Perfil longitudinal Quebrada La Carbonera..... 287
Figura 11-6. Sección transversal planteada para la Quebrada La Carbonera 288
Figura 11-7. Detalle caída escalonada 293



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1-1. Coordenadas de localización del proyecto..... 33
Tabla 3-1. Relación de obras de emergencia elaboradas por la DPAE 46
Tabla 3-2. Número de familias incluidas en el programa de reasentamiento 47
Tabla 3-3. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de INGEOMINAS..... 52
Tabla 3-4. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de Ingeniería y Georiesgos 54
Tabla 3-5. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de Ingeniería y Geotecnia..... 54
Tabla 4-1. Descripción de parámetros geomecánicos de campo para las diaclasas de la sección C2..... 83
Tabla 4-2. Descripción de parámetros geomecánicos de campo para las diaclasas de la sección A3. 86
Tabla 6-1. Puntos iniciales preseleccionados con información de niveles piezométricos. 138
Tabla 6-2. Puntos escogidos con información depurada. 139
Tabla 6-3. Datos sobre mediciones de permeabilidad (K) para el área de trabajo. 147
Tabla 7-1. Caudales para diferentes periodos de retorno en la quebrada Santa Rita (Civiles, 1999)..... 153
Tabla 7-2. Caudales de aguas servidas y lluvias generados en las fases II y III (Ingeniería y Georiesgos, 2004) 156
Tabla 7-3. Datos generales de las estaciones pluviográficas 157
Tabla 7-4. Datos generales de la estación climatológica ordinaria Vitelma158
Tabla 7-5. Precipitación media mensual multianual 159
Tabla 7-6. Datos curva IDF estación Casablanca..... 161



Tabla 7-7. Características morfométricas de las cuencas 162
Tabla 7-8. Tiempos de concentración de las cuencas 163
Tabla 7-9. Caudales estimados para las quebradas Santa Rita, Santo Domingo y La Carbonera 166
Tabla 7-10. Temperatura y precipitación media mensual multianual itelma (2800 m.s.n.m.) 170
Tabla 7-11. Cálculo de la evapotranspiración 171
Tabla 7-12. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada Santa Rita..... 172
Tabla 7-13. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada Santo Domingo 173
Tabla 7-14. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada La Carbonera. 173
Tabla 8-1. Relación de las perforaciones ejecutadas por el Consorcio Altos de la Estancia 177
Tabla 8-2. Relación de los Perfiles Geosísmicos efectuados por el Consorcio Altos de la Estancia 184
Tabla 8-3. Relación de perforaciones de otros estudios ejecutados en los sectores de la Carbonera y El Espino..... 186
Tabla 8-4. Ensayos de laboratorio realizados por el Consorcio Altos de la Estancia 188
Tabla 8-5. Resumen de ensayos geomecánicos Sector La Carbonera 190
Tabla 8-6. Resumen de ensayos geomecánicos Sector El Espino 191
Tabla 9-1. Parámetros de resistencia del material del Sector La Carbonera 203
Tabla 9-2. Parámetros de macizos rocosos para criterio de falla de Hoek y Brown 205
Tabla 9-3. Parámetros de resistencia del material del Sector La Carbonera 214
Tabla 9-4. Resumen de ensayos sobre el macizo rocoso. Sector La Carbonera 216



Tabla 10-1Resumen de los factores de seguridad de taludes con las obras de mitigación propuestas. 219
Tabla 10-2. Secciones de análisis empleadas 222
Tabla 10-3. Parámetros de materiales para análisis de estabilidad de La Carbonera 229
Tabla 10-4. Resumen de parámetros de resistencia empleados en el modelo 246
Tabla 10-5. Dimensiones de los bloques para el análisis de caída de bloques 264
Tabla 11-1. Caudales empleados para la quebrada Santa Rita 273
Tabla 11-2. Resultados simulación Quebrada Santa Rita 276
Tabla 11-3. Memoria alcantarilla Quebrada Santa Rita 280
Tabla 11-4. Caudales empleados para la quebrada Santo Domingo (Rosales) 283
Tabla 11-5. Resultados simulación Quebrada Santo Domingo (Rosales) 285
Tabla 11-6. Caudales empleados para la quebrada La Carbonera 286
Tabla 11-7. Resultados simulación Quebrada La Carbonera 289
Tabla 11-8. Caudales empleados para el diseño de canales perimetrales 291
Tabla 11-9. Cálculos para las secciones de los canales perimetrales 291
Tabla 11-10. Secciones de los canales perimetrales 292
Tabla 12-1. Relación de planos temáticos y de diseño de obras. 305
Tabla 12-2. Estudios y Monitoreos 313
Tabla 12-3. Instrumentación 314
Tabla 12-4. Instrumentación Proyectada 320



LISTADO DE PLANOS

PLANOS TEMATICOS GENERALES		
#	**DESCRIPCIÓN**	**ESCALA**
1	PLANTA TOPOGRAFICA GENERAL	1:2000
2	PLANTA EXPLORACIONES GEOTECNICAS	1:2000
3	MAPA GEOLOGICO GENERAL DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA	1:5000
4	MAPA GEOLOGICO DETALLADO DE SUPERFICIE	1:2000
4.1	MAPA GEOLOGICO DE UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	1:2500
4.2	MAPA DE PENDIENTES	1:2000
4.3	MAPA DE RELIEVE CON ILUMINACION DE SOMBRAS	1:2500
5	MODELO GEOLOGICO GEOTECNICO CARBONERA – PERFILES	1:2000
6	MODELO GEOLOGICO GEOTECNICO ESPINO – PERFILES	1:1250
7	MAPA GEOMORFOLOGICO Y PROCESOS GEOMORFODINAMICOS	1:2000
8	MAPA DE USO Y COBERTURA	1:2000
9	ANALISIS DE AMENAZA SITUACION ACTUAL – PLANTA Y PERFILES	1:2500
10	OBRAS MITIGACION – AMENAZA MEDIA – PLANTA Y PERFILES	1:2500
11	OBRAS MITIGACION – AMENAZA BAJA – PLANTA Y PERFILES	1:2500
12	REUBICACION VIVIENDAS FASE III	1:2000
13	PLANTA GENERAL - INSTRUMENTACION Y MONITOREO	1:2000
14	OBRAS HIDRAULICAS Y CANALES	1:2000
14.1	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA SANTA RITA	1:1250



14.2	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA SANTO DOMINGO	1:1250
14.3	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA LA CARBONERA	1:1250
14.4	OBRAS HIDRAULICAS CANALES – CANAL PERIMETRAL 3	1:1250
14.5	OBRAS HIDRAULICAS CANALES – CANAL PERIMETRAL 1 Y 2	1:1250
14.6	DETALLES OBRAS HIDRAULICAS Y CANALES	1:100
15	VIABILIDAD DE OBRAS	1.2000

OBRAS MITIGACION -INESTABILIDAD LA CARBONERA

#	DESCRIPCION	ESCALA
1.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – PLANTA GENERAL	1:2500
2.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR SUPERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:2000
2.1.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES, CANTIDADES Y NOTAS - CAISSON	1:200
2.2.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES, CANTIDADES Y NOTAS - PANTALLA	1:200
3.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PLANTA Y PERFILES	1:1000
3.1.C	POZO DE ABATIMIENTO Y DETALLES CARBONERA	INDICAD
3.2.C	REFUERZO POZO DE ABATIMIENTO CARBONERA	INDICAD
3.3.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION, SECTOR INTERMEDIO, PERFILES DETALLES Y CANTIDADES	INDICAD
4.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INFERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:500
4.1.C	DETALLES CONSTRUCTIVOS MURO TIERRA REFORZADA SECTOR CARBONERA	1:200



OBRAS MITIGACION – INESTABILIDAD EL ESPINO		
#	**DESCRIPCION**	**ESCALA**
1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – PLANTA GENERAL	1:1000
2.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR SUPERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:1000
2.1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR PERFILES	INDICAD
2.2.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES	INDICAD
3.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PLANTA	1:1000
3.1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PERFILES	1:1000
4.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INFERIOR, PLANTA Y PERFILES Y DETALLES	INDICAD



1. GENERALIDADES

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá FOPAE, celebró el contrato de Consultaría No 410 de 2007 con el Consorcio Altos de la Estancia, conformado por las sociedades *CONSULTORES EN INGENIERIA Y MEDIO AMBIENTE C.I. AMBIENTAL y GEOTECNIA Y CIMENTACIONES S.A.*, con el objeto de elaborar los diseños detallados, presupuestos y especificaciones técnicas para la construcción de las obras de mitigación de riesgos requeridas en el sector Altos de La Estancia de la Localidad de Ciudad Bolívar, en la ciudad de Bogotá D.C. Lo anterior debido a que este sector ha sido afectado por dos grandes movimientos del terreno denominados como La Carbonera y El Espino que han tenido como consecuencia el daño a numerosas viviendas y el necesario reasentamiento de más de 3.000 familias.

Debido a la extensión de estos movimientos y su dinámica de tipo retrogresivo, es decir que la inestabilidad avanza en sentido pendiente arriba de la ladera Altos de La Estancia, la Dirección de Atención y Prevención de Emergencias de Bogotá DPAE, dividió el área en tres zonas de intervención denominadas Fase I, Fase II y Fase III, con el objeto. La **Fase I** puntualiza el límite de las familias incluidas en el proyecto de reasentamiento por alto riesgo no mitigable, la **Fase II,** la conforma las viviendas que están en peligro inminente y que se incluyen en el programa de reasentamiento de familias en alto riesgo y la **Fase III** corresponde al corredor más occidental inicialmente se declaro como Zona de Tratamiento Especial por Riesgo.





Adicionalmente, el juzgado noveno penal ordenó dar cumplimiento a la acción de tutela No. 041 de 2006 a la DPAE y a la EAAB en la cual se ordena: *"(...) Se hace necesario realizar un estudio detallado del suelo, para determinar la problemática que presente el mismo, y establecer las posibles soluciones para lograr la estabilidad del terreno. Una vez se logre estabilizar el terreno, es necesario la construcción del alcantarillado, con el fin de recoger todas las aguas residuales y lluvias".*

"(...) si se llegase a determinar que dicha zona resulta invisible, y se hace necesario, pese a las obras realizadas, ordenadas por autoridad judicial, y como última ratio, una reubicación de las familias que allí habitan, el mismo debe darse en iguales o mejores condiciones al momento en que los habitantes adquirieron estas viviendas, y antes de presentarse este problema motivo de tutela, sin que se vea desmejorado y afectado el derecho de una vivienda digna y demás derechos fundamentales de estas familias afectadas"

En consecuencia con lo anterior y dentro del alcance contractual establecido en las Especificaciones Técnicas, la sociedad Consorcio Altos de La Estancia realizó el estudio de estabilidad de taludes del sector Altos de La Estancia que comprende los barrios Santa Viviana, Santo Domingo, Espino I sector, Tres Reyes Primera Etapa, Mirador de la Estancia, Rincón del Porvenir, San Rafael del Alto de la Estancia, Espino III sector, Carbonera y Santa Viviana sector Vista Hermosa, así como el diseñó de las obras requeridas para mitigar el riesgo por movimientos en masa en este sector. Para ello realizó una serie de actividades y estudios básicos que condujeron a establecer un modelo geológico y geotécnico a partir del cual se realizaron una serie de análisis de estabilidad de laderas y se diseñaron varias alternativas de obras para lograr un grado de estabilidad del terreno aceptable. Este documento obedece al informe final del contrato, donde se describen con detalle los resultados de todas las actividades y los diseños de las alternativas propuestas para la mitigación del riesgo.

1.1. ALCANCE DEL ESTUDIO

Las recomendaciones contenidas en el presente informe se basan en los datos obtenidos del plan exploratorio realizado, y en la información suministrada de estudios anteriores. Es de destacar, que los perfiles estratigráficos utilizados para diseño es producto de una interpolación de los registros de perforación obtenidos del plan exploratorio.

Si durante la construcción se presentan situaciones o condiciones no previstas en este informe, deberá darse aviso oportuno a esta oficina para estudiar la solución más adecuada. Esto también incluye cambios significativos en el diseño del proyecto final, que puedan generar una variación en la localización, uso, niveles y cargas utilizados para este informe.

Este documento no podrá ser alterado o modificado sin autorización explícita de esta compañía.

Para cumplir con lo estipulado en los términos de referencia, el estudio tuvo el siguiente alcance:

- Revisión y análisis de información secundaria.
- Levantamiento topográfico a escala 1:1000 con curvas de nivel cada metro de un área de aproximadamente 130 Ha complementado con una toma de fotos aéreas.
- Investigación del subsuelo mediante exploraciones directas, indirectas y ensayos de laboratorio.
- Evaluación geológica a nivel regional y local y elaboración de mapa geológico a escala 1:1000.
- Análisis geomorfológico y caracterización de unidades geomorfológicas a escala 1:1000.

- Caracterización hidrogeológica de unidades geológicas y establecimiento de niveles piezométricos o factores ru (relación presión de poros/esfuerzo total vertical).
- Análisis hidrológico de la zona y caracterización de drenajes superficiales.
- Caracterización de la amenaza sísmica de acuerdo a la microzonificación sísmica de Bogotá.
- Elaboración de modelos geológico-geotécnicos para el sector La Carbonera y El Espino representados por secciones típicas
- Identificación y caracterización geotécnica de perfiles típicos del sub-suelo.
- Análisis de estabilidad de taludes para los tipos de movimientos en masa identificados.
- Diseño detallado de obras preventivas o de control de movimientos en masa
- Diseño de instrumentación geotécnica y plan de monitoreo
- Elaboración de presupuesto de obras.
- Propuesta de alternativas de obras para cuatro escenarios de amenaza por movimientos en masa.

El presente estudio no incluye el diseño de obras complementarias tales como:

- Reconformación morfológica: Las obras de mitigación planteadas están orientadas a mejorar la estabilidad general y local de estos fenómenos de remoción en masa.
- Restauración ecológica contempla únicamente la protección vegetal de las terrazas planteadas para la estabilización del sector y mejorar el paisaje.

- Diseños arquitectónicos: Los diseños recomendados en este estudio contemplan los requerimientos geotécnicos para disminuir los niveles de amenaza de cada uno de los sectores.
- Paisajismo para el manejo de las quebradas. Se tuvo en cuenta la parte hidrológica e hidráulica requerida para la definición de los diseños.
- Los diseños hidráulicos planteados corresponde a las obras definidas para el manejo de los cauces de las quebradas existentes y aguas subsuperficiales, para garantizar la estabilidad de la zona de estudio.

Realizadas las obras propuestas en este estudio es de competencia de las Entidades Distritales (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EEAB) su buen funcionamiento, teniendo en cuenta que para la ejecución de las diferentes obras propuestas en este proyecto están concertadas y comprometidas dichas entidades.

1.2. ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El informe comprende dos volúmenes. El primero corresponde al texto principal en donde se describen con detalle las actividades, resultados y análisis realizados durante el proyecto. Para el contenido de este texto se siguió aproximadamente el orden de temas propuestos en el esquema de presentación dado en las Especificaciones Técnicas del contrato. En el segundo volumen se encuentran los anexos del informe en donde se incluyen las memorias del levantamiento topográfico, los resultados de ensayos geofísicos de campo, los registros de las perforaciones, trincheras y apiques, los resultados de ensayos de laboratorio con un análisis de la variación de parámetros geotécnicos para cada sector y las memorias de

cálculos estructurales, los mapas temáticos, planos de obras y las especificaciones de obras para construcción.

1.3. METODOLOGIA DE TRABAJO

En este numeral se hace referencia la descripción de actividades realizadas durante la ejecución del proyecto de acuerdo con los objetivos y alcances se realizaron los siguientes trabajos:

Levantamiento topográfico. Se levantó un área de aproximadamente 130 Ha, es decir 20 Ha más de las establecidas en el contrato. Ello debido a que al inicio del estudio se previó que para la definición del modelo geológico-geotécnico y de las obras, era necesario extender los límites del área del estudio al menos hasta las divisorias de aguas. Este levantamiento se realizó con la precisión suficiente para elaborar planos a escala 1:500 e incluyó la planimetría y altimetría de la zona, así como el levantamiento de edificaciones, vías, postes de energía y otros elementos urbanos, así como detalles de escarpes, agrietamientos, cuerpos de agua y zonas húmedas. Adicionalmente se instalaron cuatro mojones de referencia.

Recopilación y análisis de información disponible. Se adquirió información documental de tipo cartográfico, fotográfico, imágenes satélites, informes de estudios anteriores y registros climáticos. Buena parte de esta información, particularmente los informes de estudios, fueron suministrados por la DPAE.

Toma de foto aérea. La compañía SKYMISSION LTDA realizó para el Consorcio un vuelo no tripulado durante el cual se tomaron una serie de fotos aéreas que posteriormente se procesaron para elaborar un fotomosaico de la zona.

Estudio geológico. Se realizó un amplio y muy completo estudio geológico empleando técnicas tradicionales de levantamientos geológicos con interpretaciones y análisis multitemporales y multiespectrales de imágenes satélites. De esta manera se logró un modelo geológico que posteriormente se adecuó para los análisis geotécnicos.

Estudio geomorfológico. Con base en los modelos geológicos regional y local, se realizó un estudio geomorfológico muy detallado que incluyó el análisis multitemporal de la dinámica de la zona y la determinación de los aspectos morfométricos, morfológicos y morfodinámicos que caracterizan las zonas de La Carbonera y de El Espino.

Estudio hidrogeológico. Con base en el modelo geológico local, las características de los cuerpos de aguas y la información instrumental disponible, se realizó un análisis de los niveles de agua subterránea y sus posibles variaciones en el año.

Estudio hidrológico. Para este estudio se analizó la información disponible de otros estudios y se complementó con información de estaciones hidrometereológicas cercanas. Con base en ello y la topografía, se realizó una caracterización hidrológica de las tres principales microcuencas que conforman la zona del estudio, en términos de lluvia, temperatura, evapotranspiración y caudales de cada corriente de agua. Este análisis sirvió posteriormente para el diseño de las obras hidráulicas que se proponen.

Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio. La exploración del subsuelo se realizó mediante cinco perforaciones mecánicas con recuperación continua de núcleos y cuya longitud total alcanzó los 130

metros. Adicionalmente se realizaron tres trincheras, dos apiques con toma de muestras en bloque y doce ensayos de refracción sísmica. Sobre muestras escogidas del material recuperado se realizaron ensayos geomecánicos para la clasificación de materiales, determinación de propiedades índice y de resistencia.

Análisis de estabilidad de laderas. Con base en los estudios básicos (geología, geomorfología, hidrogeología), la topografía del terreno, los resultados de la exploración de campo y la información de otros estudios, se elaboró un modelo geológico-geotécnico para cada sector (La Carbonera y El Espino) representado por secciones típicas de cada uno. Sobre este modelo se realizaron análisis de estabilidad de taludes para la condición actual del terreno y para varios escenarios de nivel de agua subterránea y fuerza sísmica. **Anexo 4** cálculo de memorias. En estos análisis se identificaron las zonas más y menos críticas por estabilidad lo cual sirvió para identificar las posibles alternativas de obras de estabilización.

Diseño de obras. Con base en los análisis de estabilidad para la condición actual, se evaluaron distintas alternativas de obras de estabilización teniendo como criterios generales los escenarios y factores de seguridad establecidos en la Resolución 227 de 2006 de la DPAE. Luego de una primera propuesta de alternativas que se analizó con la Interventoría del estudio y funcionarios de la DPAE, se definieron cuatro escenarios de alternativas de obras para cada uno de los cuales se estimó un valor del total de obras. Las obras de estos escenarios se diseñaron con el detalle suficiente para construcción y con sus correspondientes especificaciones.

1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SUS CAUSAS

Los deslizamientos de Altos de la Estancia fueron originados por la explotación antitécnica de materiales de construcción en el sector Nor-oriental del barrio El Espino (Cantera Santa Rita) hacia la década de los 70. Como consecuencia de estas explotaciones se generaron problemas de inestabilidad del terreno, a la cual se sumó posteriormente la ocupación informal de viviendas de muy mala calidad, sin un manejo adecuado de las redes domiciliarias, redes de alcantarillado, rellenos de materiales de escombros locales, etc.

Una de las principales causas de los movimientos identificada en los diferentes estudios y conceptos realizados en la zona, es la infiltración de aguas servidas que llegan hasta los estratos de rocas blandas y además de incrementar la presión de los poros en el subsuelo, reblandecen estos materiales coadyuvando a la formación de una superficie de falla por la cual se deslizan con mayor facilidad los materiales sobreyacientes. En consecuencia, el control de los vertimientos de aguas servidas favorece la reducción de las tasas de movimiento del material deslizado y por ende, contribuye en la disminución de la ampliación de la zona inestable por el efecto retrogresivo que caracteriza los procesos identificados en el sector.

Los deslizamientos del Espino y de la Carbonera son de tipo compuesto, complejo y múltiple ya que involucran materiales heterogéneos, suelos y rocas, de geometría irregular y se consideran deslizamientos de tipo traslacional y rotacional. A partir de este fenómeno se han originado gran cantidad de grietas de distensión y levantamiento de masas rocosas que han afectado las viviendas de los barrios que se encuentran en la zona de influencia.

Asociados a los deslizamientos principales se encuentran deslizamientos superficiales de suelo y roca, flujos de suelo y de detritos, talud o depósitos de talud y caídas de roca. Todos estos movimientos están activos y se desplazan actualmente a diferentes velocidades, las cuales han sido determinadas a partir de las diferentes campañas de monitoreo realizadas, representando alta amenaza para toda la zona afectada.

1.5. LOCALIZACION Y DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada al suroccidente de la ciudad de Bogotá, en la localidad (19) de Ciudad Bolívar, UPZ 69 Ismael Perdomo. En ella se encuentran 11 barrios dentro del polígono mostrado en la Figura 1.1. Esta delimitación incluye el área establecida para este estudio por la DPAE y el área adicional que se consideró necesaria, tal como se mencionó anteriormente. De esta manera, el área total de los estudios detallados fue de 130 hectáreas comprendida aproximadamente entre los límites dados por las coordenadas de la Tabla 1.1 y el polígono indicado en línea roja punteada de la figura.

Tabla 1-1. Coordenadas de localización del proyecto.

Norte (m)	Este (m)
97760	89294
98666	89542
98780	88665

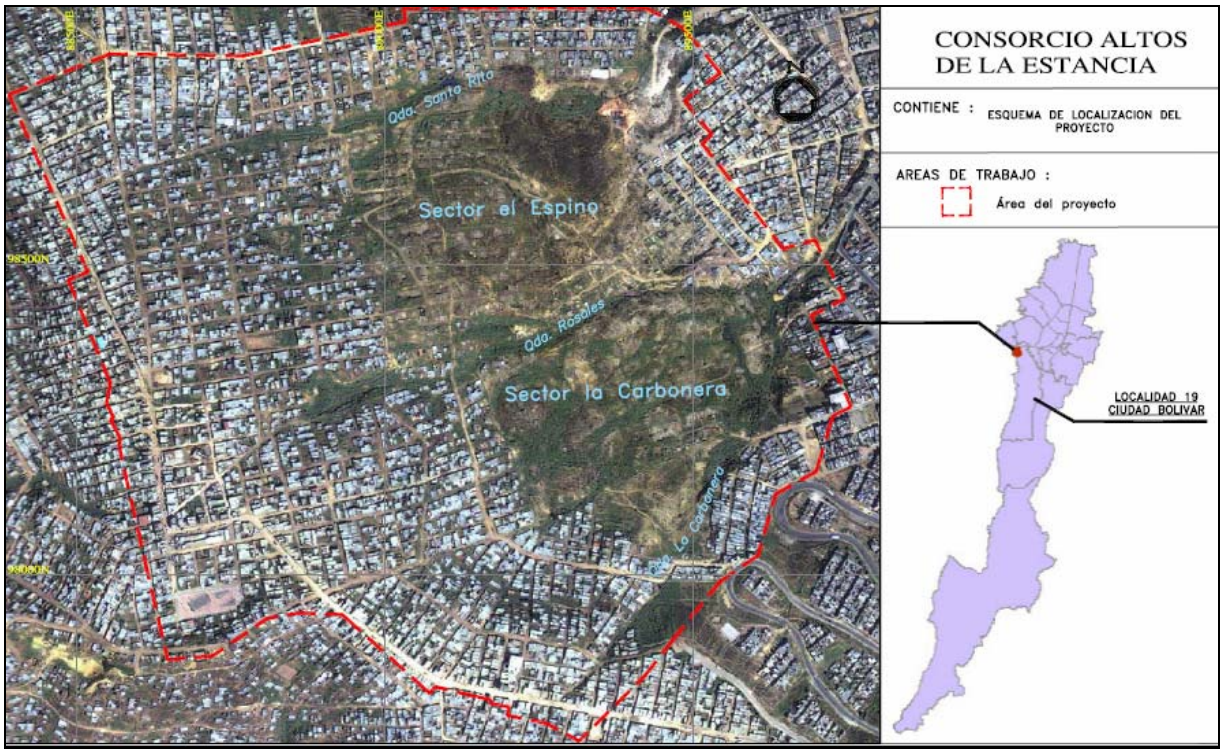


Figura 1-1. Esquema de localización del proyecto.

Los costados sur y occidental de la zona de estudio se encuentran ocupados en su mayoría por viviendas de uno y dos pisos, construidas escalonadamente para adaptarse a la pendiente del terreno. En general, estas corresponden a viviendas de baja calidad constructiva y deficientes sistemas estructurales lo que las hace vulnerables al colapso ante cualquier proceso de inestabilidad. A medida que se avanza ladera abajo hacia el norte, el número de viviendas disminuye notablemente pero sobre la superficie del terreno se notan los terraceos y vestigios de las viviendas demolidas dentro del proceso de reubicación adelantado por la DPAE y la Caja de Vivienda Popular. Sobre la parte media y baja de las laderas, en donde se encuentra la zona deslizada, ya no se encuentra ninguna vivienda formal, aunque si unas pocas ocupaciones informales.

Las zonas de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino se observan relativamente bien delimitadas en su escarpe principal. El cuerpo de estos movimientos presenta numerosas grietas y escarpes secundarios, que son especialmente notables en el sector de El Espino. En ambos casos, se reconocen sectores con movimientos más activos que otros. En cuanto a las dimensiones de las zonas evidentemente inestables, en el sector de La Carbonera se tiene un área de aproximadamente 132.000 m^2 (13.2 Ha) y en El Espino de 160.000 m2 (16 Ha). En general se encuentran algunos afloramientos desprovistos de vegetación en donde se pueden apreciar las pobres características geomecánicas de los materiales involucrados en el proceso. Por otro lado, existen también algunas zonas que se encuentran bien cubiertas por vegetación herbácea con una fuerte pigmentación verde indicando que son sectores de alta concentración de humedad.

Sobre la zona del proyecto existen tres quebradas afluentes del río Tunjuelo, las cuales corren pendiente abajo de la ladera. Así, hacia el costado norte se encuentra la quebrada Santa Rita y al sur de esta la Quebrada Rosales, también llamada en algunos estudios como quebrada Santo Domingo (Rosales). Éstas quebradas son las que delimitan el sector conocido como El Espino según se aprecia en la **Figura 1.1.** Por su parte, hacia el sur de la zona estudio se encuentra la Quebrada La Carbonera que junto con la Quebrada Rosales delimitan el sector conocido como La Carbonera. De estas tres quebradas, la única que al parecer aún guarda buena parte de su cauce natural es la Quebrada Rosales, ya que los cauces de La Carbonera y Santa Rita han sido severamente afectados por los movimientos del terreno y la ocupación urbana, haciendo que ellos se pierdan por tramos o se hayan desviado de su trazado original. Ya hacia la parte baja del deslizamiento se encuentran algunas viviendas del barrio El Perdomo, que también han sido afectadas por el movimiento.

1.6. PERSONAL PARTICIPANTE

En este estudio participó el siguiente personal profesional:

JUAN CARLOS AFANADOR, Ing. Civil, MGIC – Director de Proyecto

JACOBO OJEDA MONCAYO, Ing. Civil, MSc, DIC – Geotecnista

GERMAN VARGAS CUERVO, Geol., MSc, PhD – Geólogo

ALFONSO AMEZQUITA, Ing. Civil, Especialista en Estructuras

HENRY GARZÓN, Geol., Especialista en Geotecnia

CARLOS ANGEL, Geol. – Hidrogeólogo

RENNY BALANTA, Ing. Civil, MGIC, Ingeniero hidráulico

JESUS SANDOVAL, Ing. Catastral. Experto en SIG

GERARDO RODRIGUEZ R. Ing. Civil, Ingeniero de Diseño

GERMÁN BONILLA, Geólogo

GUILLERMO GOMEZ, Ing. Civil, Ingeniero de Diseño

ALBEIRO BARBOSA, Ing. Civil, Geotecnista

CARLOS VARGAS. , Ing. Civil, Geotecnista

2. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

El levantamiento topográfico se realizó para el polígono definido por la **Figura 1.1** con el detalle necesario para una escala 1:1000 y siguiendo las especificaciones técnicas dadas por la DPAE. Como resultado de esta actividad se elaboró el **Plano 1,** siguiendo el procedimiento que se explica enseguida y cuyo soporte se presenta en el **Anexo 1.**

A partir del CD BOGOTA-19 GPS ubicado en el tanque del acueducto en el barrio de Sierra Morena, cuyas coordenadas están certificadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC en el sistema de referencia MAGNA, y que son N= 97646.463 m. E= 89671.968 m. Cota= 2806.340 m.s.n.m., se realizó una poligonal principal de 17 deltas, 3485 metros de longitud y una precisión de 1 a 50.000. También se realizaron dos poligonales secundarias: una de 25 deltas, 2860 metros de longitud y una precisión de 1 a 30.000 y la otra de 7 deltas 576 m. de longitud y una precisión de 1 a 15.000. Con estas tres poligonales se cubrió el área total de todo el proyecto y sirvieron como base general para el levantamiento topográfico.

El área aproximada del proyecto fue de 130 ha que se dividen aproximadamente en 90 ha de zona urbana y 40 ha que corresponden a zona de verde.

2.1. EQUIPO UTILIZADO

Se utilizaran dos estaciones Totales Electrónicas ambos equipos con certificación de calibración vigente y demás accesorios como cartera

electrónica, prismas, bastones, radios y equipo menor. Adicionalmente se contó con dos comisiones de topografía, cada una de ellas conformadas por el siguiente personal:

- Un topógrafo
- Dos cadeneros
- Un auxiliar
- Dos Vigilantes
- Un Conductor

2.2. CÁLCULOS

Las carteras electrónicas de la poligonal fueron procesadas mediante el programa SURVEY LINK, el cual calcula las coordenadas y cotas de cada uno de los puntos tomados con la estación total. En la **Figura 2.1** se ilustra el esquema del área del levantamiento topográfico, en la **Figura 2.2** se presenta la poligonal de amarre, y finalmente en la **Figura 2.3** la malla de puntos.

2.3. MATERIALIZACION DE MOJONES DE REFERENCIA

El Consorcio Altos de La Estancia para el presente estudio se materializó cuatro (4) mojones y se referenciaron dos (2) adicionales encontrados en la zona del proyecto, los cuales serán la base para el replanteo de las obras. En el Anexo 1 se presentan las fichas de cada uno de los mojones materializados.

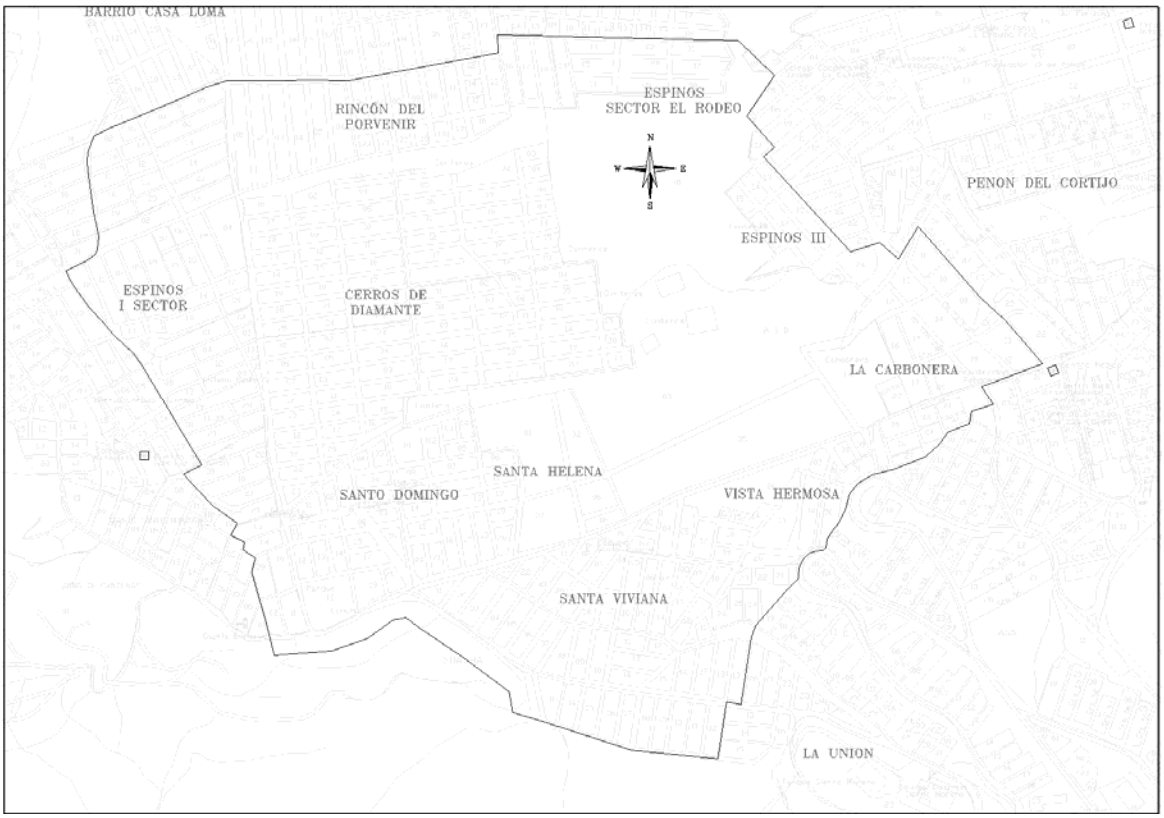


Figura 2-1. Esquema del área de levantamiento Topográfico

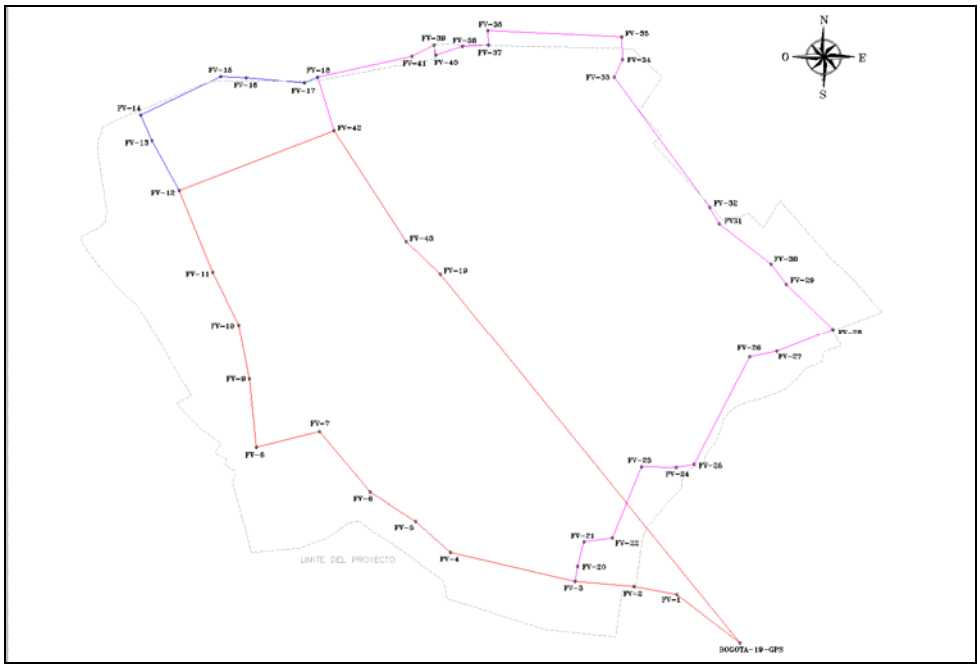


Figura 2-2. Poligonal de amarre

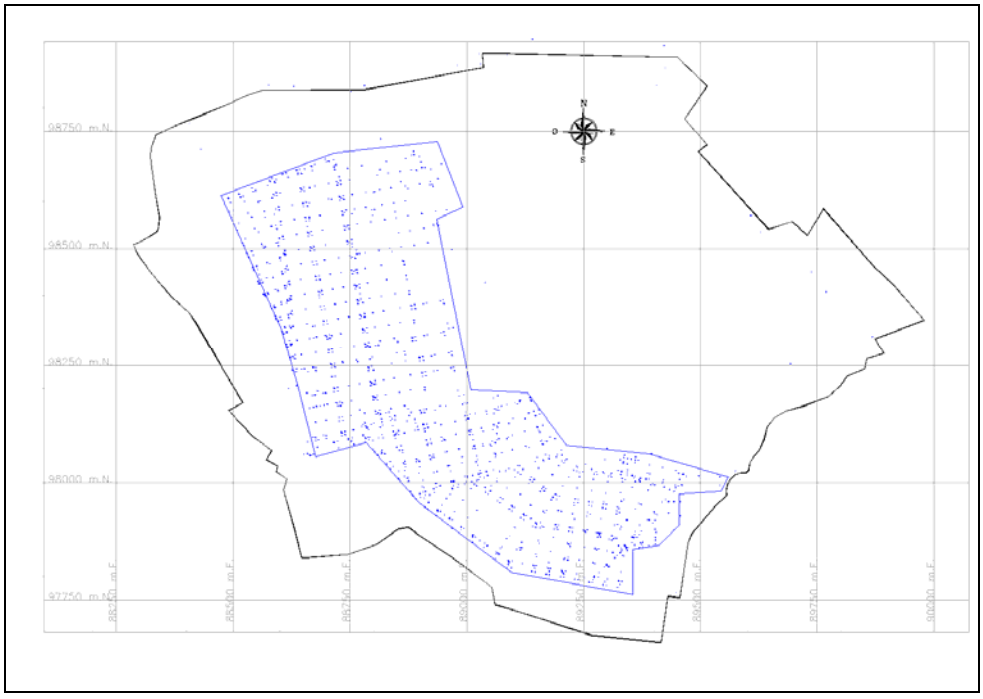


Figura 2-3. Malla de puntos levantados

3. REVISIÓN DE ANTECEDENTES E INFORMACIÓN SECUNDARIA

La zona del estudio cuenta con varios antecedentes de eventos de inestabilidad, cuya documentación fue disponible para este estudio a través de los archivos de la DPAE. Así mismo, en la zona se han llevado a cabo varios estudios con distinto alcance pero siempre enfocados a resolver el problema de inestabilidad de uno o de los dos sectores. En este capítulo se hace un resumen de estos antecedentes e informes.

3.1. ANTECEDENTES

En los años 1997, 1998 y 1999 se reportan caída de rocas en el barrio el Espino III Sector e inició el deslizamiento de la Carbonera. Ello dio lugar a un proceso de reubicación de familias que se encontraban en los barrios Espino III sector Rodeo, Espino III sector, Santa Viviana, Santa Viviana sector vista hermosa, San Antonio del Mirador. Así mismo se inicia el monitoreo geotécnico y se construyen obras de ingeniería para controlar el avance del deslizamiento.

A finales de 2000 se activó un nuevo deslizamiento que afectó los barrios Santa Helena y San Antonio, que implicó iniciar los procesos de reubicación en el barrio la Carbonera (4 familias), San Antonio del Mirador (134 familias) y Santa Helena (53 familias) y la construcción de obras de drenaje con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB, con el fin de controlar el aporte de aguas lluvias y negras al cuerpo del deslizamiento.

A mediados de Agosto de 2001 se presentó un deslizamiento en el barrio Cerro del Diamante, cuyo movimiento destruyó 85 viviendas y que generó la inmediata evacuación de las familias afectadas (Marzo de 2002). A finales de Mayo de 2002 se produjo un incremento importante en la zona inestable, afectando nuevamente a numerosas familias (804 viviendas), produciéndose a partir de este momento un proceso masivo de evacuación de familias.

En Noviembre de 2002 se remitió al Departamento Administrativo de Planeación Distrital, DAPD, la delimitación de la Zona de Alto riesgo No Mitigable para ser declarada como Suelo de Protección por Riesgo y los conceptos técnicos de riesgo de los barrios Cerros del Diamante, Espinos I y III Sector para modificar las resoluciones de legalización. Así mismo, se recomienda la inclusión en el Programa de Reasentamiento en el barrio San Rafael del Alto de la Estancia (36 familias), Espino sector el Rodeo (37 familias), Espino III sector (170 familias), Carbonera II sector (14 familias), San Antonio del Mirador (23 familias), Santa Helena (28 familias) y Santa Viviana (54 familias), Santo Domingo (Rosales)(113 familias), Espino I sector (182 familias), Cerro Diamante (364 familias) y Rincón del Porvenir (9 familias).

En el año 2003 y de acuerdo con las recomendaciones del INGEOMINAS, se amplió el polígono declarado como zona de alto riesgo no mitigable y se definieron otras dos fases de intervención Fase II y Fase III (Fase II declarada en alto riesgo no mitigable y Fase III declarada zona de tratamiento especial por riesgo). Se emiten los conceptos técnicos para los barrios: Santa Viviana, Santa Viviana sector Vista Hermosa, Santo Domingo (Rosales), Espino I sector, Espino III sector, Carbonera, Carbonera II, San Rafael del Alto de la Estancia, Rincón del Porvenir, Mirador de la Estancia y Tres Reyes Primera Etapa y se

recomienda la declaratoria del polígono como Suelos de protección por riesgo.

El 13 de Agosto de 2004 mediante la Resolución 436, el Departamento Administrativo de Planeación Distrital hoy Secretaría de Planeación Distrital, declaró como Suelos de Protección por Riesgo Alto No Mitigable un área que involucra los barrios San Antonio del Mirador, Cerro Diamante, Santa Helena, Espino Sector el Rodeo y parte de los barrios Espino III sector, Carbonera I y II, Santa Viviana sector Vista Hermosa, Santa Viviana, Santo Domingo (Rosales), Espino I sector, Tres Reyes, Mirador de la Estancia, Rincón del Porvenir y San Rafael Altos de la Estancia, UPZ 69 – Ismael Perdomo de la Localidad de Ciudad Bolívar.

En Agosto de 2005 se emite el concepto técnico No. 4222 para el barrio Rincón del Porvenir el cual recomienda incluir 15 familias al programa de reasentamiento y el CT- 4221 para el barrio San Rafael de Altos de la Estancia el cual declaró las manzanas I, J en alto riesgo no mitigable y recomendó incluir estos predios en el programa de reasentamiento de familias en alto riesgo no mitigable (36 familias) y modificar la Resolución N° 0436 de 13 de agosto de 2004; éste se elabora de acuerdo con los resultados de un estudio de riesgo a cargo de la firma de Consultoría Ingeniería y Georiesgos de noviembre de 2004.

En septiembre de 2005 se emite el concepto técnico 4225, el cual reemplaza los conceptos 3896, 3904 y 3903 de 2003 correspondientes a los desarrollos Espino I Sector, Santo Domingo (Rosales) y Santa Viviana respectivamente y más específicamente orientado a definir la condición de lo que en tales conceptos se denominó como "*Fase 3 Zona de Tratamiento Especial por*

Riesgo" en virtud de los resultados del estudio realizado por la firma de Consultoría Ingeniería y Georiesgos 2004.

En Mayo de 2006, se reactivan los procesos inestables a la altura de los barrios el Espino I Sector y Santo Domingo (Rosales), las familias que habitaban estos barrios ya se encontraban incluidos en el programa de reasentamiento de familias en Alto Riesgo No Mitigable. Por tal motivo se recomendó la evacuación definitiva de las manzanas 43,44,45 del Espino I sector y las manzanas 40, 41, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57 de Santo Domingo (Rosales) con el fin de salvaguardar la vida de los habitantes de dichas manzanas.

En Agosto y Septiembre de 2006 se formuló una Propuesta de Plan de Acción para la Mitigación del Riesgos y Rehabilitación del sector Altos de La Estancia, en búsqueda de una intervención integral por parte del Distrito. El Plan de acción se formuló con el fin de desarrollar estrategias conjuntas para la mitigación de riesgos, la recuperación y rehabilitación de la zona en un escenario de participación e intervención interinstitucional de acuerdo con sus competencias en el marco del Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias SDPAE-, de acuerdo con las recomendaciones del Estudio Riesgo y Medidas de Mitigación en el Sector Altos de la Estancia de la Localidad de Ciudad Bolívar en la Ciudad de Bogotá, D.C., realizado por la firma Ingeniería y Georiesgos Ltda.

En Junio de 2006, las Juntas de Acción Comunal de algunos barrios afectados, instauraron la Acción de Tutela No. 041 de 2006 y en Octubre de 2006 sale el fallo definitivo que ordenó a la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias -DPAE y a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, iniciar de inmediato, de manera conjunta y sin

excusa por falta de recursos presupuestales, las obras de mitigación e instalación de la red de servicios de acueducto y alcantarillado en el sector de Altos de la Estancia, Localidad de Ciudad Bolívar.

En junio de 2006 se inicia el "Sistema de monitoreo y alerta temprana por deslizamientos e inundaciones para las áreas seleccionadas en Bogotá Distrito Capital y el Municipio de Soacha, en la República de Colombia", financiado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), quien para el desarrollo del proyecto contrató a la firma Pacific Consultants Internacional en asociación con OYO Internacional Corporation. Para la aplicación de los casos piloto se seleccionó el sector de Altos de la Estancia para el tema de monitoreo de deslizamientos.

En Enero de 2007 La Dirección de Prevención y atención de Emergencias – DPAE- celebró el Contrato de Consultoría CONS No. 642 de 2007 entre Ingeniería y Georiesgos IGR LTDA y el FOPAE, con el objeto de realizar los términos de referencia para el Diseño y construcción de las Obras de Mitigación requeridas en el Sector de Altos de la Estancia de la Localidad de Ciudad Bolívar.

En Junio de 2007, La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAE-, emitió el Diagnóstico Técnico No. 3256, el cual recomienda cambiar de prioridad técnica 2 a 1 a las familias incluidas en el programa de reasentamiento y evacuar definitivamente hasta que culminen el proceso de reasentamiento a 631 familias ubicadas en la Fase II de los barrios Espino I sector, Santo Domingo (Rosales), Santa Viviana, Santa Viviana sector Vista Hermosa, Espino III sector y de 92 familias que construyeron sus viviendas posterior al censo del 2003 y que no serán objeto del reasentamiento, con el fin de salvaguardar la vida de los habitantes dadas las condiciones del

fenómeno y disponer de los predios para la ejecución de las obras de Mitigación requeridas en el Sector de Altos de la Estancia de la Localidad de Ciudad Bolívar en cumplimiento a la Acción de Tutela 041 de 2006.

Así mismo, la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias DPAE, ha realizado las obras de emergencia que se relacionan en la **Tabla 3.1** y ha incluido un total de 3087 familias al Programa de Reasentamiento de Familias en Alto Riesgo No Mitigable. En la **Tabla 3.2** Se presentan los barrios y el número de las familias incluidas en las fases (I, II) en las que se desarrollará en dicho proceso.

Tabla 3-1. Relación de obras de emergencia elaboradas por la DPAE

OBJETO CONTRATO	Barrio	Año
Reconformación del terreno en el Barrio Santa Viviana-sector vista hermosa a la altura de las manzanas 3,7,12,13,14,15,16,y 76	Barrio Santa Viivana	1999- 2000
Construcción de Obras de emergencia en el cauce de la quebrada Santa Rita, sector de la calle 64 Sur con carrera 75 B Bis, Barrio San Rafael, localidad de Ciudad Bolívar, consistentes en excavaciones, instalación de tubería metálica, construcción de muro	Barrio San Rafael	2002
Construcción de obras de emergencia en el sector de la calle 63C Sur con carrera 74 H, Barrio San Rafael, localidad de Ciudad Bolívar, consistentes en la instalación de una Barrera de protección provisional con malla de alambre galvanizado y tubos de hierro.	Barrio San Rafael	2002
Construcción de obras de emergencia en San Rafael, parapeto y excavaciones para cauce de la localidad de Ciudad Bolívar	Barrio San Rafael	2002

Construcción de Obras de Mitigación de riesgos en el sector localizado entre las calles 71 y 73 sur con transversal 81 y carrera 81, en el barrio Perdomo Alto, localidad de Ciudad Bolívar, consistentes en el terraceo del talud, protección del talud con malla-mortero y empradización con malla y obras de drenajes.	Barrio Perdomo	2003
Construcción de obra de mitigación de riesgos en el sector de la Calle 59 A Bis Sur y 61 A Sur y Carreras 75 L y 75K Bis Barrio San Isidro, Localidad de Ciudad Bolívar consistentes en el perfilado del talud, protección con malla mortero, anclajes, empradización y obras de drenaje	Barrio San Isidro	2004
Construcción de obras de mitigación de riesgos en la quebrada Santa Rita a la altura calle 75B Bis, en el límite de los barrios Cerros del Diamante y el Rincón del Porvenir, Localidad de Ciudad Bolívar, Distrito Capital, consistentes en obras de drenaje, excavaciones y rellenos.	Barrio San Rafael	2005

Tabla 3-2. Número de familias incluidas en el programa de reasentamiento

Familias Incluidas en el Programa de Reasentamiento de Familias en Alto Riesgo No Mitigable para el Sector Altos de la Estancia			
Deslizamiento la Carbonera y Espino	Barrios: San Antonio del Mirador, Santa Helena, Santa Viviana sector Vista Hermosa, Santo Domingo (Rosales), La carbonera, Cerro del Diamante, Espino III sector, Espino I sector, Rincón del Porvenir, San Rafael Altos de la Estancia, Mirador de la Estancia, Tres Reyes.	Fase I	Fase II
		1546	**1576**

3.2. INFORMES

La relación de informes consultados para este estudio fue la siguiente:

- UPES – FOPAE - INGEOCIM Ltda., 1998. Zonificación por Inestabilidad del Terreno para Diferentes Localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá, D.C.
- Consorcio Civiles Ltda – Hidroconsulta Ltda. - FOPAE, 1999. Estudio Geotécnico, Evaluación de Alternativas de Medidas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras Recomendadas para Estabilizar la Zona Comprendida entre las Quebradas Santo Domingo (Rosales) y Santa Rita, Barrio El Espino.
- Ingeniería y Geotecnia Ltda. -FOPAE, 1999. Estudio Geotécnico, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras Recomendadas para Estabilizar la Cuenca de la Quebrada La Carbonera en la Localidad de Ciudad Bolívar.
- Ingemétrica – FOPAE, 2000. Diseño e Instrumentación para el Monitoreo y Seguimiento del Deslizamiento en la Cuenca de la Quebrada Carbonera.
- Geotecnia y Cimentaciones Ltda. -FOPAE, 2001. Diseño e Instalación de la Instrumentación para el Monitoreo y Seguimiento de los Fenómenos de Remoción en Masa del Barrio El Espino.
- Geotecnia y Cimentaciones Ltda. – FOPAE, 2002. Monitoreo y Seguimiento al Deslizamiento de los barrios San Antonio del Mirador, Santa Helena, Santa Vivian, Vista Hermosa, Santo Domingo (Rosales) y la Carbonera.
- INGEOMINAS - FOPAE, 2003. Estudio de Evaluación de Amenaza por Deslizamiento para los Barrios El Espino y Cerro del Diamante, e Instalación y Monitoreo de Instrumentación Geotécnica.
- Moya y García Ltda. - FOPAE, 2003. Monitoreo y Seguimiento al Deslizamiento que Afecta los Barrios San Antonio del Mirador, Santa Helena, Santa Viviana, Santa Viviana Sector Vista Hermosa, Santo Domingo (Rosales) y La Carbonera de la Localidad de Ciudad Bolívar.
- Estudio de Riesgo por Remoción en Masa, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de la obras de protección y control en el barrio San Rafael, 2003.
- Ingeniería & Georiesgos Ltda. -FOPAE, Julio 2003 – Febrero 2004. Monitoreo y Seguimiento a los Deslizamientos Activos que Afectan el Sector de Altos de la Estancia.
- Geocing Ltda – FOPAE, 2003. Estudio de Riesgo por Remoción en Masa, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras de Protección y Control en el Barrio San Rafael, de la Localidad de Ciudad Bolívar de Bogotá D.C.

- En el 2004 con financiación de la Agencia Colombiana de Cooperación Internacional, ACCI, se realizó el "*Estudio de Riesgo y Diseño de Medidas de Mitigación en el Sector Altos de La Estancia, Localidad de Ciudad Bolívar*, Bogotá D.C." con la firma *Ingeniería y Georiesgos*.
- Geotecnia y Cimentaciones – FOPAE 2005 – Agosto, 2005. Monitoreo y Seguimiento a los deslizamientos activos que afectan el Sector Altos de la Estancia de la Localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C.

En estos informes se encontraron múltiples levantamientos topográficos, mapas geológicos y geomorfológicos, exploración geotécnica, mapas de amenaza, riesgo y vulnerabilidad, diseño de obras, monitoreos y evaluación de costos. A continuación se presentan los principales aspectos extraídos de algunos de estos informes.

3.2.1. Ingeominas – Fopae 2003

Estudio realizado en el año de 2003 como objeto de un Convenio entre el INGEOMINAS y el FOPAE. Este estudió se concentró principalmente en el sector de El Espino. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

- La zona de El Espino y Cerro del Diamante está conformada por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Guaduas, consistente de intercalaciones de arenisca y arcillolita, inclinadas en la misma dirección de la pendiente y afectadas por fallamiento. Esta circunstancia las hace naturalmente muy inestables y susceptibles a los movimientos en masa.

- Las fallas principales que atraviesan el sector, son inversas, de dirección N80ºE a E-W, controlan los cauces de las quebradas Santa Rita y Santo Domingo (Rosales) y delimitan el deslizamiento El Espino y Cerro del Diamante. También se presentan fallas de rumbo, posiblemente dextrales, con dirección NNW. Estas marcan cambios de pendiente bruscos en la parte media del cuerpo mayor del movimiento en masa.

- El movimiento principal del Espino y Cerro del Diamante se ha considerado como un deslizamiento traslacional de detritos con corona retrogresiva. A partir de este fenómeno se han originado gran

cantidad de grietas de distensión que afectaron las viviendas de los barrios Cerros del Diamante y El Espino.

- El volumen de infiltración y percolación profunda de agua en el suelo puede ser del orden de un 15% de la diferencia entre la precipitación promedio y la evapotranspiración real promedio. El valor así estimado de infiltración en este sector puede estar alrededor de 14.56 mm al año. Por otra parte, para la parte inferior del movimiento, dada la presencia de grietas y en general el estado de remoción del material, podría considerarse que en el cuerpo del movimiento la infiltración correspondiera al 95% de dicha diferencia, o sea, 92.25 mm.

- No se encontró relación entre los reportes de eventos con la ocurrencia de lluvias acumuladas precedentes al mismo.

- La velocidad de avance del movimiento principal, controlada mediante mojones registró
- velocidades de desplazamiento desde mediados de abril a finales de julio del orden de 0.04 – 0.14 m/d, desde inicio de agosto a mediados de septiembre se presenta la aceleración máxima del movimiento con velocidades de 0.10 – 0.18 m/d, de allí comienza la máxima desaceleración hasta finales de noviembre con velocidades inferiores a 0.02 m/d, finalmente continua disminuyendo su velocidad hasta terminar a finales de marzo de 2003 con Estudio – Diseño Detallado de Obras de Mitigación para el Sector Altos de La Estancia – Localidad Ciudad Bolívar CONSORCIO ALTOS DE LA ESTANCIA 22 velocidades inferiores a 0.01 m/d. La dirección de los desplazamientos varía entre 30 y 40° NE.

- Los desplazamientos en profundidad en la zona de retrogresión del movimiento principal evidenciados en los inclinómetros 2, 4 y 5 nos muestran una tendencia a la ruptura (superficie de falla) en el inicio del estrato de arcillolitas compactas, cercano a los 20 m de profundidad, desplazándose el bloque superior sobre el inferior.

- A partir de las perforaciones se obtuvo que el plano de falla tiene una dirección de buzamiento de 280 y un buzamiento de 130 sin embargo no se descarta la presencia de pequeños pliegues en profundidad.

- Un factor que influyó en la disminución de los parámetros de resistencia del material, fue la pérdida de succión de la arcillolita al entrar en contacto con el agua.

- El desarrollo del movimiento en masa que afecta El Espino y Cerro del Diamante se ve fuertemente influido por las propiedades de los materiales –ubicados en zonas de fallas o cerca de ellas con bajos parámetros de resistencia al corte en condición residual - y la disposición de los mismos – intercalaciones de arcillolitas y areniscas fracturadas que descansan en un estrato de arcillolita compacta, con buzamientos muy cercanos a las pendientes de las laderas siguiendo una disposición similar a la topografía del terreno. Sin embargo se ha visto durante el estudio que la intervención antrópica ha sido decisiva en la detonación del fenómeno en lo que se refiere a la instalación de sistemas de redes de acueducto y aguas servidas que posteriormente han sufrido roturas provocando fugas considerables. Uno de los ejes de las redes instaladas coincide con el eje del escarpe principal del movimiento, que según habitantes del sector fue construido realizando explosiones. La influencia de la lluvia como detonante del movimiento principal no es considerable, sin embargo esta ha llegado a acelerar movimientos.

De acuerdo con este estudio, el perfil en la zona de El Espino está caracterizado por una capa de hasta 3,0 m de espesor conformada por un relleno heterogéneo. Posteriormente se encuentra una capa de matriz arcillosa con fragmentos de arenisca hasta una profundidad máxima de 20m. Luego se encuentra una capa de arcillolita con algunos fragmentos de arenisca hasta una profundidad máxima de 21 m. A una mayor profundidad se encuentra la roca arenisca altamente fracturada hasta una profundidad máxima de 26 m. Finalmente se encontró una capa de arcillolita blanda con presencia de materia orgánica. Para este estudio se efectuaron 11 Perforaciones entre 20 Y 40 m y se obtuvieron los parámetros promedio que se relacionan en la **Tabla 3.3.**

Tabla 3-3. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de INGEOMINAS

ESTRATO	ESPESOR DEL ESTRATO m	□t gr/cm³	Is (50) Paral Kg/cm²	Is (50) Perp Kg/cm²	C'p Kg/cm²	□'p	C'r Kg/cm²	□'r	RSC	K cm/s
Suelo Residual	0.5-1.6									
Arenisca	13-19	2.3	30.1	33.5						
Arenisca - Arcillolita	1.8-4.6	2.1			0.2	30	0	12.5	1.3-1.1	6.5E-08
Arcillolita	-	2.11			0.1	45	0	25	1	8.5E-08

3.2.2. Ingeniería y Georiesgos 2004

Estudio realizado en 2004 para la DPAE con el fin de estabilizar la zona de estudio correspondiente al sector de la Carbonera y el del Espino. Del estudio se resumen los siguientes aspectos:

- Litoestratigráficamente en la zona de estudio se presentan dos unidades de roca de tipo sedimentario clástico conformando las Formaciones Guadalupe de edad Cretáceo superior con su unidad Arenisca Tierna y la Formación Guaduas de edad Cretáceo – Terciario y de composición predominantemente arcillosa y en menor proporción arenosa.
- El estudio y análisis litoestratigráfico del subsuelo permitió establecer que a partir del trazo de la falla de Los Rosales ubicada en la parte central se presentan en el área de interés, dos bloques tectónicos, uno hundido que corresponden a la zona de El Espino permitiendo aflorar una secuencia predominantemente arenosa de la parte media de la Formación Guaduas (Segmentos 3, 4 y 5) y otro bloque levantado que corresponde a la zona de la Carbonera y en donde subyace bajo los depósitos cuaternarios una secuencia predominantemente arcillosas de la Formación Guaduas (segmentos 1 y 2).
- En cuanto a la caracterización de las formaciones litológicas superficiales se puede resaltar la presencia de una espesa secuencia de materiales inconsolidados, particularmente en la zona de la Carbonera, con la presencia de depósitos de residuos de construcción (>1m de espesor), depósitos fluvioglaciales con espesores máximos de 40 metros y en menor proporción suelos

residuales y depósitos coluviales y aluviales menores. En el sector de El Espino los materiales inconsolidados se relacionan principalmente con suelos residuales y localmente con algunos coluviones y depósitos aluviales menores de las quebradas.

- La evaluación hidrogeológica de las fallas del sitio de estudio muestra que los sistemas con orientación Oriente-Occidente se constituyen en barreras impermeables para el flujo de agua, mientras las fallas con orientación preferencial Norte-Sur tienen comportamiento variable desde barrera impermeable como las falla Mochuelo, El Morro y Sierra Morena a barreras permeables como El Espino E y Carbonera S.
- Mediante los estudios de exploración de campo y laboratorio y, con base en los estudios geológicos, el área de estudio se puede subdividir en 12 subzonas de comportamiento geotécnico similar, mostrando gran heterogeneidad y complejidad de comportamiento mecánico, es así como se encuentran depósitos antrópicos de residuos de construcción (zona 1), suelos residuales de areniscas (zona 3), depósitos fluvioglaciales (zona 4), areniscas (zona 5) y arcillolitas (zona 2).
- Los análisis realizados muestran que la pérdida de resistencia de los materiales arcillosos en los primeros metros del subsuelo, causan que toda la masa del sector del deslizamiento del Espino trate de desplazarse ladera abajo, sin embargo al encontrar el talud de la margen izquierda de la quebrada Santa Rita esta trata de levantarse y causa grandes esfuerzos que comprimen la masa de suelo y producen levantamientos de la parte posterior del talud de la quebrada.
- Se concluyó, que las medidas más adecuadas son obras de manejo del agua (drenes y cunetas) para el sector de la Carbonera, con lo que se mitigan los niveles de amenaza. Por otra parte, en el sector el Espino se recomienda la construcción de anclajes y drenes.
- De acuerdo con el estudio, el perfil se caracteriza por una capa de relleno antrópico de máximo 80 cm de espesor. Posteriormente se encuentra una capa de materiales arcillosos y arenosos hasta una profundidad máxima de 4m. Sigue una capa de fragmentos de arenisca en matriz limoarcillosa hasta una profundidad máxima de 22m. A partir de esta profundidad de manera general se encuentra la roca correspondiente a arenisca aunque en algunos sitios ésta puede aparecer hasta los 40m de profundidad según lo reportado en los SEV.

Para este estudio se efectuaron 4 Sondeos mecánicos entre 14 y 37 m de profundidad, 17 Trincheras (de 1.40 a 10 m), 8 líneas de refracción sísmica y

7 Sondeos eléctricos verticales. De acuerdo con la exploración y ensayos de laboratorio se obtuvieron los parámetros que se relacionan en la **Tabla 3.4** para cada uno de los estratos definidos en el perfil típico:

Tabla 3-4. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de Ingeniería y Georiesgos

ESTRATO	ESPESOR DEL ESTRATO (m)	% humedad	LL %	γt gr/cm3	qu t/m2	C' t/m2	φ'
Relleno Antrópico	0.0 - 0.8	5-10	50	2.0			
Depósito arcillo-arenoso	0.8 - 4.0	5-10	30-90	1.9-2.2	12-160	0.6-6.9	14-34
Fragmentos de arenisca en matriz limoarcillosa	4.0 - 22.0	20-25	16-64	2.0-2.1	12-160	0.6-6.9	14-34
Arenisca	22.0	1-16	-	2.0-2.5	1400-9500		

3.2.3. Ingeniería y Geotecnia 1999

Este estudio fue realizado para la DPAE en 1999. Se concentró principalmente en el sector de La Carbonera. Consistió en proponer mas no diseñar medidas de estabilización del sector. Para este estudio se efectuaron 7 Perforaciones entre 3.50 y 12 m, 3 Sev hasta 75 m de profundidad y 31 Trincheras desde 1.3 m de longitud hasta 5.80 m De los ensayos realizados se obtuvieron los parámetros promedio que se presentan en la **Tabla 3.5.**

Tabla 3-5. Parámetros de resistencia promedio para el estudio de Ingeniería y Geotecnia

ESTRATO	**γt gr/cm3**	**C' t/m2**	**φ'**
Depósito	1.95	0.12-0.24	22.1-25.4
Roca			
	2.10	0	35.3-42.9
Subyacente			

3.2.4. Consorcio Civiles Ltda. – Hidroconsulta Ltda. 1999

Este estudio fue realizado para la DPAE en 1999. El resultado de dicho estudio arroja una zonificación por niveles de amenaza, riesgo y vulnerabilidad de la zona de estudio en donde el 80% del área analizada posee amenaza y riesgo alto. Se realiza un planteamiento de obras para la reducción de la amenaza mediante drenaje superficial, reconformación de materiales, paisajismo y urbanismo.

Como obras se plantean la construcción de cunetas con filtros en la parte alta de la quebrada Santa Rita, para recoger escorrentía y aguas servidas, la construcción de una alcantarilla cajón aguas abajo en la quebrada Santa Rita, la conformación de diques en gaviones y siembra de especies vegetales con el fin de proteger el cauce contra la erosión y garantizar la ronda hidráulica de dicha quebrada. Como medida adicional se recomienda el retiro de materiales inestables y reconformación del sector en terrazas.

En el área de urbanismo y paisajismo se plantea la reubicación de 33 viviendas, la construcción de un parque y andenes. Se recomienda reforestar la parte alta del sector El Espino con algunas especies de pino.

En las actividades de campo realizadas se identifico la modificación del cauce de la quebrada Santa Rita con el fin de facilitar las actividades de explotación de materiales. Para este estudio se efectuaron dos sondeos mecanicos de 3.4m y 6.65 m de profundidad. Con ellos se caracterizó un perfil compuesto por un relleno heterogéneo hasta una profundidad máxima de 6,5 m. El relleno contiene gravas y escombros y en general muestra una matriz de arcilla caolinítica.

3.2.5. *Geotecnia y Cimentaciones Ltda. 2001*

Este estudio fue realizado para la DPAE en 2001. En este informe se encuentra el resultado de las siete campañas de monitoreo realizadas desde diciembre de 2004 a julio de 2005. En cada una de estas campañas se desarrollaron las siguientes actividades:

- Control topográfico de 10 secciones
- Campañas de instrumentación geotécnica a inclinómetros existentes y nuevos.
- Evaluación geológica y geotécnica.
- Monitoreo estructural de las 250 viviendas seleccionadas.

Para este estudio efectuaron cuatro perforaciones con profundidades entre 9.2 m y 16.8 metros. Con ellas se definió un perfil caracterizado por una capa de relleno heterogéneo hasta unos 1,80 m de espesor, seguido por un conglomerado de arenisca hasta una profundidad máxima de 4,0 y por debajo de este una secuencia de intercalaciones de arenisca y arcillolita de 3 m de espesor promedio.

3.2.6. *MGL Moya y García Ltda. 2003*

Este estudio fue realizado para la DPAE en 2003. El estudio consistió de la observación y medición de la evolución del deslizamiento y su influencia sobre las viviendas del sector con el objeto de servir a la DPAE para tomar las medidas preventivas necesarias para proteger a los habitantes. Incluyó el seguimiento al deslizamiento y sus desplazamientos, la evaluación de daños en un grupo representativo de viviendas del sector para establecer el nivel de riesgo permisible, el establecimiento de un sistema de alarma para priorizar los sectores que deben ser objeto de evacuación o reubicación de familias y afinar el modelo geotécnico, incorporando la información obtenida a partir de los resultados de la instrumentación.

4. ESTUDIO GEOLÓGICO

Durante el estudio para la zonificación de riesgos y amenazas realizada por la firma de Georiesgos con financiación de la Agencia Colombiana de Cooperación Internacional, ACCI, se realizó un estudio geológico que tuvo un enfoque regional, semiregional y local que dio lugar a establecer un modelo geológico y geomorfológico de la zona y que fue discutido con el grupo técnico de la DPAE y la interventoria. Tomando como base este modelo y con el criterio principal de que ellos deben servir para el diseño de obras de estabilidad, en este estudio se procedió a dar continuidad a esos trabajos pero detallando más la geología de algunos sitios de interés. Para ello se emplearon todos los datos disponibles de sondeos directos, perfiles geofísicos y la utilización de imágenes digitales de satélite de alta resolución y de registro reciente para la elaboración de un gran número de secciones geológicas amarradas a los datos de perforación y de la refracción sísmica.

4.1. MÉTODO DEL ESTUDIO GEOLÓGICO

Para el estudio geológico se desarrollaron las siguientes actividades y métodos de análisis y levantamiento de datos:

- *Análisis y evaluación de estudios anteriores*. Se compilaron, analizaron y estructuraron en un SIG la información geológica, particularmente los referentes a cartografía geológica, datos del subsuelo de sondeos y estudios de reflexión y refracción sísmica.
- *Levantamiento de campo*. Se realizó un levantamiento geológico y estructural de tres sitios de interés para corroborar y complementar alguna información.
- *Análisis y revisión de registros de perforación.* Con las cinco perforaciones realizadas se realizo su análisis litológico y el levantamiento de su correspondiente registro.

- *Identificación, selección y adquisición de sensores remotos digitales.* Se consultó la información de aerofotografías, imágenes digitales existentes y se adquirió por el proyecto una imagen Ikonos de alta resolución espacial (1 metro /píxel) registrada el 6 de Febrero de 2007. Adicionalmente se contó con una imagen Quickbird de alta resolución espacial (60 cm/píxel), registrada el 5 de Mayo de 2007 y se contó con la colaboración de la firma Skymission para la toma de fotografías aéreas digitales con fines investigativos, sobre un avión no tripulado con resolución espacial entre 15 y 9 cm. Esta toma se realizó el día 7 de Febrero de 2008, con el permiso de la DPAE, el Ministerio de Defensa y la Aeronáutica Civil.
- *Procesamiento de sensores remotos.* En esta fase se realizó el procesamiento digital de los productos anteriormente nombrados. Entre estos procesos se puede resaltar: a) importación de imágenes a partir de los archivos brutos, b) correcciones geométricas a partir de puntos de control y el modelo digital de terreno, a fín de dar ajuste a la cartografía de referencia, Transversa de Mercator, Internacional 1909, Datum Bogotá Observatorio. Realce espectral para mejorar el contraste de elementos del terreno como estructuras geológicas , unidades litológicas y otros. Realce espacial con el fin de mejorar la resolución espacial de algunos productos, obtener imágenes estereoscópicas y vista 3D.
- *Interpretación de sensores remotos.* Una vez realizado el procesamiento digital de los diferentes productos obtenidos, se procedió a la interpretación de unidades geológicas, estructuras, rasgos geomorfológicos y demás. Estas interpretaciones se realizaron en formato vectorial sobre la pantalla del computador con vistas 3D y 2D.
- *Edición de mapas geológicos estructurales preliminares.* En esta fase se editó y estructuró la información interpretada en mapas.
- *Elaboración de perfiles geológicos.* Con el objeto de comprender la estratigrafía, litología y condiciones litogeotécnicas de los materiales en el subsuelo, se elaboraron cerca de 15 perfiles geológicos con escala vertical 1:500 y escala horizontal 1:1000.
- *Control de campo.* Con los productos preliminares se realizó un control de campo con el geotecnista y otros profesionales del proyecto. Igualmente este el mapa geológico de superficie fue sujeto a revisiones de campo por parte de profesionales de la Firma Interventora y de la DPAE.
- *Ajuste de información.* Luego de los controles de campo se procedió a la reinterpretación de las imágenes para realizar algunos ajustes anotados en las fases de campo.

4.2. ESTUDIOS GEOLÓGICOS SEMIREGIONALES

De los estudios geológicos semiregionales (1:25.000) en el área de interés, se destacan los trabajos de Juliver (1963) e Ingeominas- Ingeocim (1998) En el primero se presenta en una sucesión normal de capas con rumbos NW e inclinadas hacia el NE que de base a techo (Sur a Norte) se encuentra la Formación Guadalupe, con su Miembro Arenisca Tierna; a este le sigue en su tope una unidad del Guaduas Inferior formada por areniscas, arcillolitas y mantos de Carbón y en el techo areniscas cuarzosas de la Formación Guaduas denominada como la Arenisca Guía**.**

El segundo estudio geológico semiregional (1:25.000), realizado por Ingeocim (1998) para el estudio de zonificación de amenazas en Bogotá, presenta en la zona tres unidades similares a Juliver (1963) con una posición estructural normal en las que se destaca en base del Guadalupe (Arenisca Tierna), la parte inferior del Guaduas (Ktgi) y en el tope la parte media del la Formación Guaduas (Ktgm).

4.3. GEOLOGÍA DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA

Dada las diferencias cartográfica y las limitantes de escala hacia la precisión de la cartografía geológica regional, se levanto en este estudio un mapa generalizado a escala local 1:5000 del denominado Cerro Alto de la Estancia. (Ver **Plano 3**).

En general la cartografía muestra una secuencia de unidades litoestratigráficas del cretáceo al terciario cubierta parcial y discordantemente por materiales y depósitos cuaternarios de diferente origen. Esta secuencia se presenta en franjas orientadas en dirección NW-SE. Desde la base en la parte Sur del área afloran rocas del cretáceo de la

formación Guadalupe y sus miembros Plaeners (Ksgp), Labor (Ksgl) y Arenisca Tierna (Ksgt) en contactos normales. Encina de está secuencia se presentan las rocas de la formación Guaduas de edad terciario - cretáceo subdividida en tres unidades inferior (Tkgi), medio (Tkgm) y superior (Tkgs). Los materiales semiconsolidados que se presentan en la planicie de la Sabana de Bogotá corresponden a la Formación Tilatá de edad Terciario, superior. (Ver **Plano 3**).

Los depósitos cuaternarios más importantes en el Cerro Altos de la Estancia corresponden a depósitos de ladera como coluviones y derrubios (Qd), depósitos fluviolacustres asociados a la zona de depresión morfológica del embalse de Terreros (Qfl), un depósito remanente de origen fluvioglaciar (Qfg), localizado en la ladera nororiental del cerro en inmediaciones de Sierra Morena y materiales depositados por corrientes aluviales superficiales y humedales (Qah). Localmente se identifican materiales de rellenos y botaderos de escombros antrópicos (Qb). Igualmente la dinámica de las laderas por procesos de remoción en masa ha originado depósitos de deslizamientos en los que se encuentran El espino y La Carbonera de interés de este estudio.



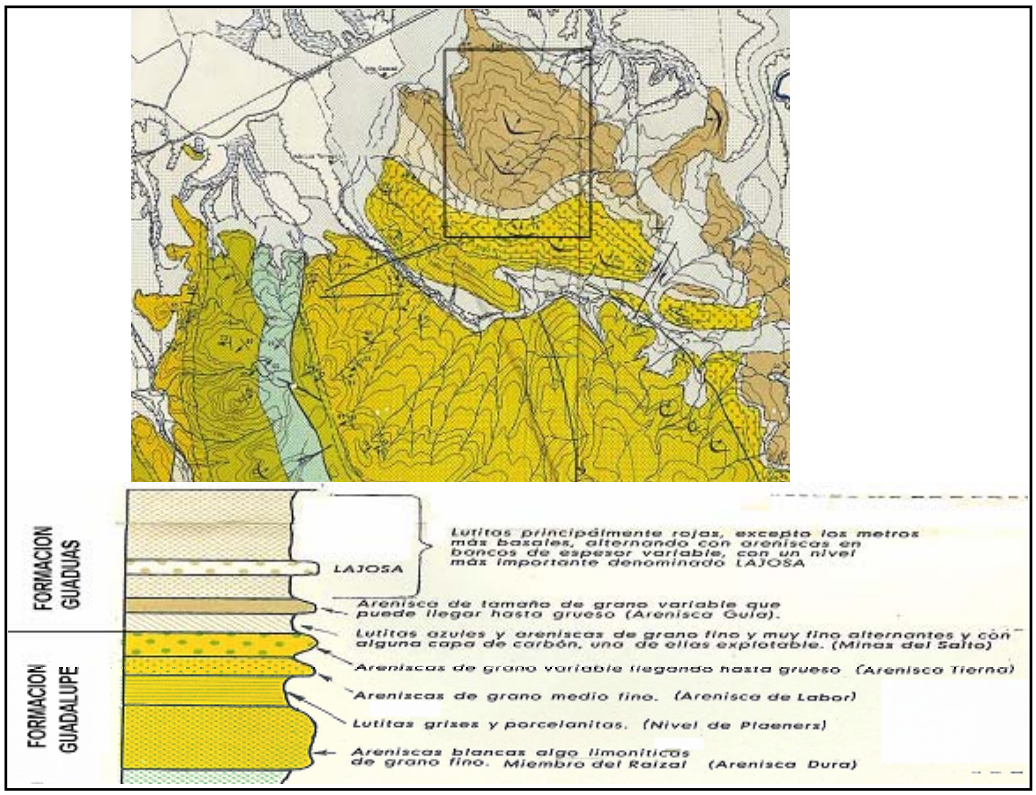


Figura 4-1. Marco geológico regional de acuerdo al Juliver 1963.

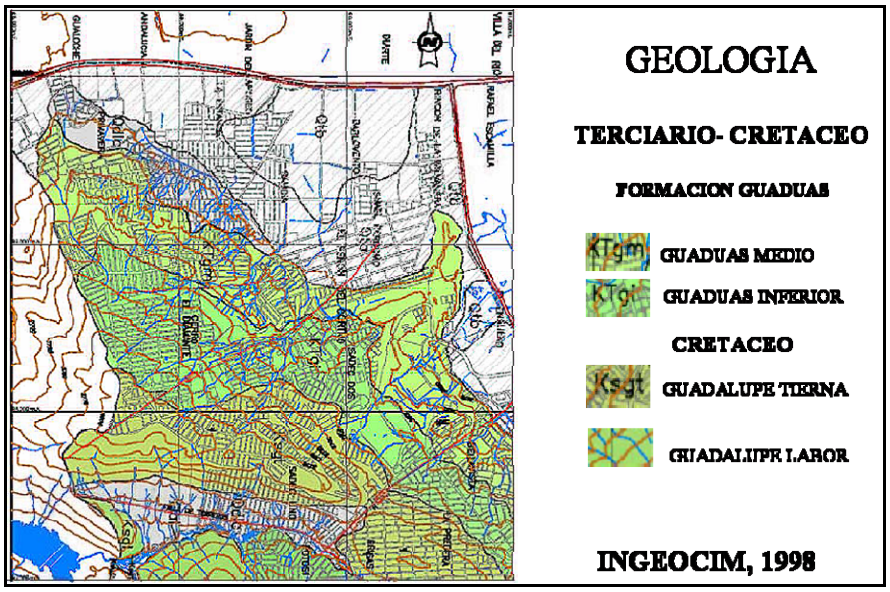


Figura 4-2. Geología semiregional según Ingeocim, 1998

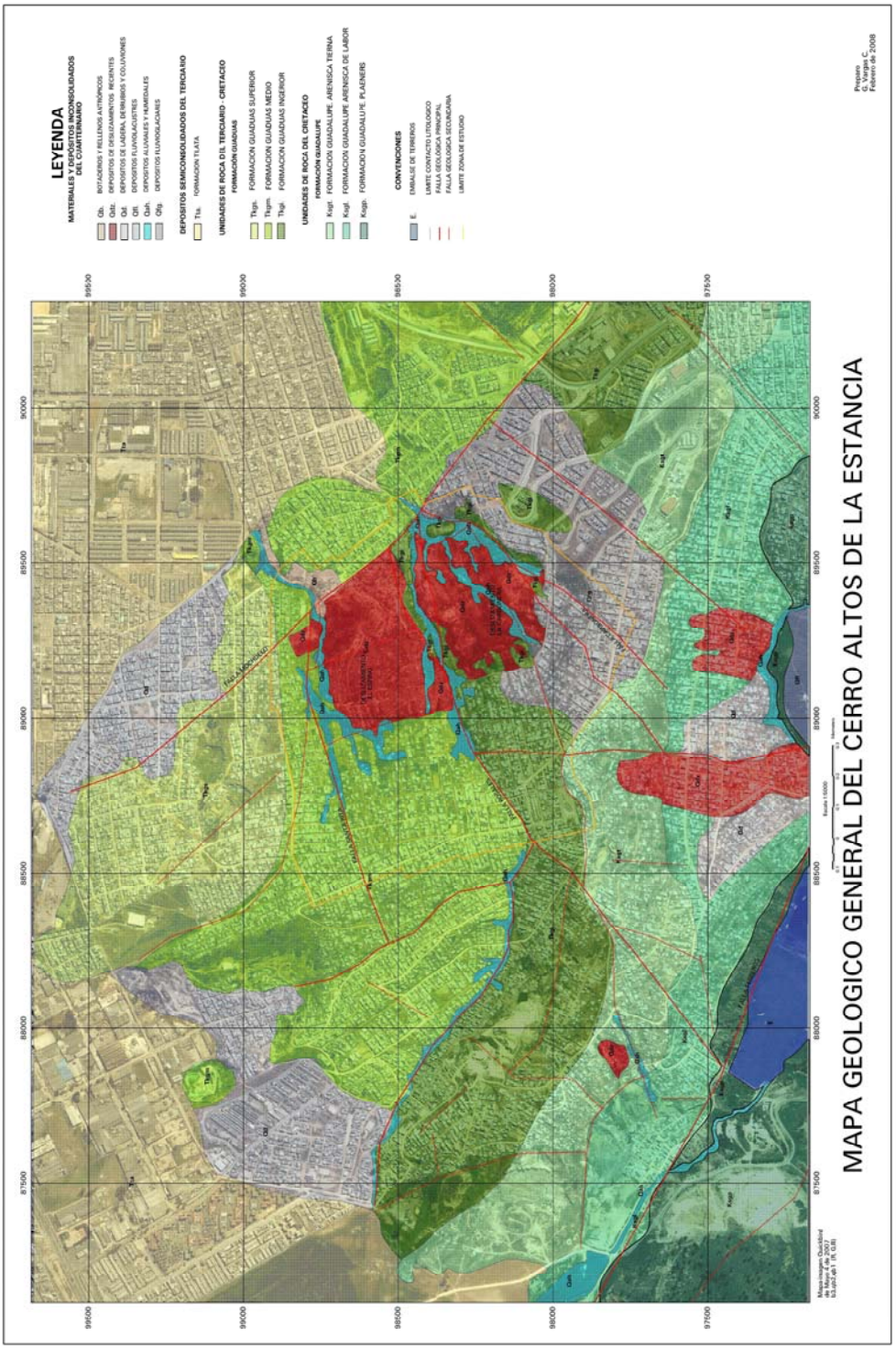


Figura 4-3. Mapa geológico regional

Como estructuras geológicas se destaca la presencia de dos sistemas de fallas: uno principal de dirección NW-SE en las que se encuentran el sistema de fallas de Mochuelo y al NE y Terreros al SW. El otro sistema de fallas se presenta en dirección NE en el cual se destacan las fallas de Santa Rita, rosales y Carbonera. A continuación se presenta una breve descripción de estas unidades litoestratigráficas desde la más reciente a la más antigua.

4.3.1. Unidades litoestratigráficas

Las unidades litoestratigrafícas del Cerro Altos de la Estancia caracterizan formaciones rocosas y depósitos sedimentarios desde el Cuaternario al Cretáceo Superior así:

Depósitos y materiales inconsolidados del Cuaternario

En el Cerro Altos de la Estancia se identificaron y caracterizaron los siguientes materiales y depósitos inconsolidados del Cuaternaria al reciente: depósitos y rellenos antrópicos (Qb), depósitos de deslizamientos recientes (Qdz), depósitos de ladera como derrubios y coluviones (Qd), depósitos fluviolacustres (Qfl), depósitos aluviales y humedales (Qah) y depósitos fluvioglaciares (Qfg).

Depósitos y rellenos antrópicos (Qb)

Corresponden a materiales de desechos de escombros de antiguas explotaciones de canteras, desechos de construcciones y botaderos de escombros. Se localizan principalmente en el sector de Perdomo Alto, en la parte baja de la quebrada Santa Rita sobre su margen derecha.

Depósitos de deslizamientos recientes (Qdz)

Sobre el Cerro Altos de la Estancia se presentan numerosos movimientos en masa como caídas de roca, flujos superficiales y deslizamientos rotacionales muy locales, sin embargo se destacan los ubicados en la vertiente NE del cerro como los denominados La Carbonera entre la quebrada Carbonera y la Quebrada Rosales y el Espino entre la quebrada Rosales y la Quebrada Santa Rita. Otros 3 movimientos de extensión importante, se localizan sobre la vertiente SW del Cerro que vierten hacia la depresión de Terreros.

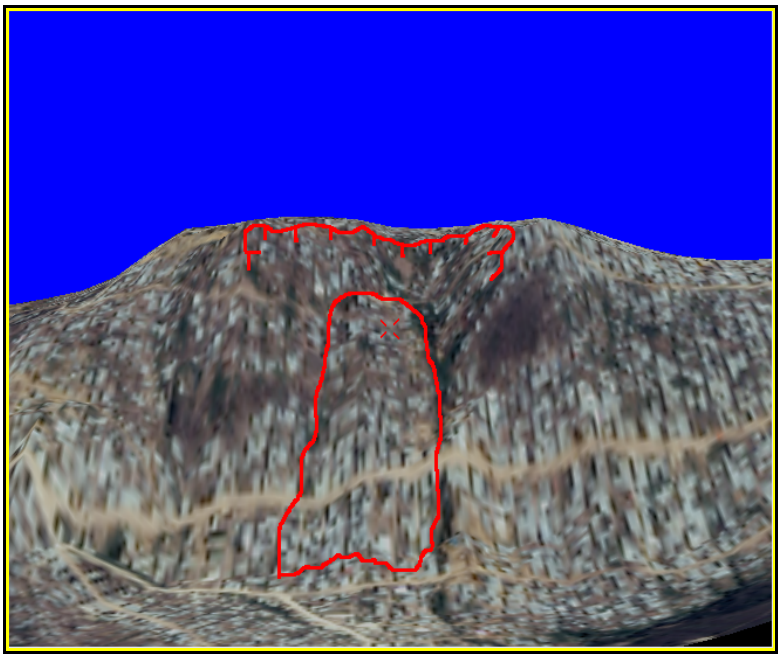


Figura 4-4. Vista 3D del deslizamiento de Terreros en la vertiente sur del Cerro a espaldas de la zona de a Carbonera. Nótese su nicho de arranque y su morfología típica del depósito.

En general estos depósitos se caracterizan por presentar numerosos fragmentos de rocas generalmente areniscas y limolitas de diferente tamaño, embebidos en una matriz limo arenosa a limo arcillosa poco a moderadamente compacta.

Su espesor puede ser de unos pocos metros como en La Carbonera. En la sección de geología de detalle y en el capítulo de geomorfología se tratará este tema con mayor profundidad.

Depósitos de ladera. Derrubios y coluviones (Qd)

Se presentan en gran parte de las laderas, pero se destacan los ubicados en la base del cerro en el extremo noroeste y norte de su vertiente norte y sobre la vertiente opuesta en inmediaciones del embalse de Terreros. Los primeros depósitos se acumulan en el pie de la ladera compuestos por fragmentos de areniscas de diferentes tamaños (grava a bloques en una matriz areno limosa poco compacta. Estos depósitos pueden alcanzar más de 5 metros de profundidad. Los segundos depósitos se presentan sobre una ladera de mayor pendiente, se entremezclan con materiales deslizados y son más superficiales.

Depósitos fluviolacustres (Qfl)

Se desarrollan en ambientes fluviales y lacustres de baja energía de depositación. En el área se ubican en la denominada depresión de Terreros. Estos materiales se componen de sedimentos finos como limos y arcillas con algunas gravas.

Depósitos aluviales y humedales (Qah)

Son de poca magnitud en el área del cerro y se presentan principalmente en el curso de las quebradas Carbonera, Rosales y Santa Rita. Se componen de sedimentos areno limosos con presencia de niveles delgados de gravas.

Depósitos fluvioglaciares (Qfg)

Son depósitos remanentes de glaciares retrabajados por corrientes fluviales, Van der Hammmen, 1986 y 1992), precisa que estos depósitos se alternan

con arcillas, arcillas turbosas, o turbas arcillosas y/o paleosuelos en sitios altos, como los encontrados en la parte alta de La Carbonera.

En el área, se presenta en el sector de Sierra Morena sobre la vertiente nororiental del cerro. Estos materiales se presentan bien expuestos en los taludes de la vía a Sierra Morena compuestos por bloques de areniscas de forma irregular, bordes subangulares a subredondeados en una matriz arcillosa a limo arcillosa de color crema amarillento moderadamente compacta a compacta. Su espesor puede alcanzar hasta 10 metros. Localmente, se observó este material entremezclado con depósitos de ladera tipo derrubios o coluviones.

Unidades de roca del Terciariotardío Formación Tilatá

Se presenta sobre la planicie de la Sabana de Bogotá y en particular en la parte norte del área de este estudio local. Esta unidad se compone de arenas compactas y gravas de origen fluvial con intercalaciones de arcillas orgánicas y turbas.



Figura 4-5. Vista de depósitos fluvioglaciares en el talud de la vía a Sierra Morena. Nótese la presencia de bloques erráticos en una matriz crema amarillenta.

Unidades de roca del Terciario –Cretáceo Formación Guaduas

La Formación Guaduas de edad Maestrichtiano Superior a Paleoceno Inferior, es una unidad sedimentaria depositada en un ambiente marino para la parte inferior y transicional y aluvial para la parte media y superior fluviolacustre presenta en la Sabana de Bogotá un espesor entre los 700 m y 1000 m .

La Formación Guaduas, es la principal unidad litoestratigráfica del Cerro Altos de la Estancia y en gran parte involucrada en la dinámica de los movimientos en masa denominados como El Espino y La Carbonera.

Está Formación está formada principalmente por una secuencia de limolitas, arcillolitas y lutitas grises con gruesas intercalaciones de arenitas y capas de carbón; se destacan como niveles guías dos intercalaciones de arenitas denominadas Arenisca Guía cerca a la base y Arenisca Lajosa cerca al tope.

La Formación Guaduas se ha subdividido así:

- Guaduas Conjunto Inferior (KTgi). Consta esencialmente de lodolitas (lutitas) arcillolitas y limolitas grises intercaladas con areniscas de grano fino a medio, de color crema, amarillas en capas finas a medias laminares. También se presentan lentes de carbón. El espesor de esta unidad en la Sabana de Bogotá ha sido establecido alrededor de los 60 metros.

- Guaduas Conjunto Medio (KTgm). Está determinado por los niveles de la Arenisca denominada como la "Guía" en la base y la Arenisca Lajosa en la parte superior. Dentro de este conjunto se presentan arcillolitas grises con mantos de carbón.

- Guaduas Conjunto Superior (KTgs). Formado por arcillolitas rojizas, verdosas y violáceas con intercalaciones de areniscas de grano grueso y mantos de carbón.

En el Cerro Altos de la Estancia la formación Guaduas se presenta en contacto normal con las rocas de la Formación Guadalupe en su miembro superior denominado Arenisca Tierna (Ksgt). La parte basal o inferior de la Formación Guaduas (Tkgi) se presenta bien expuesta en una cantera al suroeste del cerro y se proyecta hacía el sector de la Carbonera. La parte media de la formación Guaduas se presenta al oeste del área en contacto fallado (Falla de Rosales), con la parte inferior de la Formación Guaduas y se presenta en el sector del Espino. El Conjunto o miembro superior de presenta en la parte cetro norte del Cerro.

Unidades de roca del cretáceo Superior Formación Guadalupe

Las rocas de la Formación Guadalupe afloran principalmente sobre la vertiente sur del Cerro, como rocas de dirección NW/SE. Esta unidad litoestratigráfica se ha subdividido en cuatro conjuntos o miembros de base a techo así: Arenisca dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp), Labor (Ksgl) y Arenista Tierna (Ksgt). En el área del cerro solo afloran las tres últimas unidades con las siguientes características.

Formación Guadalupe Arenisca Tierna (Ksgt). Presenta de base a techo un conjunto inferior de areniscas blancas a grises claras y amarillas meteorizadas, cuarzosas, de grano fino a grueso, con estratificación gruesa a muy gruesa.

Formación Guadalupe Arenisca Labor (Ksgl). La conforman areniscas cuarzosas y feldespáticas, de grano medio a conglomerático, ligeramente duras a friables, con estratificación cruzada, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras. *Formación Guadalupe – Plaenes (Ksgp).* Hacia la base se presentan areniscas blancas a amarillentas cuando están alteradas, cuarzosas, de grano fino a muy fino, con estratificación muy

delgada a masiva, intercaladas con limolitas y arcillolitas, grises amarillentas a grises verdosas cuando están alteradas, ricas en Siphogenerinoides. Hacia el tope de esta unidad se presentan limolitas silíceas y arcillolitas duras a blandas, intercaladas con areniscas de grano muy fino, grises y amarillas.

4.4. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Teniendo en cuenta el modelo de evolución geológica del Cerro Altos de la Estancia (ver informe de Georiesgos, 2004, Ver **Figura 4.6**). Esta geoforma es mas producto de procesos tectónicos que procesos denudacionales el cual corresponde a un bloque levantado entre la depresión de Terreros por la falla de igual nombre y la zona hundida de la Sabana por la Falla de Mochuelo. Entre estos dos sistemas de dirección NW-SE se presentan los dos sistemas de fallas de Terreros al sur y Muchuelo al norte.

Posteriormente a este evento se desarrollaron sistemas de fallas transversales principalmente con componente normal y de rumbo con direcciones SW-NE, en las que se encuentran las fallas de Rosales y Carbonera entre otras.(Ver **Figura 4.7**).

De la interpretación y cartografía de las estructuras geológicas asociadas a fallas en el área del Cerro Altos de la Estancia, se puede establecer el control estructural del Cerro por las fallas de Terreros y Mochuelo hacia sus extremos sur y norte los desplazamientos laterales que sufre el cerros y sus rocas por la presencia de fallas normales y de rumbo perpendicularmente a estos dos primeros sistemas. (Ver **Figura 4.8**).

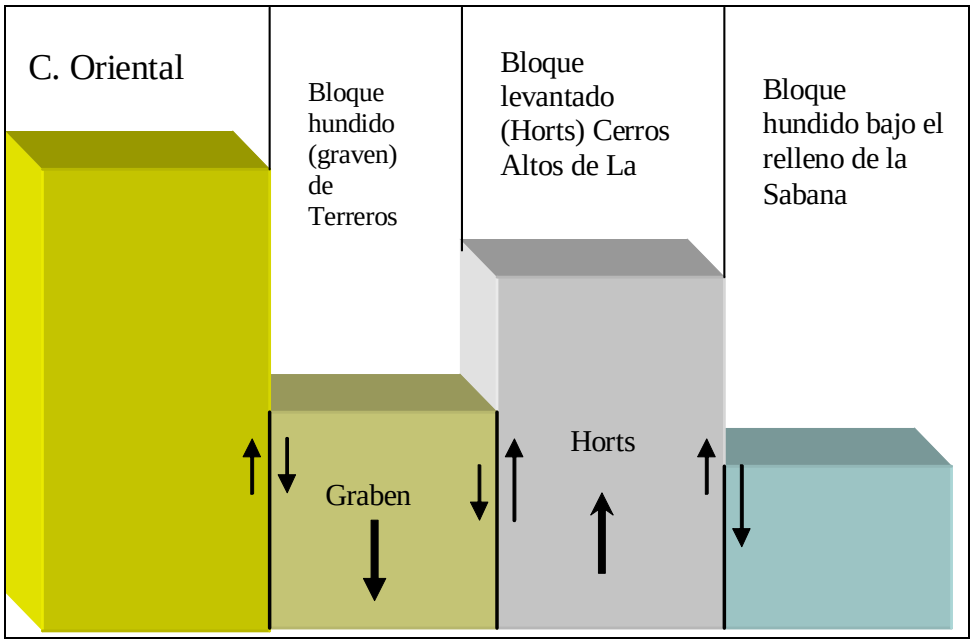


Figura 4-6. Esquema de evolución geológica del Cerro Altos de la Estancia. Georiesgos 2004.

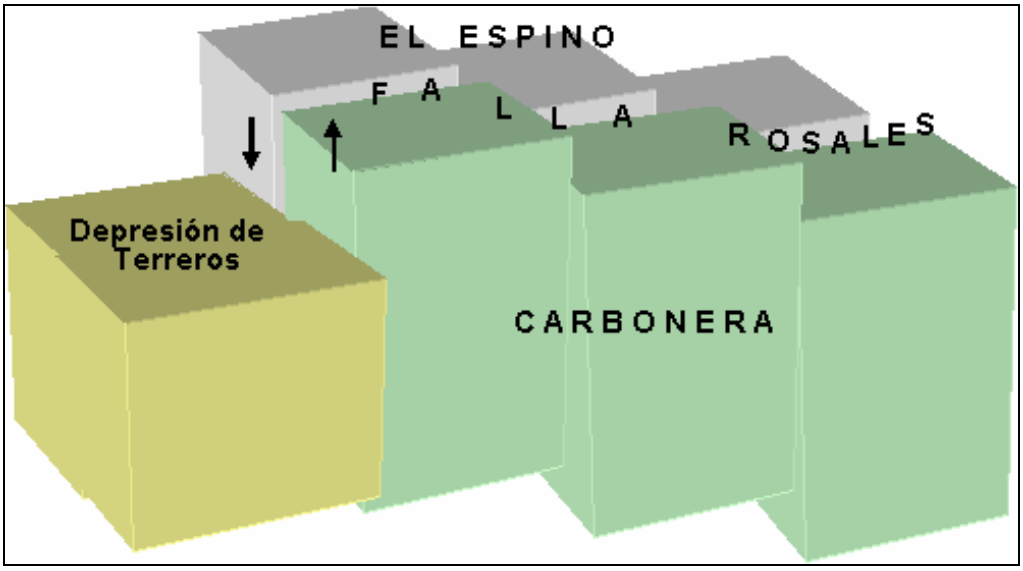


Figura 4-7. Esquema del modelo de falla transversal de Rosales. Georiesgos 2004.

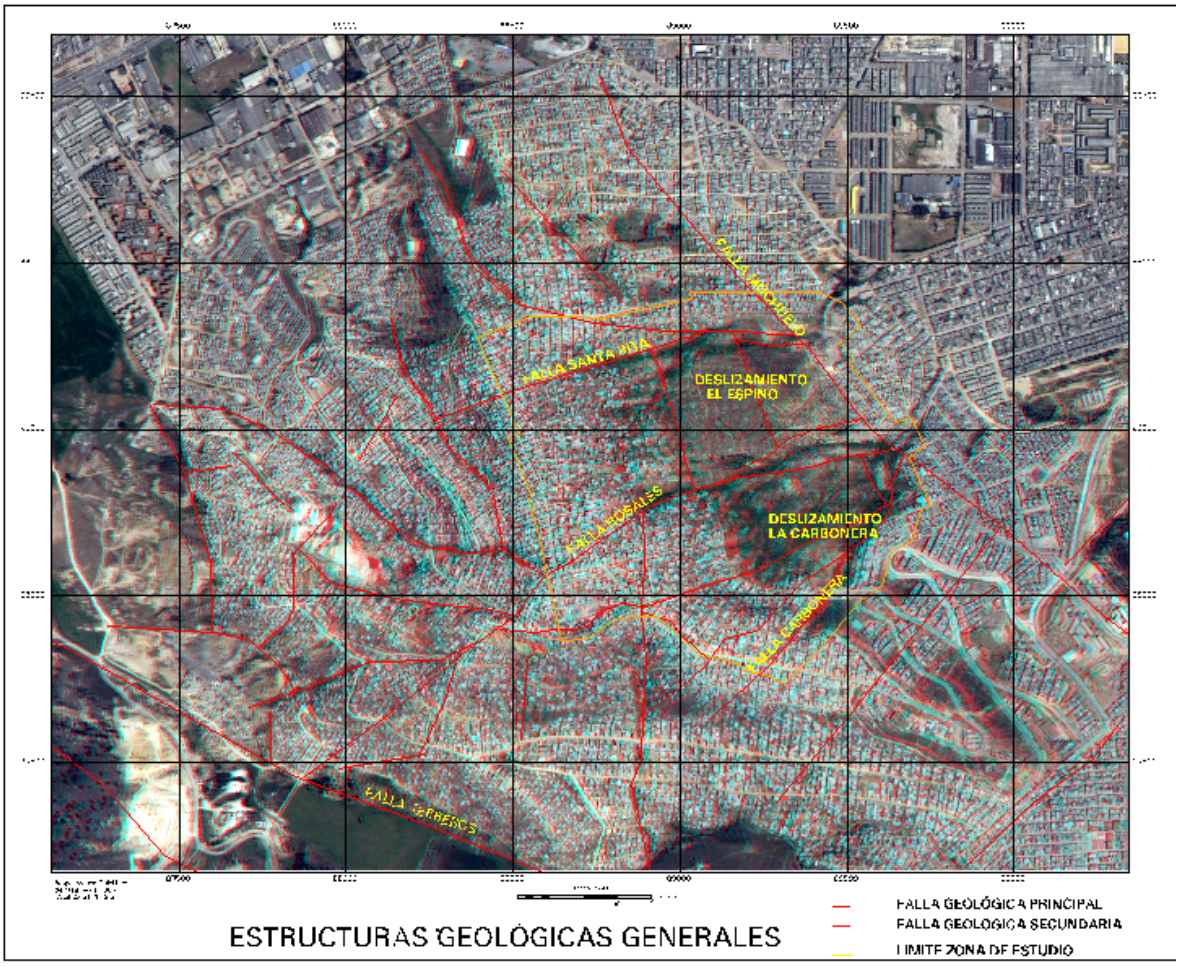


Figura 4-8. Mapa de estructuras geológicas generales del Cerro Altos de la Estancia. Obsérvese en 3D con gafas de anaglifos rojo izquierdo y azul derecha.

4.5. GEOLOGÍA DE DETALLE DE LOS SECTORES DE LA CARBONERA Y EL ESPINO

Sobre el área de interés de estudio se han realizado varios estudios geológicos con diferentes niveles de detalle, los cuales se estructuraron en un modelo geológico en el proyecto "*Estudios de Riesgo y Diseño de Medidas Mitigación en el Sector de Altos de la Estancia, de la Localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá*", realizado por la firma Georiesgos en el 2004, en

coordinación con el geólogo Germán Vargas C., quién durante esta fase de diseño de obras le ha dado continuidad a estos trabajos.

En este estudio de detalle la geología se enfocó a obtener un mejor conocimiento de la estratigrafía y litología del subsuelo a partir de información de sondeos de exploración directa y registros sísmicos.

Para este análisis se realizaron cerca de 10 perfiles geológicos de forma longitudinal a los movimientos en masa de El Espino y La Carbonera y transversalmente a la dirección del flujo y relacionando los dos movimientos, amarrando el mayor numero de sondeos en su trazo. Esto permitió mejorar el modelo geológico del subsuelo y afinar la Cartografía de superficie.

Las descripciones geológicas se enfocarán hacia las unidades litológicas que intervienen en la estabilidad de las laderas, por lo cual algunas de ellas presentadas en la cartografía pueden ser no incluidas.

4.5.1. Geología del sector de La Carbonera

En el sector de La Carbonera localizado entre la quebrada Carbonera al suroriente y la quebrada Rosales al noroeste. Litoestratigráficamente se encuentra representada por las rocas de la Formación Guaduas Inferior (Tkgi), las cuales se encuentran cubiertas parcial y discordantemente por materiales y depósitos inconsolidados del cuaternario como suelos residuales (Qsr), materiales de aluvión y humedales (Qah), depósitos fluvioglaciares (Qfg) y depósitos de deslizamientos (Qdz1). A continuación se presenta una descripción de estas unidades (ver **Planos 4 y 5**).

Suelos residuales (Qsr). Se presentan bajo un suelo orgánico poco desarrollado de uno pocos centímetros, le sigue una cobertura de unos 50

cm compuesta por materiales de rellenos y escombros con gravas de areniscas y limolitas de color beige y amarillas. Bajo este nivel se presentan fragmentos de rocas areniscas de diferentes tamaños embebidos en una matriz limo-arcillosa de color gris claro, le sigue un nivel de limos y arcillas grises oscuros de 1 metro de espesor y bajo este se presenta la roca meteorizada y muy cizallada. Este cizallamiento es de carácter local por cercanías a fallas. (Ver **Figura 4.12**).

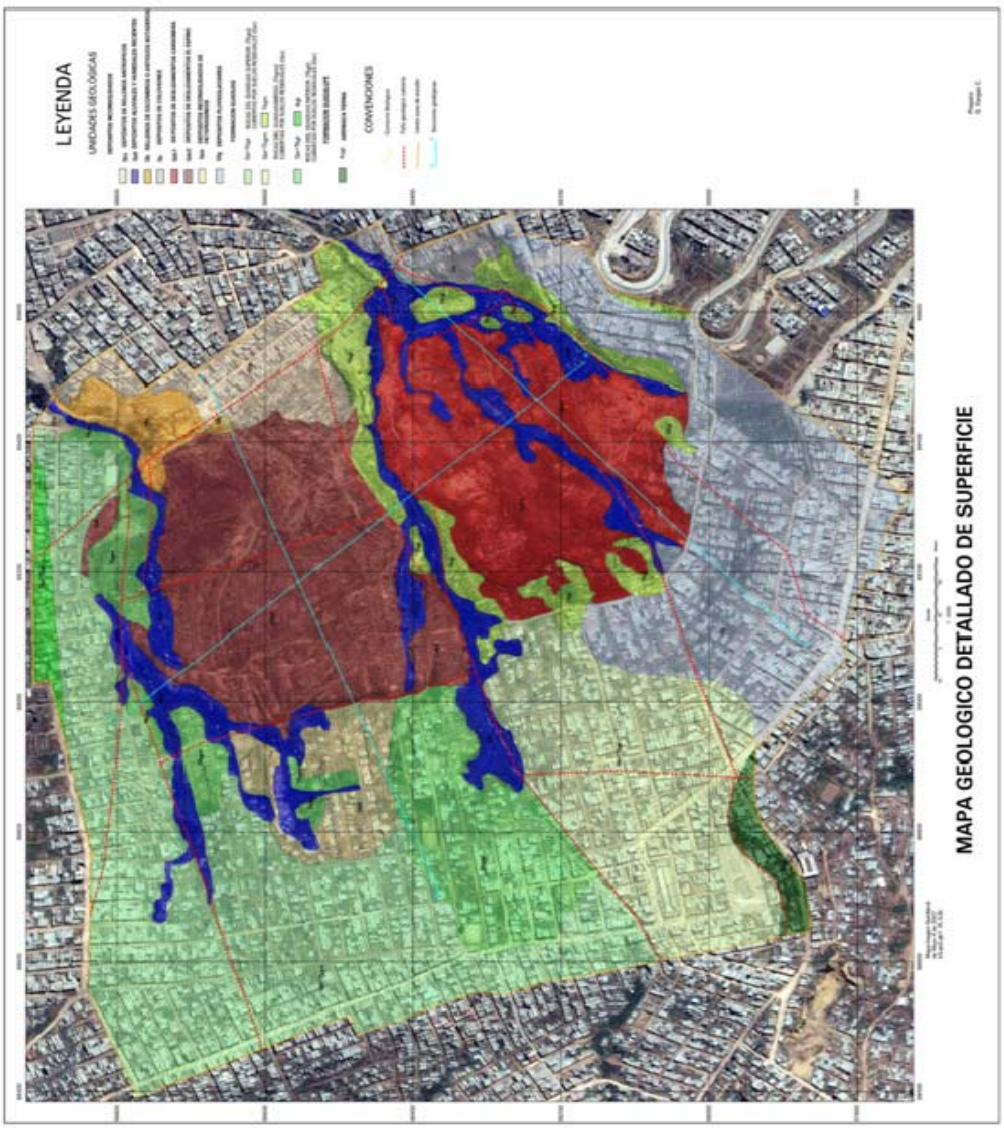


Figura 4-9. Mapa geológico detallado de superficie.

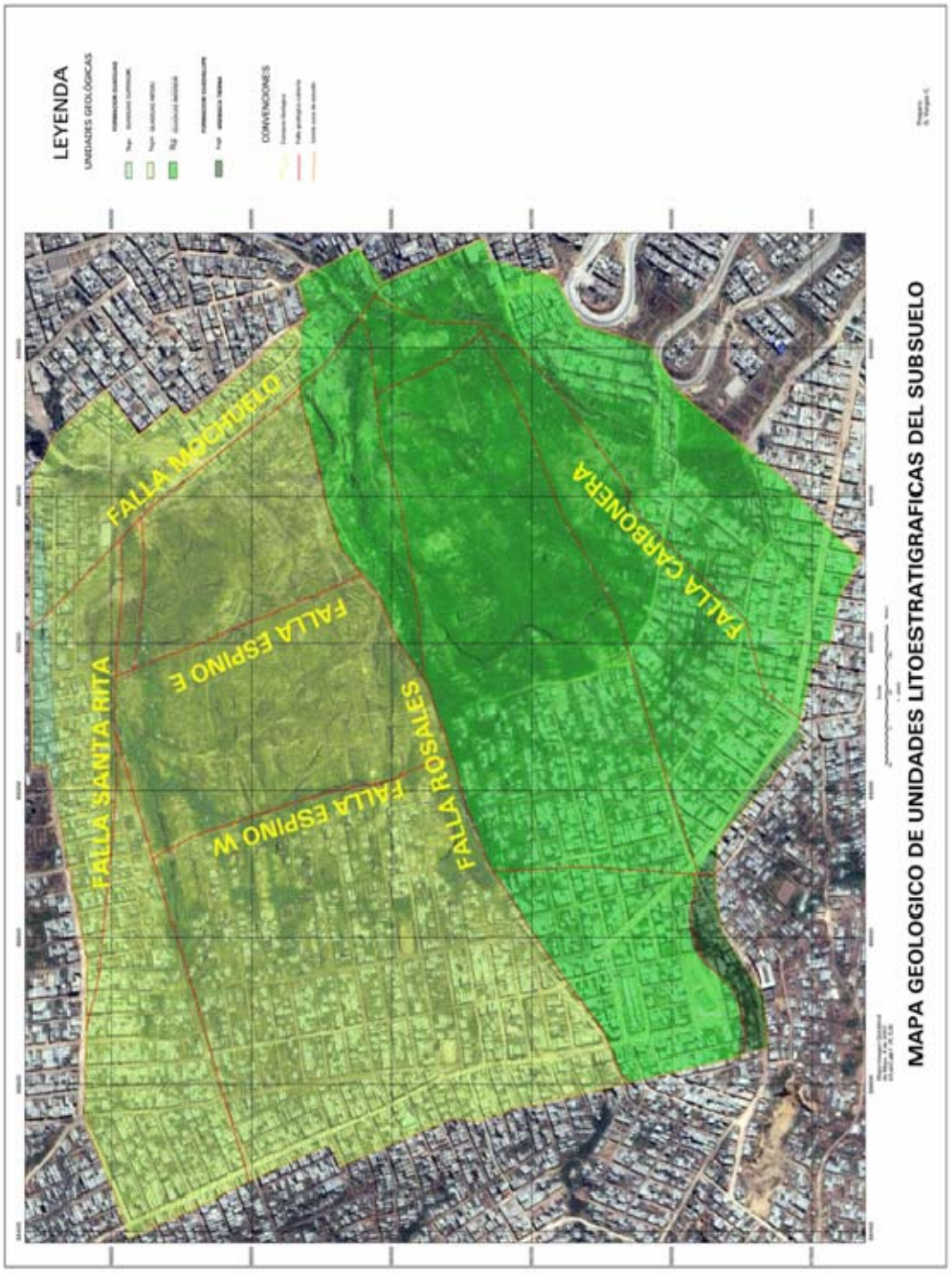
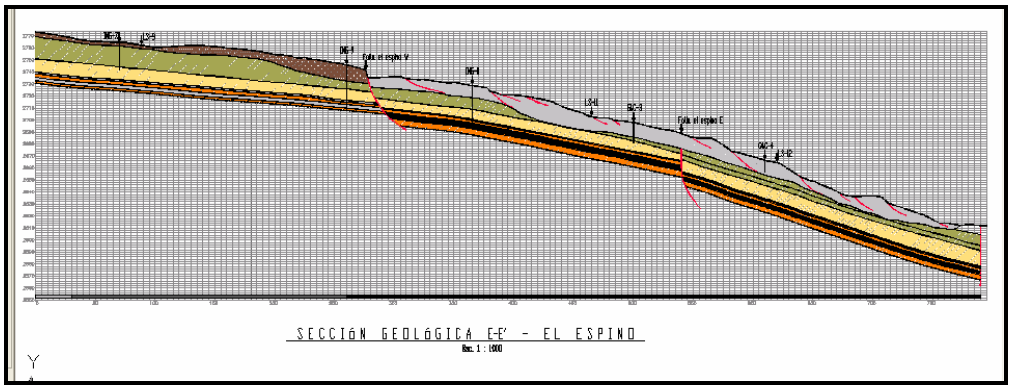


Figura 4-10. Mapa geológico de unidades litoestratigraficas del subsuelo



LEYENDA GEOLÓGICA

	Material heterogeneo incansolidado compuesto por niveles plano paralelos de techo a base asi: suelo organico poco desarrollado de textura limo arenosa a lima arcillosa de color gris a negro, material blando deleznable, con restos vegetales y fragmentos tamaño grava de arenisca, continua nivel de arcillalimosa color gris con espesor aproximado de 50cm, le sigue paleosuelo limo arenoso gris con abundantes fragmentos de arenisca tamaño grava – guijos,bajo este paleosuelo se presenta suelo residual amaryllo y roca meteorizad, en general este deposito es de baja resistencia de consistencia blanda a moderada.
	Material deslizado, incluye el material anterior que se desplaza en bloques translacionalmente sobre un plano de falla ó ruptura, en sectores se mezcla con bloques de arenisca arrastrada desde su base.
	Roca arenisca de grano medio a grueso de color amarillo, no cementada, con caracter friable al tacto, meteorizada a fresca, en bancos medios a gruesas, estratificaciòn plano paralela inclinada en sentido de la pendiente, presencia de diaclasamiento, perpendicular a la estratificaciòn, se presenta en esta roca algunos niveles finos de arcillolitas grises.
	Arcillolitas grises, crema y amarillenta, con finos niveles de arcilla limosa y limo arenoso, de consistencia blanda, aspecto masivo a finamente laminado.
	Arcillolitas grises oscuras a negras carbonosas, masivas de consistencia baja a media fresca, humedas a secas, en sectores oxidadas, sobre esta unidad se registran niveles de carbón bien expuestos de consistencia firme y frajiles a la presiòn.

LEYENDA GEOLÓGICA

	Suelo organico bien desarrollado de textura arcillo limosa rica en material organico, color gris oscuro a negro moderadamente plastico, con presencia de restos vegetales, consistencia blanda.
	Deposito inconsolidado, posiblemente de origen fluvioglaciar, formado por bloques de areniscas cuarzosas amarillas de bordes subangulares, meteorizadas a poco meteorizadas, embebidas en una matríz predominantemente arcillosa plastica color crema amarillenta y en sectores grisaceo, este deposito es bien denso.
	Paleosuelo compuesto por arcilla a arcilla limosa negra ligeramente plastica a plastica con restos de materia organica.
	areniscas con intercalaciones de arcillolitas y limos grices a habanos, material fracturado a muy fracturado, en sectores cizallados y foliados por fallamiento
	Areniscas cuarzosas poco cementadas de color habano y amarillo en capas delgadas a medias, con intercalaciones de limolitas y arcillolitas de diversos colores, frescas a poco meteorizadas, poco fracturadas a fracturadas.
	Arcillolita gris masiva consistente con nivel de arcilla carbonosa a carbón
	Material deslizado, incluye el material anterior que se desplaza en bloques translacionalmente sobre un plano de falla ó ruptura, en sectores se mezcla con bloques de arenisca arrastrada desde su base.

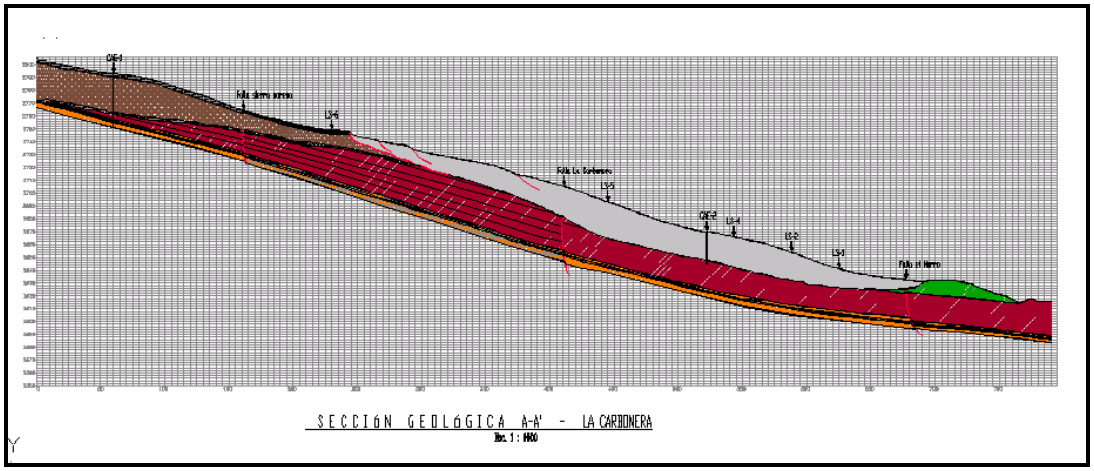


Figura 4-11. Secciones geológicas típicas de los sectores El Espino y La Carbonera



Figura 4-12. Columna la Carbonera

Materiales de aluvión y humedales (Qah). Se presentan sobre los cauces de las quebradas Carbonera y Rosales y discontinuamente en la zona de deslizamiento de La Carbonera. Son depósitos superficiales compuestos por sedimentos finos arenosos y algunas gravas. (Ver **Figura 4.13**)

Depósitos Fluvioglaciares (Qfg). Se presentan sobre la vía a Sierra Morena y en la parte alta de la Carbonera hasta su divisoria de aguas. Son materiales heterogéneos formados por fragmentos de areniscas con tamaños desde grava a bloques con un tamaño medio de 70 cm y un máximo ce 2 metros de diámetro. Estos fragmentos se encuentran embebidos en una matriz arcillosa a limo arcillosa de color crema amarillenta moderadamente

compacta a compacta. La presencia de este material en el sector parece corresponder a un depósito remanente de antiguas zonas cubiertas por glaciares y retrabajados por cauces fluviales (Ver **Figura 4.14**).



Figura 4-13. Vista en imagen de satélite y campo de zonas de aluviones de quebradas menores y laguna en zona de humedal.



Figura 4-14. Detalle de depósitos fluvioglaciares en el sector de la Carbonera. Nótese la presencia de bloques erráticos en esta matriz

Son de espesor muy irregular debido a que se presenta rellenando depresiones paleogeográficas.

Depósitos de deslizamiento (Qdz1)

Representan los materiales arrancados y depositados pendiente abajo del denominado deslizamiento La Carbonera. Este depósito se constituye de materiales provenientes de los suelos residuales, los depósitos fluvioglaciares y rocas de la Formación Guaduas, conformando guijos, bloques y gravas de areniscas y limolitas en una matriz de sedimentos de textura arenolimosa y en parte arcillosa de color gris clara a amarilla. El espesor máximo de este material deslizado medido en las diferentes secciones es de 20 metros.(Ver **Figura 4.15**).

Formación Guaduas Inferior (Tkgi)

Los levantamientos de campo en las Quebradas Carbonera y Rosales y los registros de las perforaciones realizadas en este sector, muestran una secuencia arenoarcillosa compuesta por areniscas de grano medio a fino, no cementada en capas delgadas a medias de color gris claro a crema, con intercalaciones de arcillolitas predomiantemente de color gris y amarilla y localmente rojizas. Esta secuencia presenta un espesor entre 20 y 30 metros (Ver **Figura 4.16**).

Bajo esta secuencia arenoarcillosa presenta (perforación CAE-P1) el inicio de una secuencia de arcillolitas grises muy carbonosas con presencia de un nivel de Carbón de un metro de espesor. Ver sección geológica A-A.



Figura 4-15. Detalle de diferentes materiales rocosos involucrados en el deslizamiento La Carbonera.



Figura 4-16. Ejemplos de afloramientos de rocas de la Formación Guaduas Inferior (Tkgi). Obsérvese en todos los casos su carácter de estratificación delgada y su composición arenoarcillosa.

A continuación se presentan los resultados de los levantamientos de campo realizados en dos sectores de la Q. rosales y un sector de la Q. Carbonera.(Ver **Figura 4.17**).

Columna estratigráfica sector 2 Q. Rosales

Esta sección fue descrita en el escarpe que aflora en la zona de falla de Rosales, en su parte media. Se caracteriza por presentar una sucesión de cuarzo arenitas en estratos medios con laminación cruzada y presencia de

ondulitas y lentes de arcillolitas, estas a su vez se encuentran interestratificadas con capas centimétricas de lodolitas grises (Ver **Figura 4.18)**. Estructuralmente presenta planos de estratificación bien definidos con dirección **N20ºW / 35NE.** La dirección de exposición del talud es **N 55º E / 90** (Ver **Figura 4.19**). Con el fin de determinar la condición estructural del macizo rocoso para esta sección se definió el Geological Strenght Index (GSI), en donde se tiene en cuenta la estructura del macizo rocoso y la condición de las superficies de diaclazamiento; para la sección A2 se determinó un **GSI = 75.8** (**Tabla 4.1**).



Figura 4-17. Localización Columnas

Columna estratigráfica Sector Quebrada Carbonera

En este sector las rocas de La Formación Guaduas Inferior se encuentran parcialmente expuestas mostrando la siguiente secuencia estratigráfica.

Litología	Profundidad m.	Espesor estratos	Descripción
	1	1	Derrubios de escombros, con fragmentos tamaño grava de forma angular de areniscas en matriz no compacta de arena y limo
	2	1	Suelo orgánico, color negro a gris oscuro con restos de vegetales y fragmentos de areniscas y limilitas
	6	4	Deposito coluvial, formado por fragmentos de arenisca y limolitas de tamaños variados , pero con predominio de fragmentos de diametro medio de 1 metro en matriz arenolimosa y limoarcillosa de color amarilla y gris. Poco compacto el depósito
	10	4	Arenisca de color amarillo, grano medio, no cementada, inmadura ligeramente vfriable, poco meteorizada a meteorizada en capas o estratos gruesos mayores de 1 metro,
	18	8	Capas de arcillolita rojiza y gris muy meteorizada, en laminas que se enmascaran por la meteorización.
	28	10	Secuencia de areniscas, limolitas y arcillolitas en capas delgadas, moderadamente meteorizadas de colores gris y amarillo claro
	36	8	Arcillolitas rojiza, amarilla y gris clara, meteorizadas en laminas finas poco diferenciables por meteorización

Litología	Profundidad m.	Espesor estratos	Descripción
	1	1	Derrubios de escombros, con fragmentos tamaño grava de forma angular de areniscas en matriz no compacta de arena y limo
	2	1	Suelo orgánico, color negro a gris oscuro con restos de vegetales y fragmentos de areniscas y limilitas
	6	4	Deposito coluvial, formado por fragmentos de arenisca y limolitas de tamaños variados , pero con predominio de fragmentos de diametro medio de 1 metro en matriz arenolimosa y limoarcillosa de color amarilla y gris. Poco compacto el depósito
	10	4	Arenisca de color amarillo, grano medio, no cementada, inmadura ligeramente vfriable, poco meteorizada a meteorizada en capas o estratos gruesos mayores de 1 metro,
	18	8	Capas de arcillolita rojiza y gris muy meteorizada, en laminas que se enmascaran por la meteorización.
	28	10	Secuencia de areniscas, limolitas y arcillolitas en capas delgadas, moderadamente meteorizadas de colores gris y amarillo claro
	36	8	Arcillolitas rojiza, amarilla y gris clara, meteorizadas en laminas finas poco diferenciables por meteorización

Figura 4-18. Columna estratigráfica generalizada, de la Formación Guaduas inferior tomada en la Quebrada La Carbonera.



Figura 4-19. Talud de la sección A2

Tabla 4-1. Descripción de parámetros geomecánicos de campo para las diaclasas de la sección C2.

FAMILIA	DATO ESTRUCTURAL	CONTINUIDAD	RUGOSIDAD	GRADO DE METEORIZACION	ABERTURA Y RELLENO	FLUJO DE AGUA	ESPACIAMIENTO
1	N 35 – 45 W / 55 – 65 SW	SUBPERSISTENTE	ALGO RUGOSA	BAJO	ABIERTA CON RELLENO ARCILLOSO	SECA	SEPARADAS
2	N 70 – 80 W / VERT	PERSISTENTE	RUGOSA	BAJO	ABIERTA CON RELLENO LIMO – ARENOSO	SECA	SEPARADAS
3	N 45 – 55 E / VERT	SUBPERSISTENTE	ALGO RUGOSA	BAJO	CERRADA	SECA	SEPARADAS

Columna estratigráfica Confluencia de las Q. rosales y Carbonera (A3)

Esta sección fue descrita en el escarpe que aflora sobre la parte baja del deslizamiento La Carbonera (Ver **Figura 4.21**) y se caracteriza por presentar una sucesión de cuarzo arenitas de potencias métricas con laminación cruzada y presencia de ondulitas y lentes de arcillolitas a la base, estas a su vez se encuentran interestratificadas con capas centimétricas de lodolitas grises que aumentan en potencia y frecuencia hacia el tope de la secuencia en donde pasan de espesores centimétricos a capas métricas con presencia de mantos de carbón de entre 20 y 30cm (Ver **Figura 4.22**). Estructuralmente presenta planos de estratificación bien definidos con dirección **N35ºW / 25NE.** La dirección de exposición del talud es **N 60º E / VERT.** Con el fin de determinar la condición estructural del macizo rocoso para esta sección se definió el Geological Strenght Index (GSI), en donde se tiene en cuenta la estructura del macizo rocoso y la condición de las superficies de diaclazamiento; para la sección A3 se determinó un **GSI = 40** (**Tabla 4.2**).

4.5.2. Geología del Sector El Espino

El sector de El Espino, se localiza entre las Quebradas Rosales y Santa Rita y las fallas del mismo nombre. Allí el subsuelo se compone de rocas de la Formación Guaduas Medio que aflora en algunos puntos. Superficialmente cubren esta roca discordante y parcialmente materiales y depósitos del Cuaternario, entre los cuales se destacan: Suelos residuales (Qsr), aluviones y humedales (Qah) y materiales heterogéneos (Qsh). **Ver Planos 4 y 6**.

Suelos residuales (Qsr)

Los Suelos residuales desarrollados sobre las rocas sedimentarias de la Formación Guaduas Medio son poco desarrollados y de poco espesor. (Ver **Figura 4.23**).

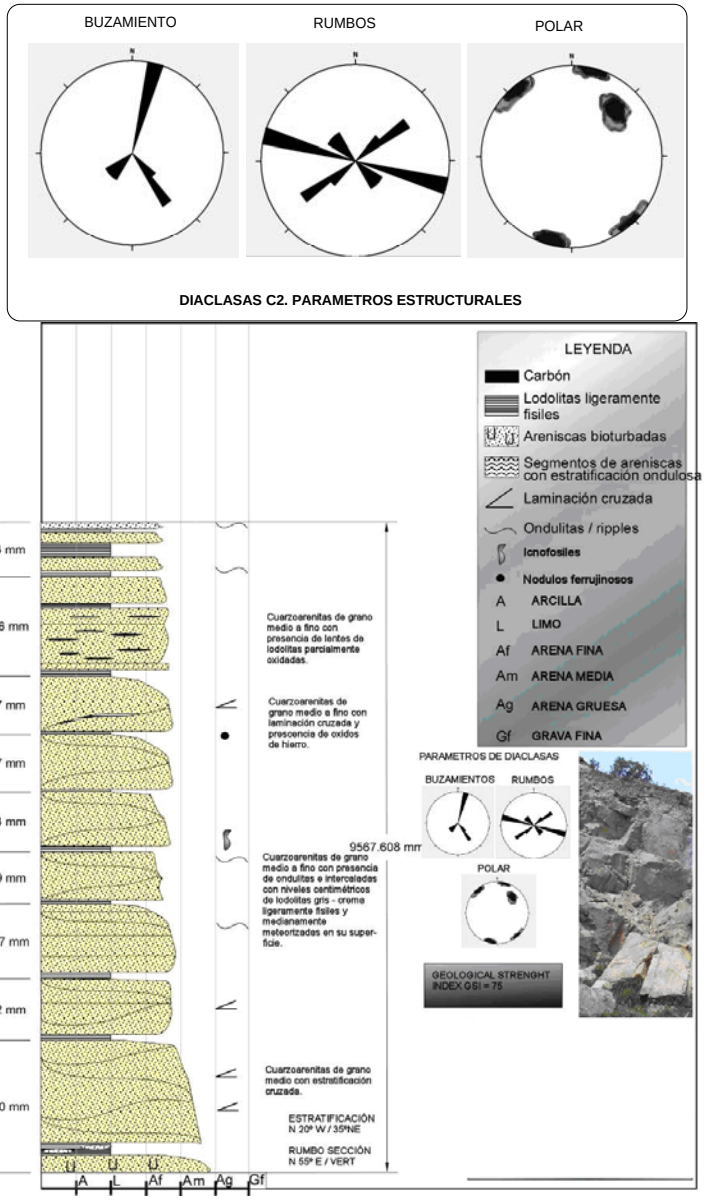


Figura 4-20. Columna estratigráfica parte media de la quebrada Rosales. Sector A2 de la Formación Guaduas Inferior.



Figura 4-21. Talud de la sección A3, base del Deslizamiento La Carbonera

Tabla 4-2. Descripción de parámetros geomecánicos de campo para las diaclasas de la sección A3.

FAMILIA	DATO ESTRUCTURAL	CONTINUIDAD	RUGOS	GRADO DE METEORIZA-CION	ABERTURA Y RELLENO	FLUJO DE AGUA	ESPACIA MIENTO
1	N 50 - 60 W / 50 – 60 SW	SUBPERSISTENTE	LISA	BAJO	ALGO ABIERTA	SECA	PROXIMAS
2	N 40 – 50 E / VERT	SUBPERSISTENTE	LISA	BAJO	ALGO ABIERTA	SECA	PROXIMAS
3	N 45 – 55 E / 55 – 65 NW	SUBPERSISTENTE	LISA	MEDIO	ALGO ABIERTA	GOTEO	SEPARADAS

Se observaron con litologías diferentes así: a) con un nivel de fragmentos de rocas de tipo areniscas en una matriz areno limosa amarilla de un metro de espesor seguido de roca meteorizada de color amarillento y grisáceo de unos 2 metros de espesor, b) material de relleno,(80 cm), capa de arcilla gris

compacta (80 cm) y le sigue nivel oscuro de un material muy pastoso de unos 40 cm de espesor, de consistencia plástica, c) fragmentos de roca de unos 60 cm seguido de nivel de arcilla amarilla ocre de unos 20 cm y siguen unos dos metros de roca meteorizada hasta un nivel de roca mas fresca compuesta por arenisca de color gris claro.

Aluviones y Humedales (Qah)

Presentan características similares a las descriptas para La Carbonera y se asocian principalmente a los cauces de las quebradas Rosales y Santa Rita (Ver **Figura 4.24**).

Materiales heterogéneos (Qsh).

Hacia la parte media de las laderas en cercanías a la corona del movimiento se presentan materiales litológicos inconsolidados compuestos por niveles de escombros de antiguas explotaciones con la presencia de gravas en matriz arenosa poco compacta, niveles de arcilla limosa color gris amarillento y suelos orgánicos moderadamente desarrollados bajo el cual se presenta un suelo residual y la sucesión de roca meteorizada. El espesor de estos materiales puede alcanzar los 8 metros.(Ver **Figura 4.25**).

Depósitos de deslizamiento (Qdz2)

A diferencia del material deslizado en la Carbonera, en el material deslizado de El Espino predominan mas los bloques que la matriz.(Ver **Figura 4.26**).

Como puede apreciarse en la figura anterior la materiales deslizados en El Espino comprenden suelos residuales, materiales heterogéneos y fragmentos de roca de tamaños medios de 40 0 50 cm de diámetro. La matriz es de textura areno limosa de color claro. En el sector occidental del deslizamiento se aprecia un movimiento translacional de l material heterogéneo.

Formación Guaduas Medio (Tkgm)

En el Espino, la Formación Guaduas medio, presente bajo el subsuelo y algunos afloramientos, se caracteriza por presentar en el tope un paquete de areniscas de grano medio a grueso, no cementadas, ligeramente friables, meteorizada a fresca en profundidad, con estratos medios (40 cm) a gruesos (1 m), fracturadas con delgados niveles de arcillolitas. El espesor de esta litología medido en perfiles alcanza los 25 metros.

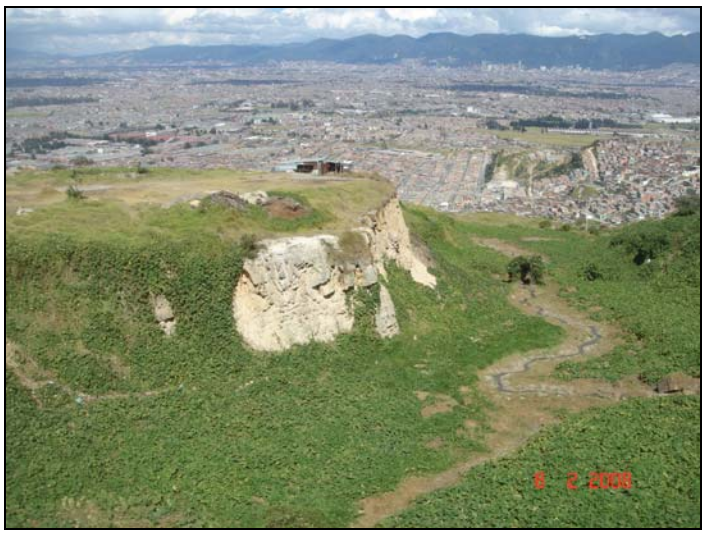


Figura 4-22. Materiales aluviales muy superficiales asociados al cauce de la Quebrada Rosales



Figura 4-23. Detalle del material heterogéneo en la zona de El Espino. Nótese los niveles litológico que caracterizan este material.



Figura 4-24. Detalle del material deslizado en el deslizamiento El Espino.



Figura 4-25. Afloramientos de areniscas de la Formación Guaduas Medio (Tkgm), en el sector de El Espino.

Bajo la anterior unidad se presentan un nivel de arcillolitas de color gris, crema y amarillo, con finos niveles de arcilla limosa y limoarenoso, de consistencia blanda, aspecto masivo y en parte laminado. El espesor de está litología es cercano a los 10 metros.

En la parte basal se presenta un paquete de arcillolitas grises oscuras a negras, de aspecto masivo, frescas con presencia de óxidos en sectores. Posteriormente se presentan niveles de carbón entre 1 y de 3 metros de espesor (perforación IGM-p9).

4.6 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

Las fallas longitudinales más importantes de los sectores de deslizamientos son: Carbonera, Rosales y Santa Rita. Las fallas transversales más destacadas son: Espino W, Espino E y El Morro (Ver **Figura 4.26).**

Falla de Carbonera – Sierra Morena

Presenta un sistema de fallas longitudinales en el costado suroriental del área siguiendo el curso de la quebrada de igual nombre, una de estas fallas ha tomado el nombre de falla de Sierra Morena (Ver **Figura 4.27**). Estas fallas con rumbo aproximado N40 a 55 E/ 80NW-90, corresponde a fallas normales. Estas fallas producen un alto grado de fracturamiento en las rocas de la formación Guaduas Inferior.

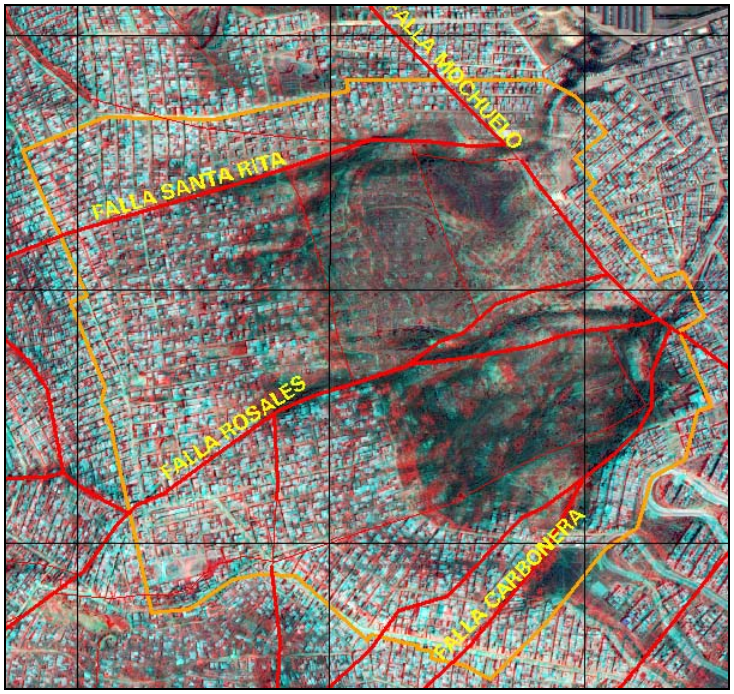


Figura 4-26. Anaglifo 3D mostrando las fallas locales. Obsérvese en 3D con gafas de anaglifos rojo izquierdo y azul derecho.



Figura 4-27. Roca muy fracturada a cizallada en la zona de falla de Carbonera – Sierra Morena. Nótese el contraste de fracturamiento sobre la línea negra.

Falla Rosales

Es una de las principales fallas del área, Representa una zona de falla que varia desde unos pocos metros hasta unos 20 metros de ancho, generando en algunos sectores ramales que se unen en profundidad. Es una falla normal con componente sinestral de rumbo y de dirección N70E/ de plano vertical.

Sobre esta zona de falla, las areniscas, principalmente de la formación Guaduas Inferior se presentan deformadas, fracturadas a cizalladas que producen pliegues y foliación vertical. (Ver **Figura 4.28**).

Falla Santa Rita

Se presenta siguiendo en curso de la Quebrada Santa Rita, con rumbo cercano a N70E/ 50-70NW (Ver **Figura 4.29**).



Figura 4-28. Rocas cizalladas, deformadas y muy fracturadas en la zona de falla de Rosales.

Falla del Espino W.

Es una falla transversal de tipo Normal a favor de la pendiente estructural, que parece controlar el escarpe principal del deslizamiento del Espino. Su desplazamiento parece no ser mayor a 20 m según lo establecido en las secciones geológicas.

Falla del Espino E.

Falla inversa de alto ángulo a vertical corresponde al mismo sistema distensivo de la falla anterior con rumbo cercano al N-S (N15-20W). La densidad de fracturas en sentido N-S es alta en la parte alta del espino

aunque también se presenten en otras direcciones como en toda el área. Su desplazamiento es menor de 10 metros.

4.6. MODELO GEOLOGICO PARA ANALISIS GEOTECNICOS

No obstante el modelo geológico presentado anteriormente, durante el transcurso del proyecto se presentaron diferencias de interpretación entre la Interventoria y el Consorcio Altos de La Estancia, con respecto al tipo y distribución de algunos materiales, principalmente el Depósito Fluvioglaciar y el denominado Paleosuelo del sector La Carbonera. En vista de que dilucidar estas diferencias de interpretación requiere una exploración mucho más extensa a la realizada y seguramente ensayos de datación por fuera del alcance contractual, se llegó a un modelo geológico de consenso. De acuerdo con ello, para efectos de los análisis de estabilidad y diseño de obras se empleó el modelo geológico que se presenta en el **Plano 4.1**.



Figura 4-29. Zona de falla Santa Rita afectando arcillolitas y areniscas de la Formación Guaduas Medio.

5. GEOMORFOLOGÍA

En este capítulo se presenta la descripción geomorfológica del área de interés evaluando sus aspectos morfométricos y procesos morfodinámicos (ver **Plano 7**).

5.1. GEOMORFOLOGÍA DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA

Cerro Altos de la Estancia constituye un cerro estructural de forma triangular y a largado hacia el SE, escarpado en su costado sur y agudo en su extremo Este. Presenta una altura entre 2800 y 2600 m.s.n.m, una longitud aproximada de 2879 metros y un ancho de unos 2153 metros. Es un cerro asimétrico que se forma al NW de tres cerros menores de pendientes irregulares formadas por escarpes y cuestas que se unen hacia el centro para formar un cerro único de dos laderas únicas en la cual la ladera NE presenta forma ligeramente recta y suavemente inclinada, y la ladera SW es escarpada a moderadamente inclinada, principalmente a la base.

5.2. ASPECTOS MORFOMÉTRICOS

5.2.1. Geomorfología detallada de los sectores de los deslizamientos de la Carbonera y el Espino

La zona de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino se localizan en la ladera nororiental del Cerro Altos de la Estancia en su parte media.

El estudio detallado de estas zonas de deslizamientos se enfocará a dos aspectos principales. El análisis morfométrico y el análisis de los procesos morfodinámicos.

En este aparte se indican las principales características morfométricas del área detalle, involucrando aspectos de relieve en sombras, pendientes, aspecto y diferencias de alturas entre el año 2004 y el año 2007, épocas en que se levantaron los modelos digitales de terreno.



Figura 5-1. Anaglifo del Cerro Altos de la Estancia. Para observar en 3D utilice gafas con lente rojo a la izquierda y azul a la derecha. Mapa imagen orientado en dirección Norte.

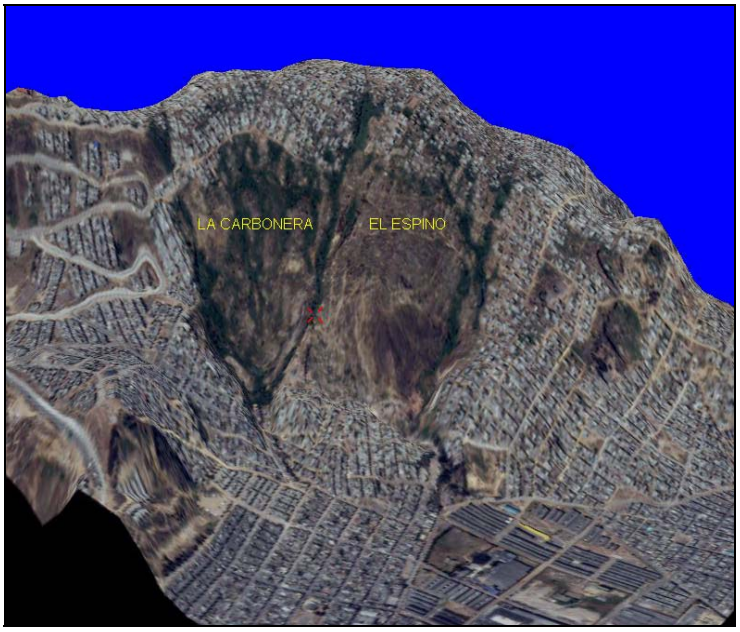


Figura 5-2. Vista en 3D de las zonas de deslizamiento La carbonera y El Espino. Imagen de Mayo de 2007

Relieve en sombras

Este aspecto muestra los principales rasgos topográficos simulando un efecto de sombras con una posición solar, una altura de vuelo, el azimut y una exageración vertical.

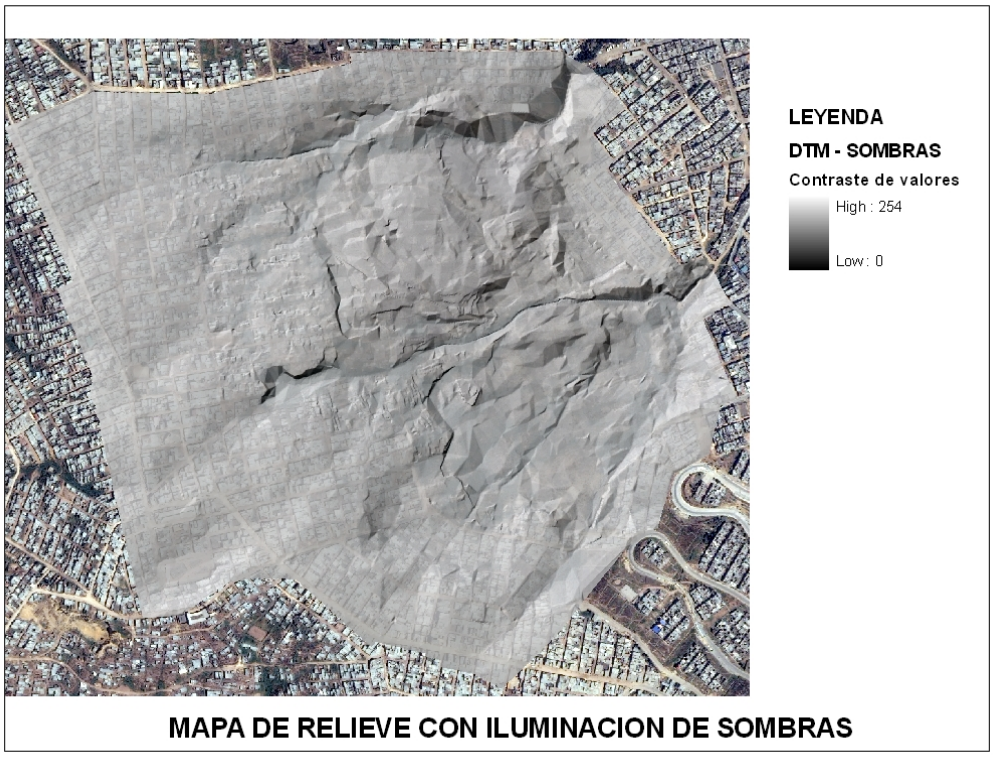


Figura 5-3. Mapa de relieve con iluminación de sombras

El **Plano 4.3** y la **Figura 5.3** muestran claramente las zonas de ruptura del suelo en el área de los dos deslizamientos y las superficies cóncavas, sobre la corona de los dos movimientos.

5.2.2. Inclinación de las pendientes

Indica la inclinación de las pendientes, en las cuales se seleccionaron 6 intervalos que reflejan bien las formas del terreno, como se ilustra en la **Figura 5.4** y en el **Plano 4.2.**

La disposición y distribución de estos rangos de pendientes muestran en las zonas de deslizamientos las diferentes zonas de arranque formando escarpes con contornos geométricos en el área del Espino y semicirculares en el área

de La Carbonera. Las pendientes planas a ligeramente inclinadas (0 a 7 grados) se presentan en algunos sectores de la cima del cerro y en la base del mismo en el sector de Perdomo Alto. Las pendiente entre 7,1 y 12 grados son las más predominantes en el área y entorno a las zonas de deslizamiento y las pendientes 18 grados dominan sobre las zonas deslizadas. (Ver **Figura 5.4**).

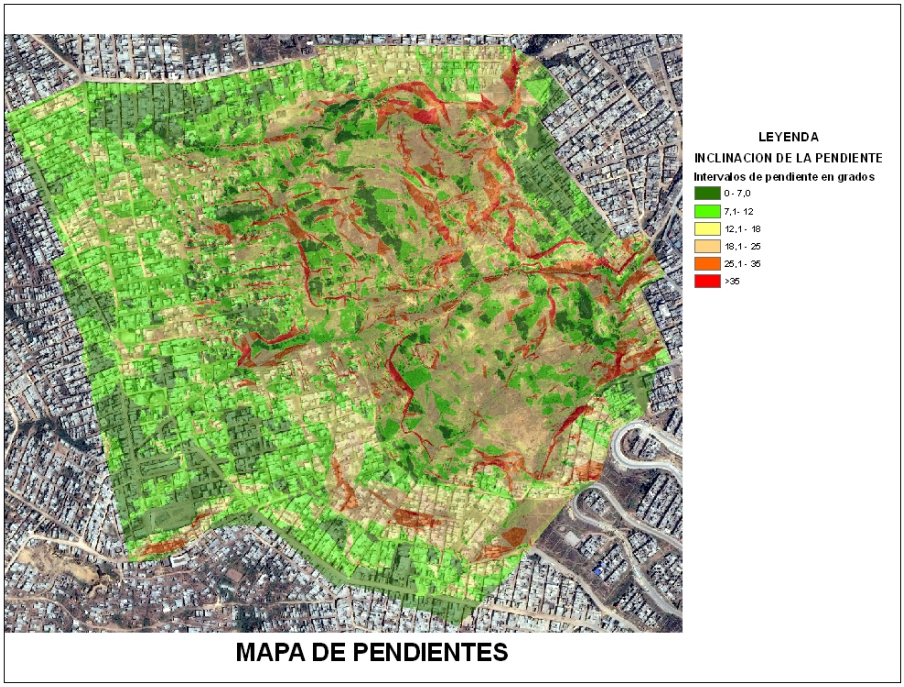


Figura 5-4. Mapa de inclinación de las pendientes.

5.2.3. Orientación de las pendientes

Representa la dirección de la cara del talud con respecto al norte. Las pendientes del área muestran una orientación preferencial hacia el noreste (22,5 – 67,5 grados), en la zona del escape que limita el deslizamiento de La Carbonera muestran una orientación principal hacia el noroeste 292 – 337 grados y al norte. En el área de la quebrada Rosales las laderas se orientan

preferencialmente hacia el sureste y sur y en la cima hacia el noroeste y norte. (Ver **Figura 5.5**).

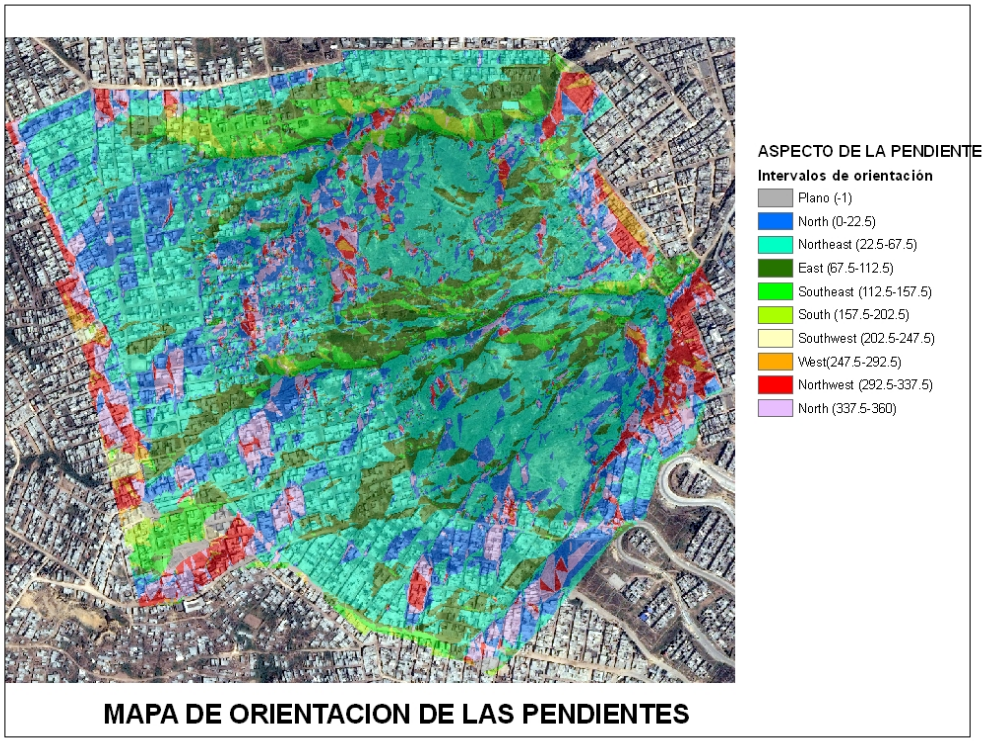


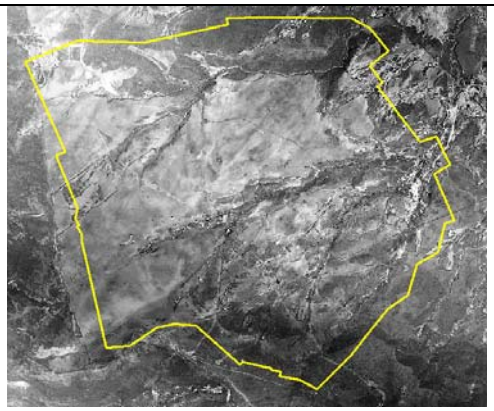
Figura 5-5. Mapa de orientación de las pendientes.

5.3. MORFODINÁMICA

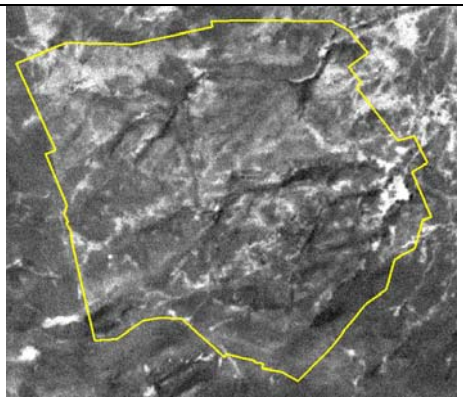
Análisis histórico

La dinámica de los deslizamientos de La Carbonera y el Espino datan de más de 40 años desde el inicio de explotaciones mineras sobre la base de estas dos laderas. La reconstrucción histórica de documentos técnicos y con el registro de sensores remotos en fotografías aéreas e imágenes de satélite de alta resolución para algunos años nos muestra esta evolución en la que se marcan los siguientes episodios importantes. (Ver secuencia en la **Figura 5.6**) A inicios de la década de los cincuenta (1952), el área comprendía una

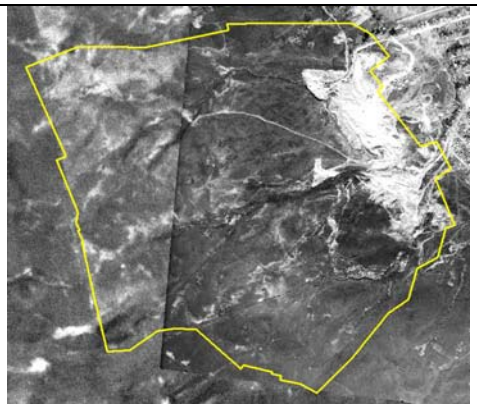
típica zona rural de fincas con pastizales, con procesos de erosión muy locales en la parte baja de la quebrada Carbonera. Hacia principios de los años sesenta (1961), se presenta un leve incremento de los procesos erosivos en la parte baja de las quebradas Carbonera y Rosales y en la zona hoy conocida como Perdomo Alto.



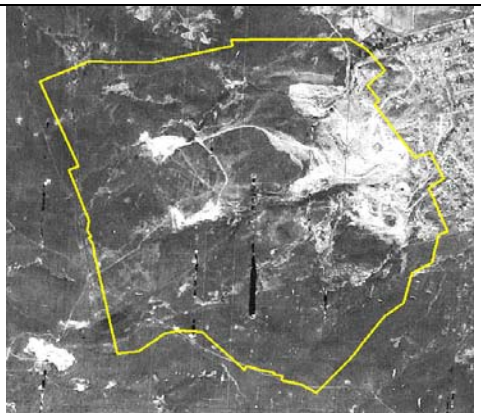
1952



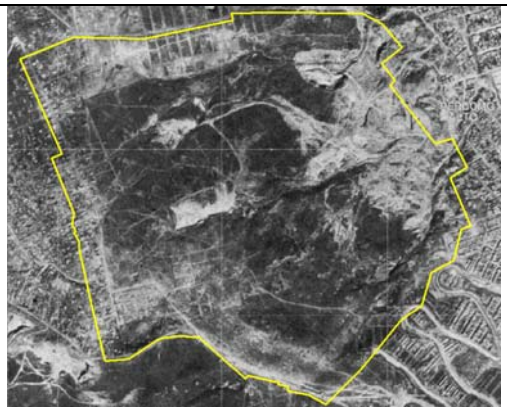
1961



1977



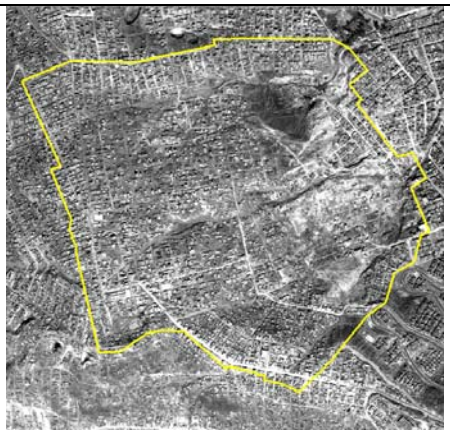
1987



1993



1998



2000



2004



2006



Febrero de 2007

Figura 5-6. Evaluación temporal del deslizamiento Periodo 1952-2007

- En 1971 se presenta una explotación activa de materiales en la confluencia de las quebradas La Carbonera y Rosales. Es común en toda el área la presencia de surcos y cárcavas, en ocasiones profundas, debido a la baja resistencia del material a los procesos denudativos. Se aprecia erosión lateral en ambas márgenes de la quebrada La Carbonera. No hay movimientos de masa importantes sobre las laderas, conformadas por rocas detríticas de la Formación Guaduas.

- También se registra un escarpe de forma semicircular que podría corresponder a una corona de un antiguo deslizamiento, el cual comprende desde la quebrada La Carbonera hasta una quebrada intermedia entre esta última y la quebrada Rosales.

- En 1973**,** aumenta el área de influencia de la cantera de la parte baja, en donde confluyen las dos quebradas antes mencionadas, afectando una corriente de drenaje intermedia ya que el frente de explotación avanza hacia aguas arriba de la quebrada. Se acentúa la erosión concentrada en el sector del deslizamiento; por lo demás no hay cambios importantes en el paisaje el cual es similar a la situación presentada en el año 1971.

- En 1977, **(Figura 5.6)** la corona del deslizamiento de La Carbonera muestra una clara actividad, su flanco izquierdo está alineado con la parte superior de tres nuevas canteras que se encuentran en la zona. Al parecer la corona del movimiento corresponde a una antigua zona de explotación, sin embargo no es claro si el deslizamiento involucra las canteras anteriores. Es notable el aumento de la actividad minera en el área lo que ha favorecido la actividad del deslizamiento. En el Espino avanza desde la base la explotación de materiales en forma de cantera a cielo abierto.

  - *La quebrada de la parte central se ve seriamente afectada por la corona del deslizamiento principal y por la explotación de material en la zona de confluencia. El flanco derecho del deslizamiento interesa a la quebrada La Carbonera, y parte del material deslizado se acumula sobre la margen izquierda de la misma. A partir de la deformación de una cerca de piedra que se encuentra en sentido diagonal al eje del deslizamiento, se estimó para esta fecha un desplazamiento total del terreno de 20.0 m.*

  Puede decirse que en el segundo semestre de 1977 había dos frentes de explotación de materiales, el inferior tenía su escarpe de trabajo

entre cotas 2610 y 2620 y longitud en arco de unos 100 m; a unos 100 m mas arriba de este escarpe se encontraba la "Recebera La Carbonera" con escarpe entre la 2620 y la 2650, o sea, 30 m de altura, aun que presentaba una plataforma típica de descapote y extracción de recebo no generalizada entre cotas 2644 y 2650. La longitud del frente de trabajo en este caso era de 250 m(aprox.). Se tenía entonces una excavación escalonada de 40 m de altura y del ancho suficiente para producir un alivio de presiones o desconfinamiento de la masa de roca y suelo superior; si a esto añadimos la existencia de estratos blandos como los de carbón, de los cuales todavía se observan hoy en día remanentes en afloramientos aislados de taludes de antigua explotación, estratos por los cuales bien podía ocurrir el desplazamiento traslacional algo lento, puede concluirse que ya desde 1977 se habían inducido movimientos en masa.

- En 1979, el deslizamiento Carbonera, continúa activo y presenta evidencias de movimiento retrogresivo, su corona se encuentra mejor definida y es clara su relación con las canteras de su flanco izquierdo, las cuales se encuentran inestables. El deslizamiento presenta una forma de triangulo invertido cuya base está definida por la corona del movimiento y los lados corresponden a las quebradas Rosales y La Carbonera. El drenaje central se hace cada vez más difuso por efecto de la extracción de material. Avanza el frente de explotación del flanco izquierdo del deslizamiento, inestabilizando la margen derecha de la quebrada Rosales.

- En 1987, **(Figura 5.6)**, un nuevo desplazamiento del deslizamiento incide en la estabilidad de la margen izquierda de la quebrada La Carbonera. Se aprecia explotación de material en la parte alta de la Quebrada Rosales, y hacia la zona de confluencia con La Carbonera se ve afectado un tramo de 200 m de su margen izquierda por el aumento de la actividad minera. El desplazamiento del flanco izquierdo se estima en 57 m y en el derecho en 28 m. La explotación de materiales avanza pendiente arriba desde la base de Carbonera y El Espino. Dos nuevas canteras se registran en la parta alta de la quebrada Rosales y un ramal de la quebrada Santa Rita.

  El lindero norte del área de Sierra Morena estaba afectado hacia el flanco derecho por un deslizamiento que en ese entonces se denominó "Deslizamiento del Perdomo Alto" por el barrio del mismo nombre que hoy en día se localiza en el sector oriental de La Carbonera. En fotografías de mayo 7, 13 y 26 de 1987 se aprecia que se trataba en general de un deslizamiento traslacional de bloque con

un escarpe principal bien definido, y su pata localizada en el escarpe bastante irregular de explotación de recebos; además en el lado suroriental del bloque ocurría un deslizamiento retrogresivo de mayor actividad y con superficie de falla compuesta de arco circular (rotacional) en su mitad superior y planar (de traslación sobre la estratificación) en la mitad inferior.

- En 1992, Se incrementa la erosión en la ladera de la parte superior de la corona del movimiento. Este último continúa activo y retrogresivo, presentando mayor desplazamiento sobre su flanco izquierdo. Aumenta el área de explotación en la cantera de la parte alta de la quebrada Rosales mientras que el frente de la parte baja no tiene mayores cambios. Aumenta la erosión y el carcavamiento sobre las márgenes de la quebrada La Carbonera. El desplazamiento del flanco izquierdo es de 31 m y en el derecho de 12 m estimados a partir del desplazamiento de la cerca de piedra. En 1993, se registra sobre el área, el inicio de la urbanización bordeando el área y el incremento de las zonas de canteras.

- En 1998, **(Figura 5.6)**, ya han cesado las explotaciones de materiales en canteras, las área de explotación de materiales y del deslizamiento han sido rellenadas con desechos de las mismas canteras y otros traídos de otros sectores. Esto ha provocado un notable avance de la urbanización sobre el área.

- En el año 2000, **(Figura 5.6)**, la urbanización, ha avanzado a su máxima densidad, los informes técnicos reportan problemas de estabilidad en el área afectando algunas viviendas. En los años 2004 - 2007 **(Figura 5.6)**, la zona de afectación de los deslizamientos ha causada la continua reubicación de viviendas por su actividad remontante en cada uno de ellos.

5.3.1. Unidades morfodinámicas

Con el objeto de dar claridad sobre la terminología relacionada a movimientos en masa a continuación se presenta una breve descripción de la morfología asociada a esta (Vargas, 2001)

Elementos morfológicos de un movimiento en masa asociados al terreno intacto Los elementos morfológicos de un movimiento en masa asociados al

terreno intacto son: la corona, el escarpe principal, la superficie de ruptura principal y los flancos. (Ver **Figura 5.7**)

Corona. Representa la parte superior del movimiento. Ella forma una línea límite entre la parte superior del terreno fallado (escarpe principal) y el terreno intacto. Comúnmente presente una forma o contorno semicircular o semirectangular. Hacia la parte posterior de la corona se pueden presentar fisuras o grietas que son definidas por Varnes (1978) como *fisuras de corona* y por Millies-Lacroix (1981) como *fisuras de tensión*.

Escarpe principal. Es también llamado grada principal o cicatriz de arranque principal. Representa la superficie inclinada o vertical visible que contornea la parte superior del movimiento. El escarpe principal indica el desplazamiento vertical del movimiento.

Superficie de ruptura principal. También llamada superficie de falla. Se desarrolla siguiendo la componente horizontal del movimiento. En materiales arcillosos se presente como una superficie pulida (espejo) con desarrollo de estrías paralelas a la dirección del movimiento.

Los flancos. Forman los límites laterales del movimiento. Ellos pueden ser definidos como derecho o izquierdo mirando hacia abajo desde la corona. En algunos casos los flancos están conformados por escarpes que contienen otros movimientos satélites menores.

Elementos morfológicos de un movimiento en masa asociados a la masa deslizada La masa desplazada o de deslizamiento comprende tres zonas morfológicas principales: El cuerpo principal, el pie y el frente.

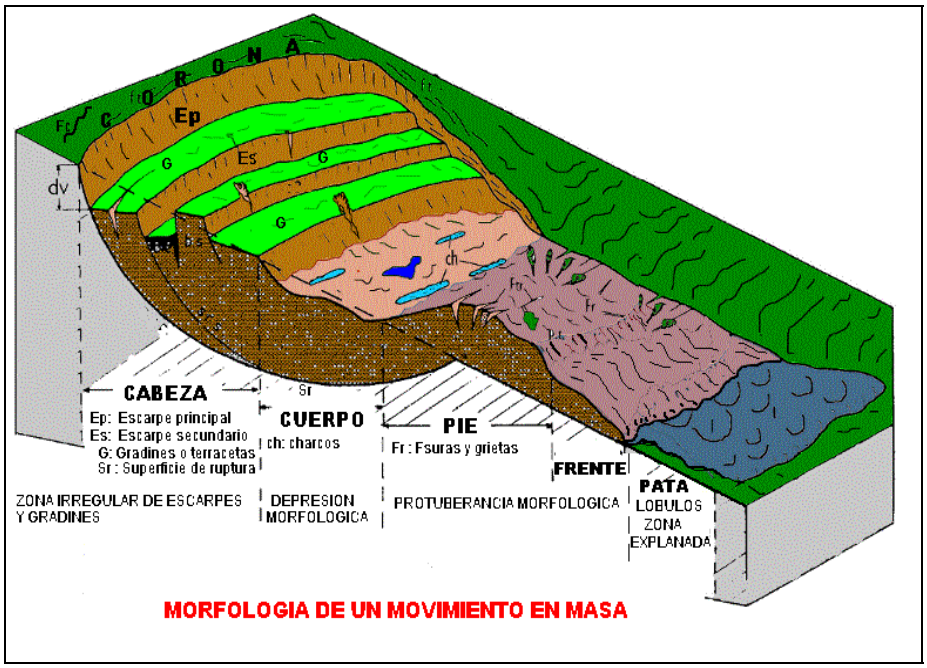


Figura 5-7. Elementos geomorfológicos de un movimiento en masa (Varnes, 1978)

Cuerpo principal. Representa la masa de deslizamiento que se localiza por encima de la superficie de falla o de ruptura. La parte superior se denomina cabeza, la cual generalmente desarrolla una depresión con pequeñas terrazas escalonadas limitadas por escarpes y contraescarpes secundarios. La parte inferior del cuerpo principal se denomina ***cuerpo***. El cuerpo presenta una morfología deprimida de superficie más homogénea (ondulada) y con zonas pantanosas (lagunas, charcos).

Pie. El pie representa la zona de material deslizado localizado en el límite inferior de la superficie de falla y la superficie inicial del terreno intacto. Generalmente esta zona es la más estrecha del movimiento y desarrolla una morfología levantada y abombada con fisuras o grietas dispuestas radial y transversalmente al sentido del movimiento. La línea de intersección entre la

superficie de falla y el terreno intacto es comúnmente *llamada pie de la superficie de falla*. Esta zona se presenta comúnmente cubierta de material deslizado.

Frente. Representa la zona inferior de la masa deslizada que reposa sobre el terreno intacto o insitu. Esta zona es por lo general la más viscosa y explanada. La forma de este deposito de material permite caracterizar el movimiento por su forma (abanico, lengua, etc..). La parte mas inferior del frente del movimiento es llamada *pata del movimiento*.

En la **Figura 5.8** se presenta el mapa geomorfológico del área de estudio, simplificando la nomenclatura de Dze para el deslizamiento de El Espino, Dzc para La Carbonera, seguido de la nomenclatura de su elemento correspondiente como zona de deslizamiento potencia dp, corona cr, escarpe principal ep, cabeza cbz, cuerpo, cu, pie, pata, y deslizamientos satélites dz1, etc.

Sobre toda el área también se interpretaron las grietas de deslizamientos que indican muy bien los sentidos de los movimientos. Un total de 4582 gritas fueron cartografiadas en el estudio mediante la interpretación de la imagen de satélite Quickbird de resolución espacial de 60 cm/píxel como se ilustra en **Figura 5.9.**

Igualmente se interpretaron estereoscopicamente sobre imágenes en anaglifos las direcciones de movimientos presentadas en las dos áreas de deslizamiento. **Ver Figura 5.10**

También se registra un escarpe de forma semicircular que podría corresponder a una corona de un antiguo deslizamiento, el cual comprende

desde la quebrada La Carbonera hasta una quebrada intermedia entre esta última y la quebrada Rosales.

5.3.1.1. Elementos morfodinámicos asociados al deslizamiento de La Carbonera

El deslizamiento de la Carbonera se inicio hace aproximadamente 35 años por la pérdida de soporte en la base de rocas estratificadas en el sentido de la pendiente, como consecuencia de la actividad minera de extracción de materiales de construcción y alguna actividad minera asociada a la búsqueda y extracción de carbón.

Es un deslizamiento de características complejas con mecanismos de falla translacional y rotacional con avance múltiple retrogresivo. Actualmente cubre una superficie aproximada de 16 Ha. El contorno del deslizamiento presenta una forma semitriangular con su ápice en la unión de las quebradas Carbonera al Este y Rosales al Oeste, las cuales conforman sus flancos. Presenta Actualmente su escarpe principal o zona de arranque principal de forma irregular una altura entre 2750 y 2723 m.s.n.m, y su pata a una cota de 2617 m.s.n.m., dando una altitud relativa cercana a los 130 metros. Su zona activa, presenta una longitud máxima de 564 y un ancho máximo de 460 metros. El espesor del deslizamiento es variable siendo su espesor máximo alrededor de los 25 metros.

Litológicamente afecta en su corona materiales fluvioglaciares y rocas de la Formación Guaduas Inferior, conformada por areniscas cuarzosas, con estratificación delgada, color crema amarillento, intercaladas con capas laminares a delgadas de arcillolitas grises, amarillas y rojizas.

Al interior del deslizamiento activo se identificaron tres movimientos con características particulares Ver **Figura 5.11**).

El primer movimiento Dzc_dz1, se localiza en el costado occidental del deslizamiento y se caracteriza por desarrollar una morfología irregular con la presencia de materiales blandos como suelos residuales que forman múltiples escarpes y grietas semicirculares y transversales a la dirección del movimiento.

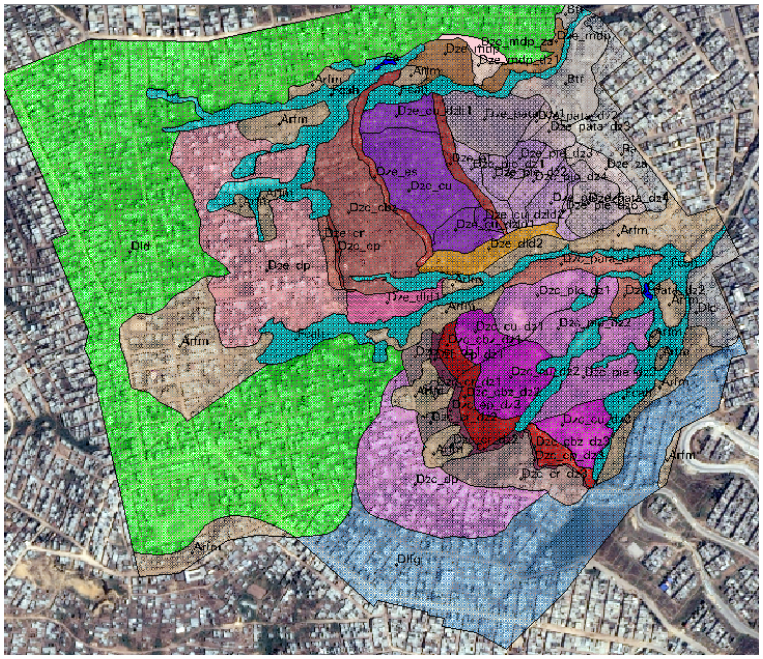


Figura 5-8. Mapa geomorfológico general

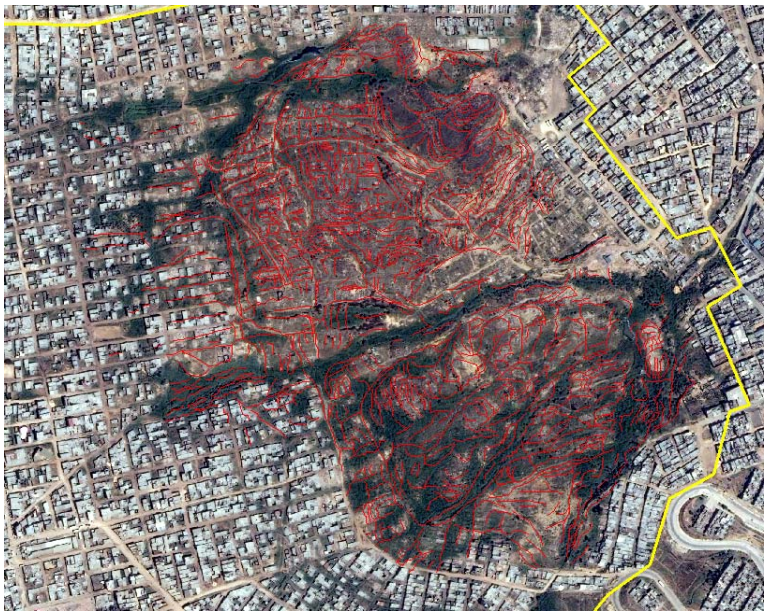


Figura 5-9. Mapa de grietas

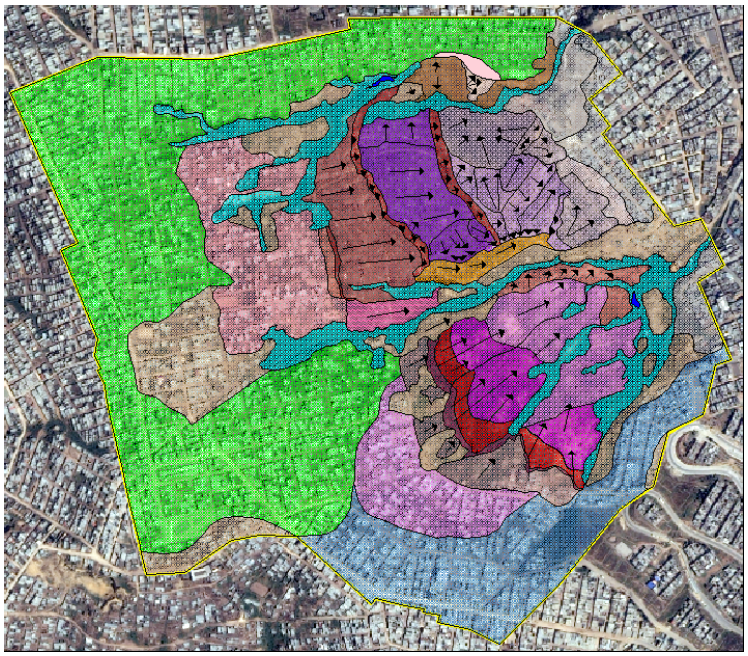


Figura 5-10. Mapa con direcciones de movimiento

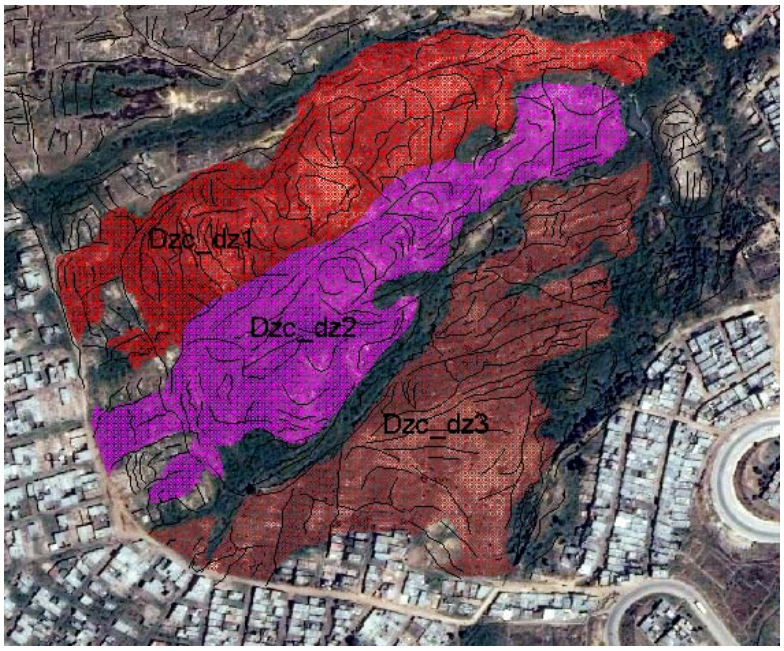


Figura 5-11. Deslizamiento de la Carbonera y sus tres subtipos de movimientos

El deslizamiento Dzc_dz2, se presenta en la parte central y es el de mayor profundidad y parece corresponder a la zona mas deprimida por acción de un antiguo deslizamiento que dejó un nicho de arranque en la parte alta del deslizamiento principal. Consta de fragmentos de roca, suelos y matriz arcillosa. La disposición de sus grietas es semicircular en la cabeza semejando un movimiento rotacional, longitudinal en el cuerpo y cerca de la pata.

La zona de deslizamiento Dzc_dz3 se caracteriza por desarrollar una estructura de deslizamiento de rocas que fueron removidas hace unos años dejando un piso de rocas fracturadas y con gritas diagonales a la dirección de movimientos. Es el movimiento más superficial.

5.3.1.2. Elementos morfodinámicos

Siguiendo el esquema típico de un movimiento en masa se establecieron para cada una de estos subtipos de movimientos sus elementos como zona de deslizamiento potencial, corona, zona de arranque principal, cabeza del movimiento, cuerpo, pie y pata. Igualmente la existencia de deslizamientos menores satélites a alguna de estas partes. A continuación se presenta una breve descripción de algunos de estos elementos. (**Figura 5.12**)

5.3.1.3. Zona de deslizamiento potencial

En la parte superior del deslizamiento activo de La Carbonera se registra en las fotografías aéreas e imágenes de satélite en 3D un nicho de arranque de un antiguo desprendimiento de grandes proporciones, sobre los materiales fluvioglaciares **(Figura 5.13)**. Cubre una superficie de 0,42 km^2.

Para cada uno de los deslizamientos se identificaron los elementos morfológicos de corona (Dzc_cr), Escarpe principal o zona de arranque (Dzc_ep), cabeza (Dzc_cdz), cuerpo (dzc_cu), pie (Dzc_pie), pata (Dzc_pata). Además se indican las áreas de influencia de los cauces y humedales (Fcah), y afloramientos rocosos (Arfm). A continuación se resaltan las características de algunas de esta geoformas.

5.3.1.4. Escarpe principal o zona de arranque (Dzc_ep)

Representa la zona de arranque actual más superior del movimiento y es bien característica en cada uno de los tres movimientos diferenciados en La Carbonera, presentan cada uno formas semicirculares con escarpes que varían entre 2 y 3 metros de altura.

La zona de arranque mas marcada morfológicamente corresponde a la deslizamiento 3. Estos escarpes se observaron claramente en la **Figura 5.14 a 5.16**, donde se ha superpuesto la fotografía aérea digital con la imagen Duickbird.

5.3.2. Elementos morfodinámicos asociados al deslizamiento de El Espino

El deslizamiento de El Espino se inicio hace aproximadamente 30 años como consecuencia de la pérdida de soporte de la base de rocas estratificadas en el sentido de la pendiente, por la actividad minera de extracción de materiales de construcción.

Es un deslizamiento de características complejas con mecanismos de falla principalmente transicional aunque se presentan lateralmente movimientos satélites de tipo rotacional. Su mecanismo de avance es retrogresivo.

Actualmente cubre una superficie aproximada de 17 Ha. El contorno del deslizamiento es de forma semirectangular y sus límites están definidos en la unión de las quebradas Carbonera al Este y Rosales al Oeste, las cuales conforman sus flancos. Su escarpe principal o zona de arranque principal de forma irregular una altura entre 2732 m.s.n.m, y su pata a una cota de 2609 m.s.n.m., dando una altitud relativa cercana a los 123 metros. Su zona activa, presenta una longitud máxima de 460 y un ancho máximo de 343 metros. El espesor del deslizamiento es variable siendo su espesor máximo alrededor de los 10 metros.

Litológicamente afecta en su corona materiales heterogéneos de rellenos antrópicos y suelos residuales con un espesor medio de 3 metros, que cubren discordantemente las rocas de la Formación Guaduas medio, conformada por areniscas cuarzosas arcillosas de color, con estratificación media a

gruesa, color amarillento y gris claro, intercaladas con algunas capas laminares a delgadas de arcillolitas grises, amarillas y rojizas

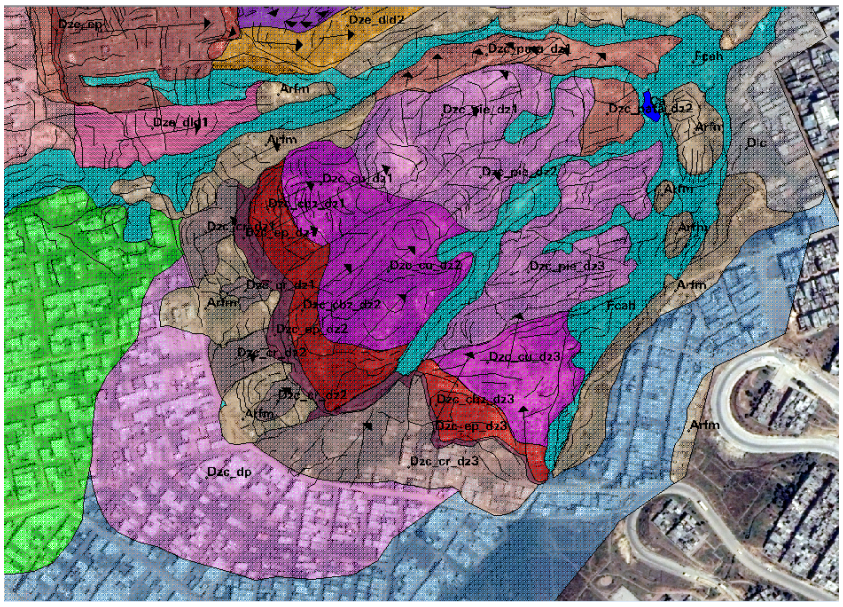


Figura 5-12. Mapa morfodinámico de la zona de deslizamiento La Carbonera.

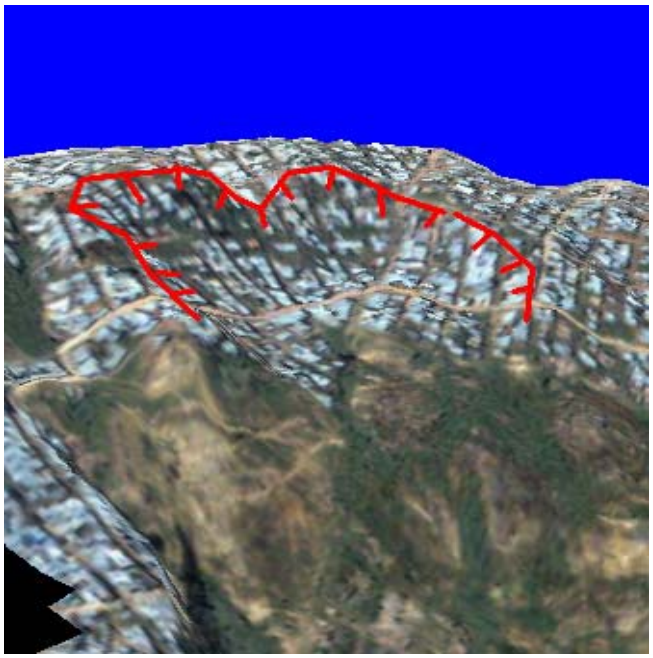


Figura 5-13. Nicho de de antiguo desprendimientos que constituye la zona de deslizamiento potencial de La Carbonera.

En la zona del espino se identificaron una gran variedad de geoformas a partir de sus elementos básicos como zona de deslizamiento potencial (Dze_dp), corona (Dze_cr), escarpe principal (Dze_ep), cabeza (Dze_cbz), cuerpo (Dze_cu), pie (Dze_pie), pata (Dze_pata), destacándose en algunas de esta forma otros deslizamientos satélites de carácter lateral. El Dze_pie_dz2 significa deslizamiento satelite 2 en el cuerpo del movimiento. Igualmente se identifica la zona del montículo de presión (Dze_mdp) en Ciudad Bolivar Barrio San Rafael y un deslizamiento de rocas sobre él (Dze_mdp_dz).

Otra nomenclatura se relaciona con las áreas potenciales de afectación de la masa deslizada principalmente en la pata del movimiento (Dze_za) y en la base del montículo de presión (Dze_mdp_za). A continuación se resaltan en imágenes algunas de estas geoformas.



Figura 5-14. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona y el escarpe principal del deslizamiento 1 de La Carbonera.

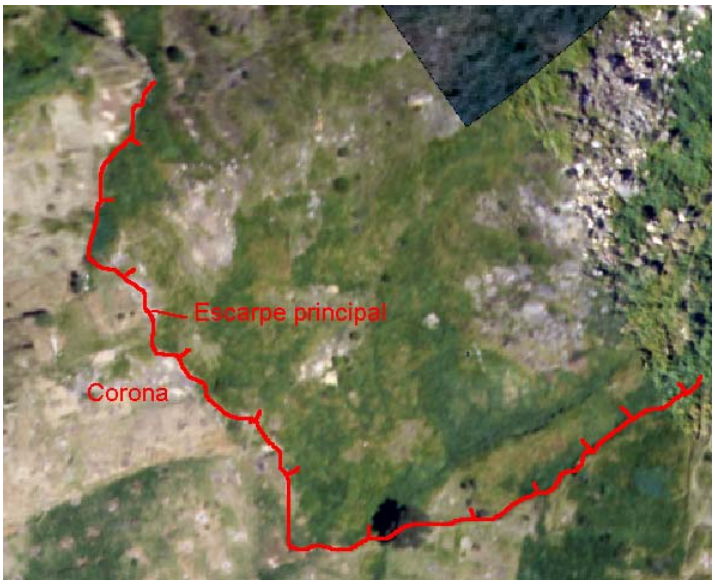


Figura 5-15. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona y el escarpe principal del deslizamiento 2 de La Carbonera.

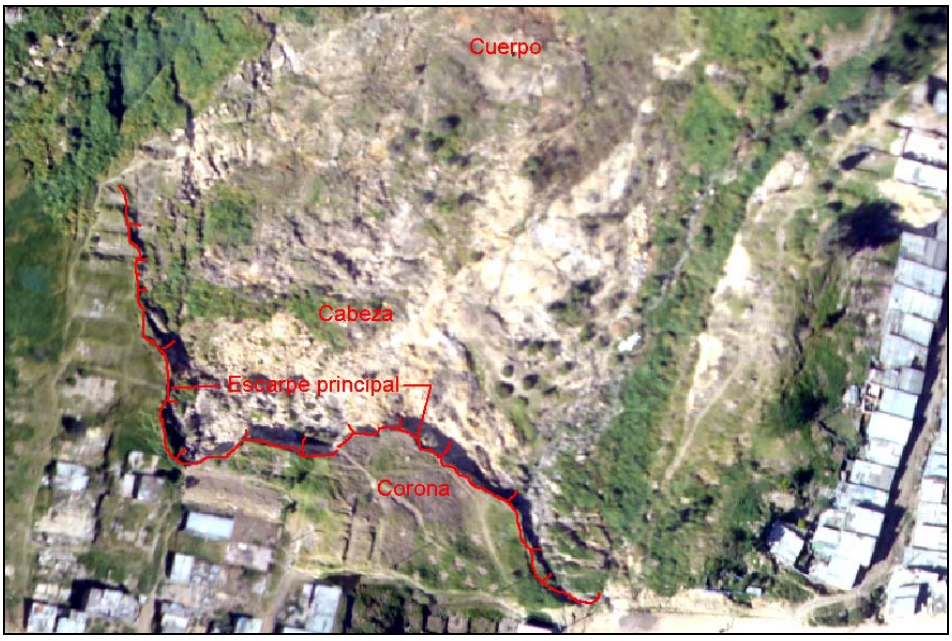


Figura 5-16. Fotografía aérea digital (Skymission) superpuesta a la imagen Quickbird indicando la zona de la corona, el escarpe principal, la cabeza y el cuerpo del deslizamiento 3 de La Carbonera.

El deslizamiento del Espino presenta 3 zonas de escarpes de desprendimiento de material importantes de forma lineal y paralelos entre sí. El escarpe principal que presenta una altura media de 2 metros aflorando material residual heterogéneo y roca fracturada. El escarpe secundario separa la cabeza del cuerpo y el escarpe de tercer orden separa el cuerpo del pie y a partir de este se presenta un cambio brusco de la pendiente. En las **Figuras 5.17** a **5.19** se presentan las principales características morfodinamicas de la zona.

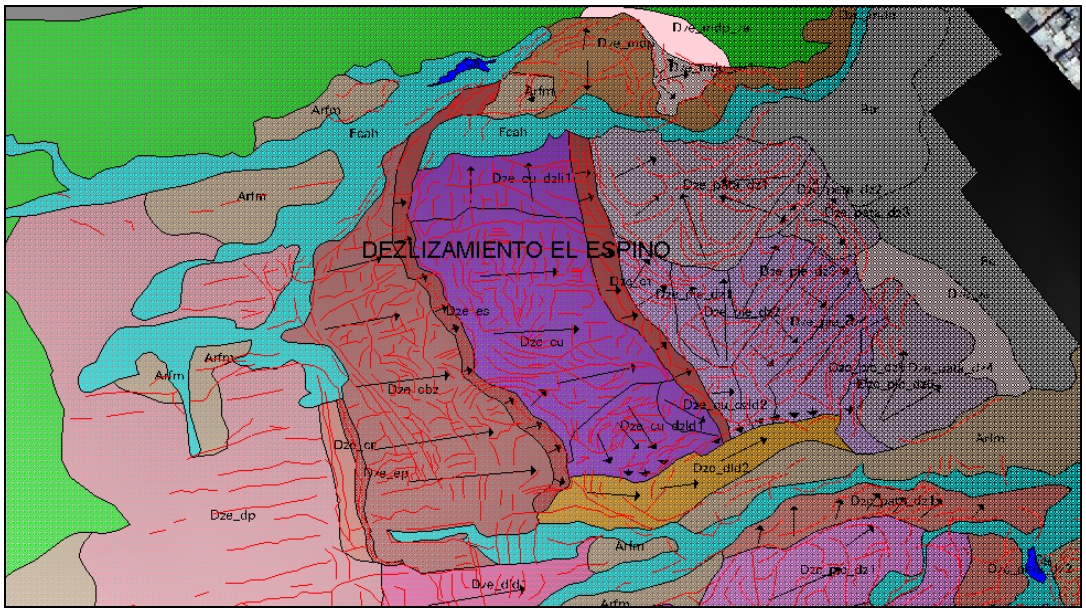


Figura 5-17. Unidades morfodinámicas del deslizamiento El Espino

En el cuerpo del movimiento se registraron tres deslizamientos laterales y satélites tanto en su costado o flanco izquierdo (Dze_cu_dzli). En su flanco derecho se presentan dos movimientos con direcciones diferentes uno lateral (Dze_cu_dzld1) y el otro laterofrontal . (Dze_cu_dzld1). Estos son deslizamientos desarrollados sobre la masa deslizada y de carácter rotacional.

El pie del deslizamiento de El Espino constituye una masa más compleja en el cual se identificaron y cartografiaron 6 deslizamientos con direcciones diferentes. En la pata se identificaron cuatro movimientos tanto laterales como frontales, Como se ilustra en la. **Figura 5.20**.



Figura 5-18. Vista en la fotografía digital (Skymission) y la imagen de satélite de los tres escarpes de arranque, la cabeza, el cuerpo y el pie de el Deslizamiento El Espino

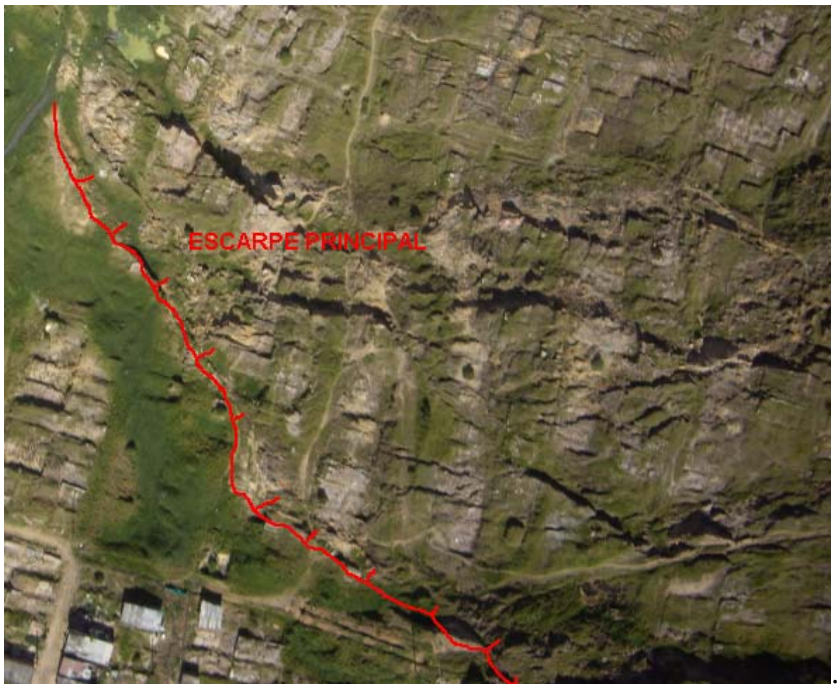


Figura 5-19. Detalle del escarpe principal del deslizamiento El Espino en su flanco izquierdo. Nótese la alta presencia de grietas asociadas a éste.



Figura 5-20. Detalle del escarpe principal del deslizamiento El Espino en su flanco derecho.



Figura 5-21. Vista de la parte baja del deslizamiento El Espino, indicando algunos de sus elementos morfodinámicos.

5.3.3. Morfología de la zona del montículo de presión (Dze_mdp) y un deslizamiento de rocas (Dze_mdp_dz) sobre él Barrio San Rafael.

Geomorfológicamente se trata de un cerro alargado, con orientación este-oeste, en donde se pueden presentar fenómenos de remoción en masa del tipo caída de rocas sobre su cara norte, debido al alto grado de fracturamiento del macizo rocoso y a la pendiente del escarpe. Según INGEOMINAS (2003), al talud en mención se le denomina Arenisca fracturada levantada y desplazada de la Formación Guaduas.

El talud afectado por el movimiento y que delimita el barrio San Rafael, corresponde a una ladera de origen estructural, afectada por una antigua explotación minera. La combinación de estos factores sumado a los asentamientos humanos subnormales, han generado un proceso de inestabilidad denominado como la zona inestable del montículo de presión

(Dze_mdp) y un deslizamiento de rocas (Dze_mdp_dz) sobre él Barrio San Rafael, cuya actividad origino la formación de un talud rocoso de 30 m de altura sobre el costado sur del barrio San Rafael.

5.3.4. Movimientos de Terreno en Santa Viviana

En el sector localizado sobre la margen derecha y parte alta de la quebrada Carbonera se han visto importantes incrementos en el movimiento retrogresivo del deslizamiento, los cuales han obligado a la reubicación de varias familias de la manzana 3, en el presente año. Este es uno de los frentes del deslizamiento con mayor actividad y por lo tanto se ha recomendado que las fases iniciales de implementación de las obras de mitigación se inicien en este sector.

6. EVALUACIÓN HIDROGEOLOGICA

En este capítulo se presenta la evaluación del agua subsuperficial, con el objetivo de determinar los posibles niveles piezométricos normales y máximos para el período de análisis del proyecto, esto es 50 años. Igualmente, con ello se pretende establecer algunos criterios para definir y diseñar el tipo de medidas de drenaje que mejor se adecuen a los rasgos hidrogeológicos y topográficos del sitio y que harán parte del plan de obras de prevención y estabilización, estableciendo el rango de eficacia de las mismas en términos de su efecto sobre los parámetros iniciales.

6.1. METODOLOGÍA

Para esta Evaluación Hidrogeológica se hizo un análisis de la información disponible, particularmente la del Informe "Estudio De Riesgo Y Medidas De Mitigacion En El Sector Altos De La Estancia De La Localidad De Ciudad Bolívar En La Ciudad De Bogotá, D. C.", elaborado por la firma Ingenieria y Georiesgos (2004). Dentro de éste específicamente se revisaron cuidadosamente, junto con los gráficos, anexos y planos correspondientes, los capítulos dedicados a los siguientes temas: Geología, Hidrogeología, Hidrología e Hidráulica, Investigación del subsuelo, Alternativas de mitigación y conclusiones. Dicho informe incluye la información compilada de al menos otros 5 estudios fundamentales y previos, ejecutados en el área desde 1998. Igualmente se revisó y analizó el capítulo y material gráfico correspondiente al Análisis Hidrológico y a los datos del monitoreo realizado a los pozos y piezómetros construidos durante este trabajo, que se desarrolló dentro del "Estudio de Evaluación de Amenaza por deslizamiento de los barrios El Espino

y Cerros del Diamante, Ciudad Bolívar – Bogotá", elaborado por Ingeominas (2003). Para efectos de localización de sitios de perforaciones, piezómetros e inclinómetros previamente construidos, se consultó el plano1: Localización de Instrumentos y secciones transversales de Geotecnia y Cimentaciones (2005).

También se realizaron dos visitas al área de estudio, a finales de Octubre y de Noviembre de 2007, en las cuales se identificaron directamente los fenómenos, posibles causas e implicaciones principales en los dos sectores afectados por deslizamientos del terreno (El Espino y La Carbonera) y por otro lado se hizo una campaña dirigida específicamente a localizar en el terreno antiguos piezómetros e inclinómetros construidos en estudios anteriores y que estuvieran aún utilizables, donde se pudieran hacer mediciones actuales y directas de la profundidad del nivel piezométrico, con una sonda eléctrica diseñada para tal fin, buscando tener una imagen más homogeneizada de estos valores. El resultado fue muy exiguo.

Partiendo de toda la anterior información, a continuación se identificaron todos los sitios existentes en el área de trabajo donde existiesen datos medidos de niveles piezométricos y en lo posible la profundidad de la instrumentación o de la construcción allí realizada, incluyendo piezómetros, inclinómetros, perforaciones en general y sondeos eléctricos verticales. Entre estos puntos preseleccionados se hizo una graficación general en el plano, de donde se eliminaron las duplicidades e inconsistencias, lo mismo que los puntos sin información sobre su localización. A los restantes así colocados en el plano se les calcularon las cotas aproximadas sobre el nivel del mar para dos datos: Altura del nivel piezométrico y altura de la base de la construcción y/o perforación. Con esos datos se hizo el análisis de la posición aproximada de los niveles piezométricos, su significado hidrogeológico y su

relación posible con los fenómenos de deslizamiento, incluyendo el diseño y ejecución de una red de flujo para un sector restringido dentro del área de trabajo y su posterior análisis.

A partir de la información de los pozos construidos y monitoreados por Ingeominas (en Ingeniería y Georiesgos (2004), lo mismo que de los resultados del trabajo "Estudio Hidrogeológico de las zonas de Soacha y Ciudad Bolívar" (Ingeominas – EEAB, 1988), se recopilaron y analizaron los resultados obtenidos para los valores de permeabilidad en diferentes litologías dentro de la Formación Guaduas, para la zona de estudio.

Finalmente, con la información de niveles y de las características de los acuíferos principales encontrados, se hizo un cálculo de los flujos posibles a obtener de esos acuíferos por unidad de sección transversal a ser intervenida.

6.2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Con base en las actividades realizadas se presentan los siguientes conceptos

6.2.1. Unidades Hidrogeológicas

Se subdividen en consolidadas y no consolidadas para efecto de su análisis.

Unidades Consolidadas. Corresponden a las Rocas de edad Cretáceo y Terciario que yacen tanto en el subsuelo del área de estudio como también aflorando en superficie, involucradas o no en los dos sectores de deslizamiento.

Formación Guadalupe – Arenisca Tierna: Aflora en el límite occidental y extremo sur del área de estudio. Se diferencia por formar escarpes. Se compone de areniscas cuarzosas y arcillosas de grano fino a medio, de dureza media a alta, poco a moderadamente meteorizadas. Se califica como un material permeable, con porosidad esencialmente secundaria (por discontinuidades) y potencialmente acuífero.

Formación Guaduas - Segmento 1. De carácter principalmente arcilloso compuesto por niveles de arcillolitas grises y negras, lodolitas y algunos niveles de areniscas de color amarillento de grano medio. Aflora en la parte central de la zona conocida como Carbonera. Puede contener niveles de carbón delgados. Para efectos de su capacidad de almacenar y transmitir agua se clasifica como un material esencialmente impermeable, es decir acuicludo.

Formación Guaduas - Segmento 2. Compuesto por lodolitas con capas de areniscas en el tope, las lodolitas son de color crema y amarillas seguidas por una secuencia de capas delgadas a laminares de areniscas con costras en niveles delgados, capas de areniscas en capas gruesas y niveles de arcillolitas y limolitas de color gris claro y amarillo. Aflora principalmente en el sector de La Carbonera rodeando rocas del segmento 1. Se le considera como impermeable en su base (acuicludo) y acuitardo en su parte superior (semipermeable) siendo su mayor permeabilidad en las capas de arenisca y es de tipo primario y secundario. Esa permeabilidad es aún mayor en el sector del deslizamiento La Carbonera (parte media - baja del deslizamiento) donde esta afectado por este fenómeno.

Formación Guaduas - Segmento 3. Principalmente arenoso denominado como la Arenisca Guía, compuesto por capas de arenisca cuarzosa de

grano fino a medio, en estratos gruesos a finos, estratificación masiva y localmente cruzada, de areniscas cuarzosas, grano fino, ligeramente arcillosas, finamente laminadas, ligera a moderadamente meteorizadas, de color amarillento con manchas marrones por alteración, ligeramente friables y fracturadas. El espesor de las capas varía entre 8 m y 15 m. Se le considera un acuífero, el más importante por su espesor total y características en el área del presente estudio, es decir con alta permeabilidad y su porosidad es principalmente primaria, pero también es secundaria a partir de las discontinuidades que la afectan. Esa permeabilidad es aún mayor en el sector del deslizamiento El Espino (parte alta cerca de la corona) donde esta muy fracturado por este fenómeno de remoción en masa.

Formación Guaduas - Segmento 4. . Comprende un paquete de arcillolitas de color gris oscuro y amarillo, con algunas capas de areniscas y niveles delgados de carbón. Se presenta localmente bajo los sectores El Rodeo y El Espino III Sector en contactos fallados por las fallas de Santa Rita, Mochuelo y El Espino E. Para efectos de su capacidad de almacenar y transmitir agua se clasifica como un acuicludo básicamente, es decir impermeable.

Formación Guaduas - Segmento 5. Constituye el tope de la Formación Guaduas en el área de estudio, se compone de areniscas, arcillolitas en franjas de colores rojizos y azulosos intercalados. Las areniscas son cuarzosas, bien cementadas, de color gris, en capas de espesor medio 1,5 metros, duras, fracturadas, meteorizadas a muy meteorizadas. Las limolitas de son de color gris amarillento. Para efecto de aplicaciones locales se puede clasificar como un acuífero multicapa, formando acuíferos colgados, en los estratos de arenisca que tienen al parecer espesores importantes (1.5m), pero si se le ve a escala del área puede considerarse un acuitardo pues los flujos del agua subterránea estarían limitados verticalmente por las capas

arcillosas. En el caso de los estratos de arenisca su porosidad es principalmente de tipo secundario. Su permeabilidad es aún mayor en el sector del deslizamiento El Espino (borde bajo oriental) donde esta afectado por este fenómeno.

Unidades Sin Consolidación. Aquí se incluyen los materiales de depósitos no consolidados que afloran en la superficie del terreno. Se han subdividido en dos grupos: rellenos o depósitos antrópicos y depósitos inconsolidados.

Depósitos Antrópicos. Son de extensión muy limitada y se encuentran en los límites de los deslizamientos (partes bajas), fuera de la zona de influencia que impulsa estos movimientos.

Se componen de desechos de construcción y otras actividades humanas, poseen porosidad primaria y son permeables, pero de escasa o nula influencia en el fenómeno en cuestión por su ubicación.

Depósitos No consolidados. Son de origen natural y se encuentran en su mayor extensión por fuera de los perímetros de los dos deslizamientos (a excepción de los depósitos aluviales). Son cuatro:

- Suelo residual y areniscas meteorizadas: Se ubican arriba del deslizamiento del Espino, ocupando una extensión considerable (28 hectáreas). Se componen de un suelo residual poco profundo (1 a 1,5 metros), cubriendo capas medias de areniscas cuarzosas con alguna intercalaciones de lodolitas. Se califican como material permeable e importantes por su potencial influencia en los proceso de deslizamiento.

- Suelo residual y coluvión: Los depósitos coluviales se presentan en gran parte del área de estudio a nivel local, sin embargo en la cartografía se destacó un depósito localizado en el sector suroriental del área. Se compone de fragmentos de areniscas cuarzosas de

tamaño medio (20 –30 cm) en matriz limo arenosa de color gris clara. Se clasifica como material permeable, pero se cree que su incidencia es menor en los deslizamientos por su localización fuera del área de influencia.

- Depósito aluvial: Se presenta sobre los lechos de las quebradas Carbonera, Rosales y Santa Rita, formado depresiones poco profundas y estrechas. Se distinguen principalmente por su morfología y la presencia de pastos asociados a la humedad de sus zonas de inundación. Se componen de sedimentos tipo arena y limo con algunas gravas y guijos. Se clasifican como permeables y de influencia importante en los procesos de deslizamiento.

- Suelo residual y depósito fluvioglacial: Los depósitos fluvioglaciales se presentan bien expuestos en los taludes de la vía a Sierra Morena y en el área de estudio se restringen principalmente al sector de La Carbonera. Desarrollan suelos orgánicos y residuales delgados. El espesor del depósito es variable en el área (desde 10m) considerando un espesor máximo de unos 40 metros. Se componen de bloques de areniscas de bordes subangulares en una matriz arcillo-limosa ligeramente plástica a plástica de color gris clara y amarilla moderadamente compacta. Se clasifican como de baja permeabilidad.

6.2.2. Influencia de las Estructuras Geológicas en el modelo.

Como se menciona en el capítulo de Geología, el Cerro Altos de la Estancia, se describe como una geoforma de cerro estructural, orientada en dirección EW, en donde la estructura regional de pliegues en dirección NE se pierde y se presentan capas de rocas de las formaciones Guadalupe y Guaduas formando pendientes estructurales inclinadas hacia el NE. Esta estructura se asemeja a un monoclinal formado por las Formaciones Arenisca Tierna y Guaduas, con buzamientos predominantes en dirección NE, y localmente en otras direcciones, producto de los fallamientos cruzados que han producido una tectónica de bloques en esta región de la Sabana. Dicha condición hace que esta estructura mayor (a escala del estudio) sea uno de los principales controles en la dirección de las aguas

sub-superficiales y subterráneas dentro de los estratos permeables que allí se encuentran en estas unidades de roca, los cuales a su vez están restringidos en flujos verticales por las intercalaciones de capas de arcilla, originando flujos preferenciales con orientación aproximada hacia el NE. Algunos controles menores de tipo local, ejercen allí otras discontinuidades de tipo diaclasas con direcciones aproximadas N-NW. Estas influencias locales también son importantes en el caso de la zona deslizada del Espino, pues la roca consolidada allí, se resquebraja y separa siguiendo los patrones principales de diaclasamiento, lo cual abre caminos expeditos para los flujos verticales.

En cuanto al papel de las fallas principales respecto a favorecer o no los flujos de agua subterránea, se destacan en principio las siguientes aproximaciones:

Falla Rosales. Ejerce un papel de barrera impermeable para flujos subterráneos profundos que eventualmente aportarían al sector deslizamiento del Espino, porque pone en contacto a la unidad formación Guaduas – Segmento 1 de tipo impermeable, ubicada al sur de la falla, con las unidades Guaduas – segmento 3 y segmento 2, de carácter permeable, ubicadas en la parte Norte de la falla.

Falla Carbonera Norte. Pone en contacto en su bloque sur a la Unidad Guaduas – segmento 2, de carácter semipermeable en su techo, con la unidad Guaduas – segmento 1, de tipo impermeable, en su bloque norte. Esto significa que los flujos con dirección NE que viene del bloque sur de la falla , no pasan hacia el bloque Norte, lo cual en principio favorecería al sector deslizado de la Carbonera, al ser menores los empujes debidos a agua subterránea allí.

Falla El Espino E. Se estima para esta que hace un papel de barrera impermeable a los flujos de agua subterránea con dirección NE, al poner en contacto a un acuífero (Guaduas – segmento 3) en su bloque Oeste, y al otro lado un acuicludo (Guaduas – segmento 4). Este efecto causaría un efecto de represamiento y elevación de los niveles freáticos y piezométricos existentes.

La demás fallas en principio se catalogan como límites permeables, es decir que permiten el intercambio de flujos en el subsuelo. Sin embargo hace falta un análisis más detallado para definirlo.

6.2.3. Apreciaciones sobre fuentes de aporte de agua hacia los materiales involucrados en los deslizamientos

Una primera aproximación con base en la experiencia de estudios hidrogeológicos en la Sabana de Bogotá, permite afirmar que los aportes al agua subterránea debidos a la infiltración directa originada en lluvia, son relativamente escasos en esta zona, donde la precipitación media ronda los 650 mm/año y los valores de evapotranspiración son casi todo el año hidrológico mayores en una visión mes a mes. La recarga sucede en la inmensa mayoría del área a partir de la infiltración de la lluvia, y esto sucede solamente en marzo, mayo, y noviembre, de acuerdo con los análisis hidroclimatológicos de Ingeominas (2003) y del presente estudio en su capítulo de Hidrología (abril mayo, octubre y noviembre).

También a partir de las observaciones hechas directamente en las salidas realizadas dentro del área de trabajo, pareció bastante evidente la importancia mayor de los aportes debidos a aguas servidas y aguas de escorrentía producto de lluvia y eventualmente a aguas provenientes del

acueducto en sitios donde hayan escapes y usuarios no conectados, tanto en La Carbonera como en el Espino, en relación con los terrenos inestables ubicados aguas debajo de esos barrios. Estos aportes deben ser mejor cuantificados e idealmente ser disminuidos a un mínimo. **Figura 6.1**.



Figura 6-1. Sector El Espino. Ejemplo de pérdidas en sistemas de abastecimiento (manguera) y acumulación de esta agua en las cañadas aledañas.



Figura 6-2. Sector El Espino, parte norte, arriba pero muy cerca de la corona del deslizamiento. En los barrios aledaños es evidente también la pérdida y escurrimiento de aguas servidas.

6.2.4. Interpretación de los niveles piezométricos y zonas húmedas.

La información sobre estos niveles aunque es relativamente abundante, está desordenada y dispersa. En general en todos los piezómetros y perforaciones que han sido construidos en los diferentes estudios previos, la toma de información de niveles de agua subterránea no ha sido dirigida metódicamente a investigar detalladamente los niveles piezométricos y su relación con el problema, ha sido mas bien información tomada como accesoria en diferentes épocas, puntualmente y a lo largo de varios años; lo anterior hablando a escala de la totalidad del área afectada.

De acuerdo con comparaciones hechas por Vargas (Comunicación verbal, 2007), entre las imágenes infrarrojo del 2004 y 2007, es bastante notable el aumento de la humedad superficial en los últimos 3 años, especialmente en el sector de la Carbonera.

Para el sector de El Espino, en la imagen satelital tomada para el rango infrarrojo (**Figura 6.3**) se nota bastante humedad, resaltada por los tonos rojos intensos, concentrada en el sector localizado inmediatamente al occidente de la Falla El Espino W; sin embargo los datos de las perforaciones y piezómetros (IGR-PO4, CAE-P3, PZ-3, Pozo 3) muestran que los niveles piezométricos allí generalmente están bajo los 20m de profundidad.

Esta humedad se interpreta como derivada principalmente de los aportes de las aguas grises y potables a partir de las conducciones rotas del acueducto y alcantarillado y también emanadas de viviendas no conectadas a tales sistemas, en los barrios aledaños, especialmente ubicados aguas arriba, las cuales son retenidas temporalmente en el perfil del suelo residual, incluyendo allí las areniscas y lodolitas meteorizadas. Dichos aportes de agua se originan a su vez en desplazamientos

subsuperficiales de algunas decenas de centímetros, suficientes para "desencajar" tales conducciones, como se pudo observar en el terreno directamente. Como puede verse en la imagen, el sector así afectado se extiende en una franja amplia de unos 120 a 140m de ancho, que bordea a la zona deslizada desde la falla Espino W hacia el occidente. Al oriente de la Falla Espino W, desaparece casi en su totalidad la humedad mencionada, excepto en inmediaciones del cauce de la Quebrada Santa Rita, la cual obrando como drenaje natural concentra una parte de esas aguas, donde la humedad se retiene en el aluvión correspondiente, compuesto en su mayoría por materiales de tamaño fino. En el resto del sector del Espino (zona principal deslizada) la humedad superficial descrita desaparece prácticamente al infiltrarse hacia profundidad a través de las familias de fracturas cruzadas, que son abundantes, profundas y están asociadas al proceso del deslizamiento en estos materiales consolidados.

Para el sector de La Carbonera, en la **Figura 6.3** se observa una concentración muy notable (mayor que en El Espino), de humedad superficial asociada a los depósitos recientes que cubren tanto la zona deslizada (al oriente), como alguna parte de la aún no involucrada en este proceso (parte occidental).

Específicamente se nota mas la presencia de la humedad superficial (tono rojo intenso), en el terreno afectado por el deslizamiento, al oriente del carreteable parcialmente conservado que da acceso a las últimas casas aún habitadas en la parte baja del barrio Santa Viviana, en el extremo sur del área de trabajo. Dicha humedad se concentra mas alrededor de los drenajes y cañadas, que en este sector son numerosos y forman aguas abajo 3 "lagunas" pequeñas.

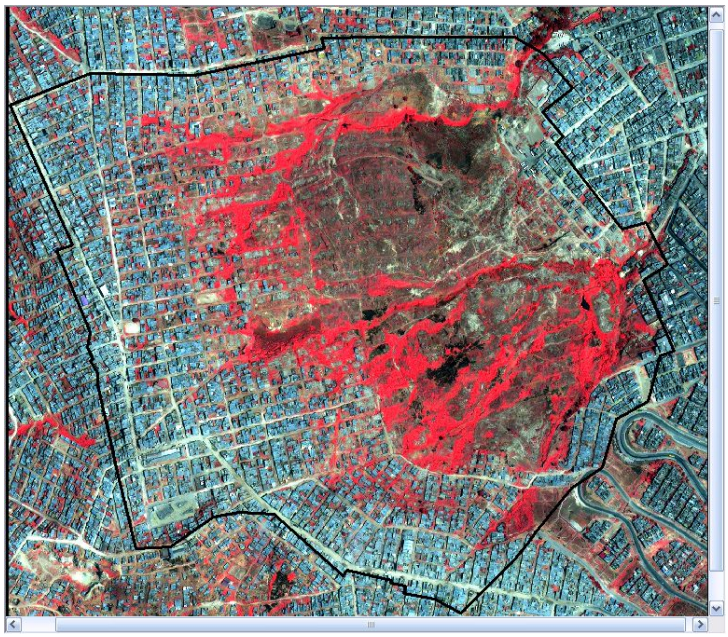


Figura 6-3. Imagen de Satelite en el rango infrarrojo, se destacan las zonas húmedas en tonos rojizos encendidos y los encharcamientos en negro.

Esta acumulación mayor de humedad a pesar de estar en zona afectada por deslizamiento, en comparación con la zona equivalente del Espino, se atribuye a que los depósitos originalmente de tipo fluvio-glaciar y aluvial, que hoy están involucrados en el proceso del deslizamiento, tienen un alto contenido de material tamaño fino (limo-arcilla), y no están consolidados, por lo cual ante el movimiento se comportan de manera plástica, deformándose, pero sin constituir fracturas de profundidad considerable por donde migre hacia profundidad este flujo de agua. Por encima de la parte alta de ese deslizamiento, topográficamente hablando, es decir al W del carreteable, se observa también, aunque en menor cantidad la presencia de humedad escurriendo a lo largo de las calles de los barrios Santa Viviana y Santo Domingo, en una faja de aproximadamente 80 a 90 m de anchura, ubicada inmediatamente aguas arriba y alrededor del escarpe principal del deslizamiento. Con esta evidencia y la observada directamente en el sitio durante las visitas de campo, se interpreta el origen de esta agua como

derivada principalmente de los aportes de las aguas grises y potables a partir de las conducciones rotas del acueducto y alcantarillado y de viviendas no conectadas al sistema, ubicadas en esta faja señalada dentro de los barrios mencionados, ubicados aguas arriba del deslizamiento principal. Dicha agua es retenida temporalmente en el perfil del suelo residual relacionado a estos depósitos no consolidados.

Niveles piezométricos sector de El Espino

En cuanto a los niveles piezométricos, para tratar de entender su origen, características y relaciones con el proceso de deslizamiento se separan en dos tipos:

Acuíferos Principales. En la zona los niveles están en general por debajo de los 20 m de profundidad respecto a la superficie, pero no hay datos medidos en cantidad suficiente, tal que permitan el trazado de líneas de flujo y curvas equipotenciales (isopiezas), al menos en alguna zona restringida dentro del sector El Espino. Sin embargo un vistazo a los valores de los puntos de observación disponibles (**Tabla 6.1)** muestran que en la parte oriental, dentro del cuerpo del deslizamiento (al Este de la Falla El Espino W), los niveles piezométricos estarían también por debajo de los 20 m de profundidad y en algunos sectores a mas de 30m. Entonces las "lagunas" pequeñas que se forman en la parte media-baja del deslizamiento son probablemente producto del "represamiento subterráneo" del flujo de agua y ascenso correspondiente del nivel piezométrico del acuífero principal (Areniscas del Segmento 3 -Formación Guaduas) hasta alcanzar la superficie, como consecuencia de su contacto a través de la Falla Espino E con el Segmento 4 de la misma Formación, que tiene carácter de acuicludo. Es de anotar además la notable coincidencia de la posición de

estas "lagunas pequeñas" en una franja estrecha alineada con la posición de la Falla Espino E.

En la parte occidental de la Falla El Espino W, dichos niveles también están profundos (Pozo 7, CAE-P3, IGR-P04, INC-3, INC-5) es decir por debajo de 20m y aún bajo los 30 m de profundidad (INC-5). Sin embargo, debe anotarse que en algunos pozos, como en CAE-P3, se midió un nivel de 2.7 m de profundidad al inicio de la perforación, pero aquél no perduró con el avance. Esto se puede interpretar como un "nivel colgado", correspondiente a un acuífero poco extenso y somero, o al agua de perforación. Otro tipo de respuesta sucedió con el piezómetro PZ-3 ó PC3 (Nivel medido en Noviembre de 2007 a 18.9 m de prof.), donde de acuerdo con datos obtenidos de Ingeniería y Georiesgos(2004), al final de la perforación total (30,4m), el entonces denominado Pozo 3 se mostró seco (**Tabla 6.2).**

Sin embargo después, una vez construido el piezómetro en este mismo sitio (Profundidad total 29.9m) y durante el monitoreo realizado entre Mayo de 2002 hasta abril de 2003, la profundidad del nivel osciló entre 18,75 m y seco, esto último equivale a decir mayor a 30 m de profundidad (Ingeominas, 2003).

Tabla 6-1. Puntos iniciales preseleccionados con información de niveles piezométricos.

IDENTIFICACION	TIPO	AUTOR MEDICIÓN , AÑO	SECTOR	N	E	PROF. NIVEL(m)	PROF. TOTAL(m	OBSERVACIONES
INCUA-3	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2005	CARB.	97950	89384	7		DATOS DE NIVEL REPORTADOS POR TRABAJADOR DE GEOTECN. Y CIMENTAC., PARA MONITOREO REALIZADO ENTRE DIC/04 Y JUNIO/05
PIEZ-2(1)	Piezom	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	CARB.	97943	89382	15-15,5		
INC-4?	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	CARB.	98288	89180	14		
INC-5	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98454	88950	35		
INC-3	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98442	88877	SECO		
INC-GC-01	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98786	88996	SECO		
INC-GC-03	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98358	89025	SECO		
PZ-3(5)	Piezom	CONS. ALT. ESTANCIA, 2007	ESPINO	98590	88874	18,88	28,23	
CAE - P1	Piezom	CONS. ALT. ESTANCIA, 2008	CARB.	97918	89136	4,5-12	16,5	A 12 m Antes de entubar
CAE - P2	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2009	CARB.	98236	89468	1,5-2,7	25	
CAE . P3	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2010	ESPINO	98536	88764	2,7-SECO	19,5	2,7m durante inicio perfor., luego desapareció
CAE . P4	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2011	CARB.	98177	88900	SECO	32	
CAE - P5	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2012	ESPINO	98647	89438	SECO	13,5	
P1	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98129	89508	3,75	12,2	
P2	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98111	89478	1,85	7,5	
P3	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98092	89386	1,79	7	
P4	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98122	89360	2,35	5,4	
P5	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98061	89264	0,5	3,5	
P6	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98234	89359	1,65	6,5	
P7	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98324	89321	SECO	6,95	
SAV-S-1	Perf.	INGEOCIM, 1998	CARB.	97910	88770	SECO	4	
S-1	Perf.	CONS. CIVILES-HIDROCONSULTA,1999	ESPINO	98733	89450	SECO	6,55	
S-2	Perf.	CONS. CIVILES-HIDROCONSULTA,1999	ESPINO	98748	89442	SECO	4,55	
Inclinometro-1	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98600	89257	SECO	9,2	
inclinometro-2	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98654	89179	SECO	14	
inclinometro-3	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98495	89231	SECO	16,8	
inclinometro-4	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98547	89339	SECO	10	
pozo 1	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98696	89068	SECO	30,1	
Pozo 2	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98634	89034	SECO	28,9	
pozo 3	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98588	88872	SECO	30,4	
pozo 4	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98509	89046	SECO	23,8	
pozo 5	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98503	88971	SECO	21,5	
pozo 6	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98441	88877	SECO	26,1	
pozo 7	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98380	88794	SECO	23,1	
pozo 8	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98449	89109	SECO	30,1	
pozo 9	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98452	88949	SECO	37,7	
pozo 10	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98827	89165	SECO	19,2	
pozo 11	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98662	89444	SECO	21,1	
INUA1	Inclin.	UNIANDES, 2001	CARB.	98262	89113	3	10,5	
INUA2	Inclin.	UNIANDES, 2001	CARB.	98146	89166	3,2	11,5	
INUA3	Inclin.	UNIANDES, 2001	CARB.	97949	89385	SECO	11	
PUA-1	Piezom	UNIANDES, 2001	CARB.	98137	89207	5-6,3	10	Para estos hubo monitoreo desde Ene /01 hasta Oct/01
PUA-2	Piezom	UNIANDES, 2001	CARB.	97941	89382	7-SECO	10	
IGR-P01	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98198	89265	SECO	14	
IGR-P02	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98141	89119	SECO	37	
IGR-PO3	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	97944	89100	SECO	24	
IGR-PO4	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98497	88667	SECO	20,5	
IGR-SEV01	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	97875	89020	36,79		
IGR-SEV02	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98183	88796	31,52		
IGR-SEV03	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98456	88603	36,79		
IGR-SEV04	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98513	88868	22,07		
IGR-SEV05	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98712	89291	36,79		
IGR-SEV06	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98209	89331	39,73		
IGR-SEV07	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98416	89587	18,39		
PZ2	Piezom	UNIANDES, 2001		?	?	SECO		Para estos 3 hubo monitoreo desde Ene /01 hasta Oct/01
PZ4	Piezom	UNIANDES, 2001		?	?	0,2-4,85		
PZ5	Piezom	UNIANDES, 2001		?	?	1-3,8		
PC1 = Pozo 1	Piezom	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	?	?	SECO	6,2-6	Se monitorearon entre mayo/02 y abril/03. Experimentaron deterioro progresivo y finalmente destruccion
PC2 = Pozo 2	Piezom	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	?	?	10,27-17,9	22-15,4	
PC3 = Pozo 3	Piezom	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	?	?	18,75-SECO	29,9-27	





Tabla 6-2. Puntos escogidos con información depurada.

IDENTIFICACION	TIPO	AUTOR MEDICIÓN , AÑO	SECTOR	N	E	ALT. NIVEL(m.s.n.m.)	ALT. FONDO(m.s.n.m.)	OBSERVACIONES
INCUA-3(INUA3	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2005	CARB.	97950	89384	SECO	2746	DATOS DE NIVEL REPORTADOS POR TRABAJADOR DE GEOTECN. Y CIMENTAC., PARA MONITOREO REALIZADO ENTRE DIC/04 Y JUNIO/05
PIEZ-2(PUA-2	Piezom	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	CARB.	97943	89382	SECO	2748	
INC-4	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	CARB.	98288	89180	2702	?	
INC-5(Pozo 9)	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98454	88950	2709	2706	
INC-3(Pozo 6)	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98442	88877	SECO	2726	
INC-GC-01	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98786	88996	SECO	?	
INC-GC-03	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT. , 2005	ESPINO	98358	89025	SECO	?	
PZ-3(PC3)	Piezom	CONS. ALT. ESTANCIA, 2007	ESPINO	98590	88874	2704	2695	
CAE - P1	Piezom	CONS. ALT. ESTANCIA, 2008	CARB.	97918	89136	2789	2777	A 12 m Antes de entubar
CAE - P2	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2009	CARB.	98236	89468	2668	2645	
CAE . P3	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2010	ESPINO	98536	88764	SECO	2723	2,7m durante inicio perfor., luego desapareció
CAE . P4	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2011	CARB.	98177	88900	SECO	2759	
CAE - P5	Perf.	CONS. ALT. ESTANCIA, 2012	ESPINO	98647	89438	SECO	2597	
P1	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98129	89508	2687	2679	
P2	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98111	89478	2700	2695	
P3	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98092	89386	2721	2716	
P4	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98122	89360	2716	2713	
P5	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98061	89264	2743	2740	
P6	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98234	89359	2691	2687	
P7	Perf.	ING. Y GEOTECNIA,1999	CARB.	98324	89321	SECO	2679	
SAV-S-1	Perf.	INGEOCIM, 1998	CARB.	97910	88770	SECO	2813	
S-1	Perf.	CONS. CIVILES-HIDROCONSULTA,1999	ESPINO	98733	89450	SECO	2602	
S-2	Perf.	CONS. CIVILES-HIDROCONSULTA,1999	ESPINO	98748	89442	SECO	2609	
Inclinometro-1	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98600	89257	SECO	2659	
inclinometro-2	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98654	89179	SECO	2667	
inclinometro-3	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98495	89231	SECO	2682	
inclinometro-4	Inclin.	GEOTECN. Y CIMENT., 2001	ESPINO	98547	89339	SECO	2652	
pozo 1	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98696	89068	SECO	2645	
Pozo 2	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98634	89034	SECO	2668	
pozo 3	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98588	88872	SECO	2693	Allí se instaló luego el piez. PZ-3
pozo 4	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98509	89046	SECO	2700	
pozo 5	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98503	88971	SECO	2714	
pozo 7	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98380	88794	SECO	2742	
pozo 8	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98449	89109	SECO	2696	
pozo 10	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98827	89165	SECO	2644	
pozo 11	Perf.	INGEOMINAS, 2003	ESPINO	98662	89444	SECO	2588	
INUA1	Inclin.	UNIANDES, 2001	CARB.	98262	89113	2739	2732	
INUA2	Inclin.	UNIANDES, 2001	CARB.	98146	89166	2745	2737	
PUA-1	Piezom	UNIANDES, 2001	CARB.	98137	89207	2735	2731	Para estos hubo monitoreo
IGR-P01	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98198	89265	SECO	2704	
IGR-P02	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98141	89119	2748	2724	
IGR-PO3	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	97944	89100	2781	2774	
IGR-PO4	Perf.	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98497	88667	SECO	2744	
IGR-SEV01	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	97875	89020	2777	----	CORRESPONDEN A SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES (Se tuvieron en cuenta solo como valores indicativos, debido a su baja precisión para definir niveles)
IGR-SEV02	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98183	88796	2761	----	
IGR-SEV03	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98456	88603	2739	----	
IGR-SEV04	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98513	88868	2712	----	
IGR-SEV05	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	ESPINO	98712	89291	2597	----	
IGR-SEV06	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98209	89331	2666	----	
IGR-SEV07	SEV	INGENIER. Y GEORIESGOS, 2004	CARB.	98416	89587	2608	----	

Comparados estos últimos registros de niveles con algunos registros de lluvias de la época (ver **Figura 6.4**), también por Ingeominas(2003), pareciera haber una relación directa y relativamente rápida entre los periodos de

mayor precipitación (meses lluviosos) y las menores profundidades de los niveles y viceversa, es decir el nivel en este acuífero ascendería con el aumento de la infiltración y descendería con su disminución. Sin embargo lo anterior no es concluyente, pues como se observa los datos son muy escasos.

La anterior descripción junto con los la litología de los pozos 3, 6,7, y 9, parece mostrar en general un acuífero libre de unos 20 a 26 m de espesor, formado casi exclusivamente por areniscas, el cual en su base tiene al menos unos 17 m de espesor de arcillolitas con algunas intercalaciones de carbón(Pozo 9 = INC-5). Este acuífero en épocas de alta infiltración estaría saturado en los últimos 7 metros en su base (entre 18.8 y 26 m de profundidad aproximadamente) y luego se vaciaría en épocas de escasa infiltración. Debajo de él no se puede afirmar que tipo de acuífero hay (es decir a mas de 37 m de profundidad), pues la información de las perforaciones allí no existe. Se puede prever sin embargo que haya acuíferos confinados o semiconfinados. Esto por supuesto sería válido para la parte ubicada al occidente de la falla El Espino W.

El nivel piezométrico trazado en los cortes mencionados para este sector del Espino, es puramente interpretativo, con base en la información anteriormente descrita y en las escasas mediciones disponibles. Por esta razón se trazan interrogados.

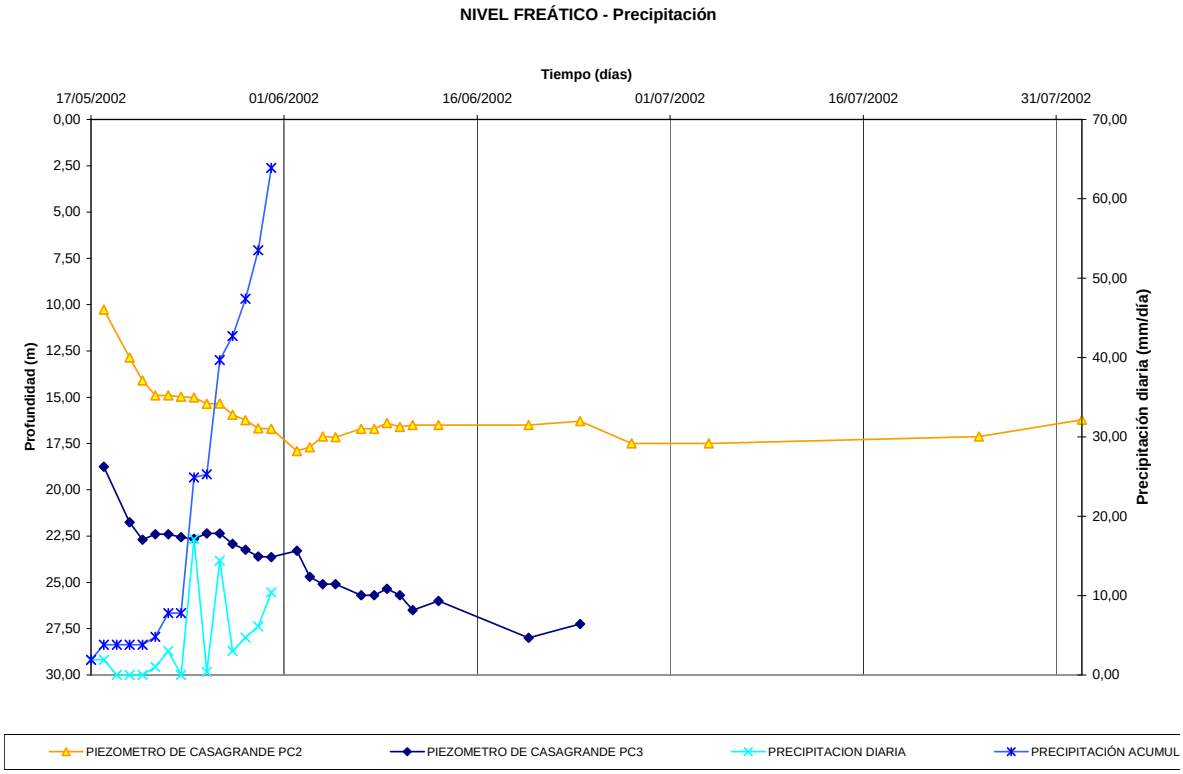


Figura 6-4. Comparación de algunas mediciones para establecer la relación entre niveles piezométricos y lluvias. Tomada de Ingeominas (2003).

Acuíferos Colgados. Como ya se mencionó, para el sector El Espino se propone que la franja de alta humedad ubicada inmediatamente al Occidente de la cabeza del deslizamiento, se relaciona con la presencia de acuíferos colgados, de extensión limitada y escaso espesor (1 a 2 m), interconectados entre si y estrechamente dependientes de la infiltración producida por lluvia y especialmente a partir vertimientos de origen antrópico, provenientes de los barrios aledaños.

Niveles Piezométricos sector de La Carbonera

A diferencia del Espino, aquí si se encuentra información de perforaciones y piezómetros con características mínimas para poder establecer una red de

flujo de agua subterránea, tal que facilite más la interpretación de las condiciones de este elemento respecto a los problemas a resolver en el presente estudio. Dicha red se pudo representar, con base en los datos depurados de la **Tabla 6.2**, para un polígono restringido, ubicado en la parte central del sector La Carbonera, involucrando tanto al deslizamiento como a la parte alta, aún no involucrada en este fenómeno. Los resultados en general muestran que esta red de flujo se relaciona al acuífero principal, con una dirección general de flujo hacia el NE. Para destacar está la presencia de dos zonas de efluencia (aporte de agua desde el acuífero hacia la escorrentía superficial), las cuales coinciden bastante bien con zonas identificadas como de alta humedad en la imagen de satélite tipo infrarrojo **Figura 6.3.**

Para tratar este tema en sector de la Carbonera, se subdivide en dos partes como sigue:

Acuífero Principal: En la parte más alta de este sector de Carbonera, es decir aproximadamente la zona suroccidental del área de estudio, hay solamente información de dos perforaciones y solo una de ellas es relativamente profunda (CAE-P04), y muestra que los niveles piezométricos están por debajo de los 30 m de profundidad (Ver corte CC', **Figura 6.4**), esto parece ser confirmado por los datos de los Sondeos eléctricos verticales (IGR-SEV01 y SEV02). Significa que tanto el depósito fluvio-glaciar como la roca (Formación Guaduas) que le subyace, están secos al menos hasta esa profundidad. En otras palabras los acuíferos principales existentes en esta zona, de acuerdo con la información geológica, estarían dentro del llamado Segmento 1 de la Formación Guaduas, serían acuíferos multicapa, probablemente de tipo confinado a semiconfinado y se espera

que estén a profundidades mayores a los 30 m., en esta zona alta, sin mayor precisión por la escasa información disponible.

No obstante, avanzando en dirección E, a la altura de la perforación IGR-P02, que tiene una profundidad considerable (aproximadamente 37m), se encuentra ya este nivel piezométrico principal a unos 13 m de profundidad y desde allí siguiendo en la misma dirección, los datos de piezómetros y perforaciones existentes, permitieron construir una red de flujo parcial, localizada dentro de la zona del deslizamiento activo, la que muestra a este nivel oscilando en su posición entre 8 y 12 m de profundidad, hasta inmediaciones de la perforación IGR-P01, donde se profundiza más de 14 m , sin poderse precisar más su posición. Al avanzar a partir de allí unos 65m mas hacia el Este se encuentra este nivel a solo 2 m de la superficie(nivel medido en la Perforación P6), y prácticamente a partir de allí hacia el Este el nivel piezométrico se encuentra muy cerca de la superficie y aflora generando muy alta humedad en el terreno en la parte baja del deslizamiento, como se ve en la imagen de infrarrojo (Figura 6.3) y también escorrentía superficial en áreas relativamente amplias, incluyendo varias cañadas, hasta formar unas tres lagunas pequeñas en la "pata" del deslizamiento.

Por otro lado, en el Corte AA' cerca de su límite SW, se observa este nivel piezométrico del acuífero principal a unos 4.5m de profundidad (Piezómetro CAE-P1); desde allí, en dirección SW y hasta el límite del corte, ese nivel se proyecta mas profundo, pero no hay información para precisar que tanto, lo anterior se afirma solamente con base en la tonalidad azulosa que tiene la imagen de infrarrojo para este sector. Luego desde el piezómetro mencionado hacia el NE, este nivel sube progresivamente hasta alcanzar la superficie del terreno aproximadamente en la cota 2768m.s.n.m., lo cual

coincide también con la tonalidad rojiza intensa de la imagen satelital infrarrojo para esa zona. Entonces este nivel de agua subterránea se torna efluente hacia la escorrentía superficial, desde esa altura y hasta aproximadamente los 2720m.s.n.m., a lo largo de un par de cañadas paralelas, en otras palabras, para esta zona el terreno se encuentra completamente saturado de agua bastante más arriba de la cabeza del deslizamiento actual. Luego, siguiendo en la misma dirección NE, con algunas interrupciones donde se profundiza ligeramente (menos de 2m), dicho nivel piezométrico, del acuífero principal, vuelve a tornarse efluente hacia la parte media y en la "pata" del deslizamiento, desde aproximadamente los 2704m.s.n.m. y hasta los 2672m.s.nm.

Desde la perforación CAE-P2, siguiendo la dirección del corte hacia el NE y hasta su extremo, no se tiene ninguna información proveniente de mediciones directas en el subsuelo. Sin embargo, en términos generales se interpreta que dicho nivel se mantiene muy cercano a superficie (a menos de 2m) y en ocasiones aflora contribuyendo como efluente hacia las cañadas existentes y también hacia las pequeñas lagunas que se forman en la base del deslizamiento.

Acuífero(s) Colgados: Teniendo en cuenta lo ya descrito en el aparte inmediatamente anterior, relacionado con el nivel piezométrico del acuífero principal para la zona de influencia de este mismo corte, debe recordarse que los datos de nivel obtenidos por las perforaciones profundas CAE-P4, IGR-P02 e IGR-P01, muestran que en la mitad occidental de este corte, aquel nivel piezométrico se halla oscilando entre los 13m y algo mas de los 32m de profundidad bajo la superficie del terreno. Sin embargo, a partir de la observación detallada de la imagen satelital de la banda infrarrojo (**Figura 6.3**), es evidente que existe humedad considerable

en la capa mas superior del terreno(aparecen tonos rojos intensos) al avanzar en dirección oriental a partir de la perforación CAE-P4, mas exactamente alrededor de 60m al oriente de aquella. Esta zona se encuentra en el último grupo de casas del sector denominado Santo Domingo (Rosales), en la parte alta de la cabeza del deslizamiento, y se puede seguir con claridad hasta la grieta mayor que forma la corona de este deslizamiento, desde allí hacia el oriente, solo continúa tal presencia de humedad somera en alrededores a las cañadas que drenan la pendiente y de la Quebrada Rosales. Es muy posible que su desaparición de cercanía a la superficie esté relacionada a su profundización o infiltración siguiendo el camino de tal grieta principal hacia mayor profundidad. De todas maneras se deja constancia que es puramente interpretativa la profundidad localizada en el corte, por eso esta puesta con interrogaciones, pues no hay mediciones directas que lo soporten. En tal caso este nivel piezométrico estaría relacionado a un acuífero colgado, de relativo escaso espesor y relacionado a las unidades geológicas superficiales denominadas Depósitos Fluvio-Glaciares(Qfg) y Depósitos del Deslizamiento La Carbonera (Qdz1).

6.3. CÁLCULOS DE FLUJOS EN LOS ACUÍFEROS

6.3.1. Sector de El Espino

Con base en la Ley de Darcy, se hicieron aproximaciones a los posibles flujos diarios totales (Q) para secciones transversales cuadradas (1m x 1m) de acuífero y para cada uno de los acuíferos identificados. Para esto se utilizó la formulación:

$$Q = Kbw(\Delta h / \Delta x) \qquad (1)$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica (m/día)

b = Espesor del acuífero (1 m)

w = Ancho del acuífero (1m)

$(\Delta h/\Delta x)$ = Gradiente hidráulico

Este cálculo unitario facilita cualquier aproximación a los flujos totales posibles, dependiendo de la localización dentro del acuífero, donde se quiera calcular este valor para efectos prácticos.

Acuífero Principal: Se aplica este cálculo a la parte alta del acuífero (al occidente de la zona de deslizamiento) por ser allí de mayor interés en las posibles obras de estabilización. El valor de conductividad hidráulica se tomó como 1 m/día, a partir de la **Tabla 6.3**, que a su vez se extractó de varios estudios anteriores hechos en rocas del área de estudio. El valor del gradiente hidráulico se obtuvo de los cortes FF' y GG' y por tanto se trata de una especulación como ya se explicó. Reemplazando estos valores en la ecuación (1) se obtuvo:

Q = 0,212 m3/día

Acuífero Colgado: También aquí se aplica el cálculo a la parte de este acuífero ubicada al occidente de la cabecera del deslizamiento.

Tabla 6-3. Datos sobre mediciones de permeabilidad (K) para el área de trabajo.

Sitio Medida/Identificación	Litología	K(m/día)	Tipo de Ensayo
Pozo 1-Ingeominas	Arcillolita gris clara	4,40E-05	Consolidación
Pozo 2-Ingeominas	Arcillolita gris clara	5,70E-05	Consolidación
Pozo 3-Ingeominas	Arcillolita gris parda	3,80E-05	Consolidación
Pozo 4-Ingeominas	Arcillolita gris clara	5,60E-05	Consolidación
Pozo 5-Ingeominas	Arcillolita gris clara	6,70E-05	Consolidación
Pozo 6-Ingeominas	Arcillolita gris	6,60E-05	Consolidación
Pozo 7-Ingeominas	Arcillolita gris oscuro	9,60E-05	Consolidación
Pozo 8-Ingeominas	Arcillolita gris	8,30E-05	Consolidación
Pozo 8-Ingeominas	Arcillolita gris	5,40E-05	Consolidación
Pozo 10-Ingeominas	Arcillolita gris	1,20E-04	Consolidación
Pozo 10-Ingeominas	Arcillolita gris	4,20E-05	Consolidación
Pozo 11-Ingeominas	Arcillolita Negra	4,90E-05	Consolidación
Pozo 11-Ingeominas	Arcillolita gris físil	6,00E-05	Consolidación
Pozo 11-Ingeominas	Carbón	5,40E-05	Consolidación
Pozo profundo PAVCO	Areniscas	1,00E+00	Prueba de Bombeo a caudal constante
Pozo profundo INDEGA	Areniscas	2,00E+00	Prueba de Bombeo a caudal constante
Pozo profundo APOGEO	Areniscas	1,00E+00	Prueba de Bombeo a caudal constante

Información de Pozos Ingeominas tomada de INGENIERIA Y GEORIESGOS(2004)
Información de Pozos Profundos tomada de INGEOMINAS - EEAB(1988)

La conductividad hidráulica se asume con un valor de 3 m/día, a partir de la comparación entre la litología de los depósitos inconsolidados allí existentes según la interpretación geológica (Ingeniería y Georiesgos, 2004) y por otro lado tablas de c. hidráulica comparativa (Brassington, 1988, p.57). Los valores de las cabezas hidráulicas y distancia entre ellas para obtener el gradiente hidráulico, igualmente se tomaron del esquema elaborado en los cortes GG' y FF'. Al reemplazar estos valores en al ecuación (1) dieron:

$$Q = 0{,}635 \text{ m3/día}$$

6.3.2. Sector de La Carbonera

Siguiendo la misma metodología de cálculo, también aquí se subdividió por acuíferos para hacer los cálculos.

Acuífero Principal: Se le hicieron cálculos tanto para la parte alta del acuífero (al occidente y fuera de la zona deslizada), como para la zona

baja involucrada en el deslizamiento. En ambos casos la conductividad hidráulica se tomó con valor de 1 m/día, por tratarse de las mismas areniscas de la Formación Guaduas que se midieron en pruebas de bombeo (**Tabla 6.3**). Para los valores del gradiente hidráulico en cada zona se utilizó la red de flujo generada para este sector.

Con los valores anteriores reemplazados en la ecuación (1) se obtuvieron resultados así:

Zona Alta Q =0,361 m3/día

Zona Baja Q =0,450 m3/día

Acuífero Colgado: Este se trata para la zona alta de influencia del corte CC' (al occidente y arriba del deslizamiento), que es al parecer donde se encuentra este tipo de acuífero para este sector La Carbonera. La conductividad hidráulica se asume con un valor de 0,05 m/día, a partir de la comparación entre la litología de los depósitos fluvio-glaciares allí existentes, según la interpretación geológica (Ingeniería y Georiesgos, 2004) y por otro lado tablas de conductividad hidráulica comparativa (Brassington, 1988, p.57). Los valores de las cabezas hidráulicas y distancia entre ellas para obtener el gradiente hidráulico, igualmente se tomaron del esquema elaborado en el corte CC'. Al reemplazar estos valores en al ecuación

(1) dieron:

Q = 0,012 m3/día

6.4. ESQUEMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

A escala del área de estudio y teniendo en cuenta lo anteriormente deducido como elementos básicos del modelo conceptual, se puede sintetizar que la recarga sucede en la inmensa mayoría del área a partir de la infiltración de la lluvia, y esto sucede solamente en 3 o 4 meses del año de acuerdo con los análisis hidroclimatológicos de Ingeominas(2003) y los del capitulo de hidrología del presente estudio. Dicha recarga potencial se hace efectiva en mayor o menor proporción, pues en algunas zonas muy localizadas hay cubiertas superficiales de sedimentos de muy baja permeabilidad. Adicionalmente, como se ha mencionado atrás, hay recarga en la zona ubicada bajo los barrios actualmente habitados en la parte alta de los deslizamientos, como consecuencia de la rotura de las conexiones del acueducto y alcantarillado y también por algunas viviendas no conectadas al sistema, que vierten directamente en superficie. Esta fuente de recarga de origen antrópico es especialmente crítica en el límite superior de la cabeza de los deslizamientos, donde la grietas y fracturas mayores de este fenómeno permiten un conducto hacia mayores profundidades dentro del deslizamiento, contribuyendo así a su desestabilización continua, pues tal aporte de agua es de la misma proporción durante el año hidrológico.

Esa recarga entra inicialmente hacia los acuíferos colgados formados por material no consolidado, que están conectados directamente con la superficie y se extienden casi por toda el área; de allí continúa por un lado la infiltración profunda (hacia los acuíferos principales subyacentes) y por otro la efluencia hacia las quebradas y cañadas adyacentes. Los acuíferos principales, que se relacionan principalmente con las areniscas de la Formación Guaduas, reciben la recarga indirectamente a través del

mecanismo descrito anteriormente y en algunas áreas específicas donde afloran en superficie de manera directa. El agua que circula por los acuíferos colgados se infiltra hacia mayor profundidad también en las zonas de fractura de las cabeceras de los deslizamientos, especialmente en el sector del Espino, por el carácter consolidado de las rocas allí involucradas

Una vez recargados los acuíferos el agua transita pendiente abajo siguiendo una dirección preferencial NE, como se previó a partir de la información geológica básica y luego se comprobó con la elaboración de una red de flujo.

Finalmente se determinaron zonas de descarga del agua subterránea hacia la parte media y baja de las zonas deslizadas, que en ambos casos son afloramientos de los niveles piezométricos, manifiestos en superficie por zonas muy húmedas y la presencia de lagunas pequeñas. Estos niveles altos se explican en el caso de El Espino por la presencia de una barrera impermeable en profundidad y en el caso de La Carbonera al parecer solamente por una alta cabeza hidráulica.

6.5. NIVELES PIEZOMÉTRICOS NORMALES Y MÁXIMOS

Para definir pautas para estos parámetros dentro del área de estudio es necesario primero que todo tener presente el tipo de confiabilidad de los datos disponibles. Para empezar, información sobre estos niveles aunque es relativamente abundante, está desordenada y dispersa. En general en todos los piezómetros y perforaciones que han sido construidos en los diferentes estudios previos, la toma de información de niveles de agua subterránea no ha sido dirigida metódicamente a investigar

detalladamente los niveles piezométricos y su relación con el problema. Ha sido mas bien información tomada como accesoria en diferentes épocas, puntualmente y a lo largo de varios años; lo anterior hablando a escala de la totalidad del área afectada. Dichos datos de niveles fueron tomados puntualmente y no en campañas generalizadas, en muy diversas épocas (de lluvia y de sequía) y durante al menos un lapso de 8 años, partiendo de 1999. Lo anterior porque se han hecho estudios progresivos y con alcances limitados que han ido construyendo la instrumentación y haciendo las mediciones de la misma manera. A esto se suma que la dinámica del mismo movimiento ha echado a perder la mayoría de los sitios de medición hechos dentro de su zona de influencia y por tanto ya no existen y no se pueden volver a medir (ver Figura 6.7). Al respecto durante el presente estudio se intentó identificar, localizar y medir varios piezómetros e inclinómetros, adicionalmente a las perforaciones hechas en este mismo estudio. Se obtuvieron resultados exiguos.

Por otro lado y partiendo de la revisión bibliográfica que se hizo para los estudios del área, no se encontraron cálculos confiables de los valores de recarga, pero tampoco se han podido establecer relaciones claras lluvia-recarga ni en formar general y menos para acuíferos específicos, ya que esta relación varía dependiendo de las características de cada acuífero. En el estudio de Ingeominas (2003) hubo un intento al respecto pero allí mismo se reconoce la carencia de confiabilidad, especialmente por falta de una toma de datos mas prolongada.

En conclusión, la información recolectada y procesada para obtener una idea de los valores de niveles piezométricos, debido a su particular heterogeneidad en la toma de datos debe tomarse solamente como valores indicativos o mejor como una aproximación primera, que

eventualmente podría considerarse como los "niveles normales" ante la falta de información mas confiable. Partiendo de esto y sin ninguna otra información de apoyo para hacer proyecciones, casi cualquier posibilidad es válida, por lo cual en este trabajo no se hacen más especulaciones.



Figura 6-5. El piezómetro PZ-4 fue localizado durante la campaña de campo, sin embargo igual que muchos puntos de medición en las áreas afectadas por deslizamiento, se encuentra destruido y sin posibilidades de uso.

7. HIDROLOGÍA Y DRENAJES SUPERFICIALES

7.1. ANTECEDENTES

Se presenta a continuación una recopilación de los estudios más importantes que se han adelantado, en los que se ha tenido en cuenta los aspectos hidrológicos e hidráulicos en la zona.

Consorcio Civiles Ltda., e Hidroconsulta Ltda. (1999)

En este estudio se estiman los caudales de escorrentía directa para diferentes periodos de retorno, empleando la metodología de Ven Te Chow para la zona de estudio. Para el caso de la quebrada Santa Rita, para un periodo de retorno de 5 años, el caudal es de 0.59 m3/s, en tanto que para un periodo de retorno de 100 años, éste es de 2.22 m3/s (ver Tabla 7.1). Estos caudales se estiman con el fin de proponer alternativas que permitan controlar y/o manejar las aguas provenientes de la parte alta y controlar su ingreso a la zona de estudio.

Tabla 7-1. Caudales para diferentes periodos de retorno en la quebrada Santa Rita (Civiles, 1999)

Período de Retorno, Tr (años)	2.33	5	10	25	50	100
Caudal Q(m^3/s)	0.40	0.59	0.83	1.27	1.70	2.22

Como obras, se propone la construcción de una cuneta con un filtro interceptor localizada en la parte alta del deslizamiento, y cuya funcionalidad es conducir las aguas de la parte alta hacia la quebrada

Santo Domingo. Esta cuneta, presenta de acuerdo con este diseño, una pendiente promedio de 3.0%, junto con caídas de 1 m para ajustarse a la topografía del terreno. También, se propone la construcción de una alcantarilla de cajón para mejorar las condiciones hidráulicas de la quebrada Santa Rita, así mismo como la construcción de diques transversales en el cauce. Se propone establecer una zona de manejo y protección ambiental (ZMPA).

"Informe hidrológico preliminar barrios el espino y cerro el diamante", realizado por INGEOMINAS, (2002).

En este informe se analiza la incidencia del agua de escorrentía sobre el movimiento del deslizamiento en el barrio El Espino, abordándolo desde el punto de vista climatológico. Aquí, se estiman volúmenes de escorrentía susceptible a infiltrarse junto con las posibles contribuciones de aguas subterráneas en algunos puntos debidos al colapso de las redes de alcantarillado en la zona de estudio.

Para este estudio se analizan los datos de precipitación de 10 estaciones de medición, incluyendo los datos de la estación de la DPAE, Sierra Morena. En este estudio se realiza un balance hidrológico, que finalmente permite la estimación de los posibles caudales de infiltración en la zona. En este informe, se estimó para la estación pluviográfica Casablanca, que la precipitación promedio es de 587 mm, que junto con una evapotranspiración real de 490 mm, generan un caudal de escorrentía promedio anual en el sector del barrio El Espino igual a 83 mm.

En cuanto a los caudales potenciales a infiltrarse por efectos del colapso de las redes de alcantarillado, este se estima a partir de los datos de la

población asentada en cercanías al deslizamiento, considerando finalmente que el aporte del alcantarillado de aguas servidas y pluviales es aproximadamente de 31 litros por segundo. Finalmente, se trata de analizar la relación entre el movimiento del deslizamiento y la ocurrencia de lluvias, situación que queda clara en el informe, no fue posible, por la falta de información tanto de lluvias como de movimientos monitoreados.

Estudio "Monitoreo y seguimiento a los deslizamientos activos que afectan el sector altos de la estancia de la localidad de Ciudad Bolívar, en la ciudad de Bogotá D.C." realizado por la firma consultora Geotecnia y Cimentaciones, (2004).

Este estudio se enfoca principalmente en la observación y seguimiento de deslizamientos en un cierto sector de Ciudad Bolívar en Bogotá, que incluye el barrio El Espino, al igual que los análisis geológicos y geotécnicos de dicho monitoreo. No existe en el informe ningún análisis hidrológico e hidráulico, lo que muestra que el objetivo de dicho estudio, es principalmente el análisis de los datos levantados en campo y relacionados con el movimiento del deslizamiento.

"Estudio de riesgo y medidas de mitigación en el sector altos de la estancia de la localidad de ciudad bolívar en la ciudad de Bogotá, D. C.", realizado por la firma consultora Edgar Eduardo Rodríguez Granados - Ingeniería y Georiesgos, (2004).

Principalmente, en lo relacionado con la parte hidrológica e hidráulica, el estudio se enfoca en la obtención de caudales generados por aguas lluvias y aguas servidas, empleando la información suministrada por el Acueducto de Bogotá (curvas IDF de la zona de estudio). Es de anotar, que el caudal

de aguas servidas fue estimado de forma indirecta a partir de los datos de población en la zona. Los caudales de aguas lluvias fueron obtenidos para un período de retorno de 25 años para las dos fases de ejecución del proyecto (dichos caudales se presentan en la Tabla 7.2).

En el estudio también se plantean un análisis del estado actual de las redes de drenaje y de agua potable como posible causa del movimiento de dicho deslizamiento.

Tabla 7-2. Caudales de aguas servidas y lluvias generados en las fases II y III (Ingeniería y Georiesgos, 2004)

ZONA		Fase II		Fase III	
		AGUAS SERVIDAS Q (l/s)	AGUAS LLUVIAS Q (l/s)	AGUAS SERVIDAS Q (l/s)	AGUAS LLUVIAS Q (l/s)
Q. CARBONERA	A_{II}	1,44	550	1.04	304
	B_{II}	0,86	290	1.11	359
	C_{II}	0,94	315	0.26	88
Q. ROSALES	R_{AII}	1,37	540	3.18	1540
	R_{BII}	0,94	370	1.46	572
Q. SANTA RITA	SR_{AII}	1,91	680	2.54	868

7.2. INFORMACIÓN EMPLEADA

Para estudiar el comportamiento hidrológico de la zona del deslizamiento, se recopiló la información hidroclimatológica correspondiente a los datos de lluvia y temperatura a nivel diario.

En cuanto a los datos de lluvia, estos se obtuvieron de dos estaciones Pluviográficas operadas por el Acueducto de Bogotá y por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - DPAE. Aunque alrededor de la zona de estudio, se localizan varias estaciones de medición de lluvias a nivel diario, se optó por trabajar con las estaciones Casablanca del Acueducto de Bogotá, y Sierra Morena de la DPAE, debido a que son las más cercanas a la zona del deslizamiento.

Tabla 7-3. Datos generales de las estaciones pluviográficas

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	LONG.	LAT.	ELEV.
2120606	PG	Casablanca	Tunjuelo	BOGOTÁ D.C.	4 35	74 10	2665
2120630	PG	Sierra Morena	Tunjuelo	BOGOTÁ D.C.			

De la estación pluvigráfica Casablanca localizada a 2665 m.s.n.m., e instalada en mayo de 1976, se contó con los registros diarios desde el año 1987. Ésta se localiza al sur oriente de la zona de estudio y presenta un valor promedio anual de precipitación de 591 mm.

La estación Sierra Morena, cuyo valor promedio anual de lluvia es de 550 mm, presenta datos de lluvias desde el año 2000, fecha en la que fue instalada por la DPAE, y cuenta con registros a nivel horario.

Con respecto a los datos de Temperatura, se recopiló la información de la estación climatológica ordinaria, Vitelma de propiedad de la Empresa de Acueducto de Bogotá, estación localizada en la planta de tratamiento que lleva el mismo nombre, y relativamente, la estación más cercana a la zona de estudio en la cual se mide este parámetro.

Tabla 7-4. Datos generales de la estación climatológica ordinaria Vitelma

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	LONG.	LAT.	ELEV.
2120524	CO	Vitelma	San Cristóbal	BOGOTÁ D.C.	4 57	74 07	2800

7.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

A continuación se exponen los aspectos hidrológicos evaluados para la estimación de los caudales de diseño de acuerdo con la información recopilada, los análisis de la precipitación en la zona de influencia del proyecto, las características hidrológicas de las cuencas identificadas y la correspondiente estimación de los caudales de diseño.

7.3.1. Análisis de los datos de lluvia

Como se muestra en la **Figura 7.1**, el régimen de precipitación alrededor de la zona de estudio, es bimodal. En la estación El Sierra Morena, al igual que en la estación Casablanca, los valores altos se presentan entre los meses de marzo, abril, mayo y junio, como el primer periodo de lluvias en el año, y octubre y noviembre como el segundo periodo lluvioso del año. El valor promedio más alto se presenta en el mes de octubre para la estación Sierra Morena (88 mm), en tanto que para la estación Casablanca, éste se presenta en el mes de mayo (81 mm).

Los valores más bajos se presentan para las dos estaciones entre los meses de diciembre a febrero y julio a septiembre, siendo los promedios mínimos de 20 mm y 23 mm para las estaciones Sierra Morena y Casablanca respectivamente (Ver Tabla 7.5).

Tabla 7-5. Precipitación media mensual multianual

Estación	Precipitación (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Sierra Morena	19.60	20.54	36.97	83.56	74.29	52.06	30.23	22.41	32.37	87.96	53.21	37.23
Casablanca	23.46	28.19	52.81	78.53	80.61	51.27	39.39	32.40	47.35	73.93	64.23	35.19
Promedio	21.53	24.37	44.89	81.05	77.45	51.66	34.81	27.41	39.86	80.94	58.72	36.21

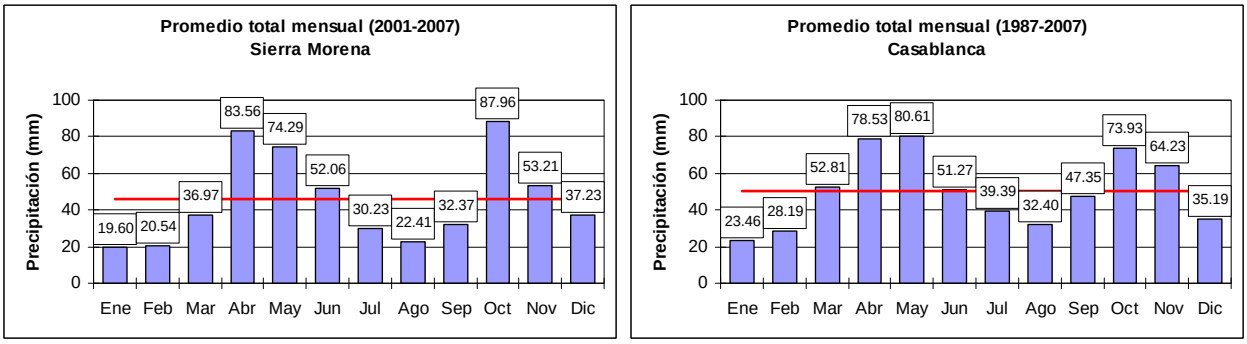


Figura 7-1. Precipitación media mensual multianual

Estos valores denotan que la precipitación en la zona de estudio es relativamente baja, con valores promedio anual de 550 y 591 mm para Sierra Morena y Casablanca respectivamente.

De forma comparativa (**Figura 7.2**), se puede apreciar que las diferencias entre los datos de las dos estaciones son mínimas, aún siendo los periodos de registro diferentes (en la estación Sierra Morena solo se cuenta con 6 años de registro, en tanto que en la estación Casablanca, se cuenta con 20 años de registro).

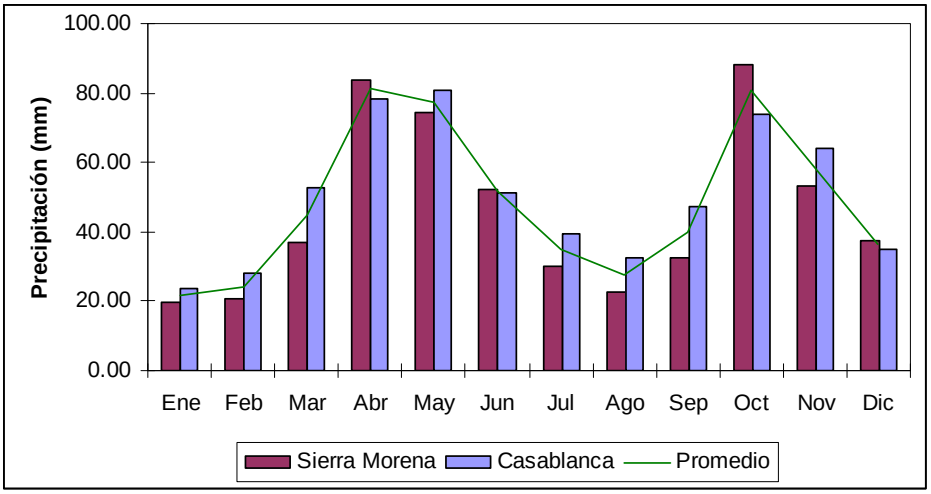


Figura 7-2. Comparación precipitación media mensual multianual

7.3.2. Curva intensidad duración frecuencia (IDF)

La Empresa de Acueducto de Bogotá, en el año 1995 contrató a la firma consultora Ingeniería y Recursos Hídricos Ltda. – IRH para realizar el "Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en La Sabana de Bogotá" en el cual se construyeron curvas IDF características para cada sector de la ciudad. Dicho estudio, fue actualizado por INGETEC S.A., en el año 2006.

Dado que para el diseño de las estructuras de drenaje en la zona de análisis, se requiere de una curva IDF, se empleará para tal fin las curvas generadas en el estudio anteriormente mencionado, tomando la IDF de la estación Casablanca que es la más cercana al deslizamiento del barrio El Espino. Dicha curva IDF se muestra en la **Figura 7.3.** y en la **Tabla 7.6**. Esta curva IDF será empleada para estimar intensidad de lluvia para un determinado periodo de retorno, de acuerdo con los requerimientos de diseño de las estructuras.

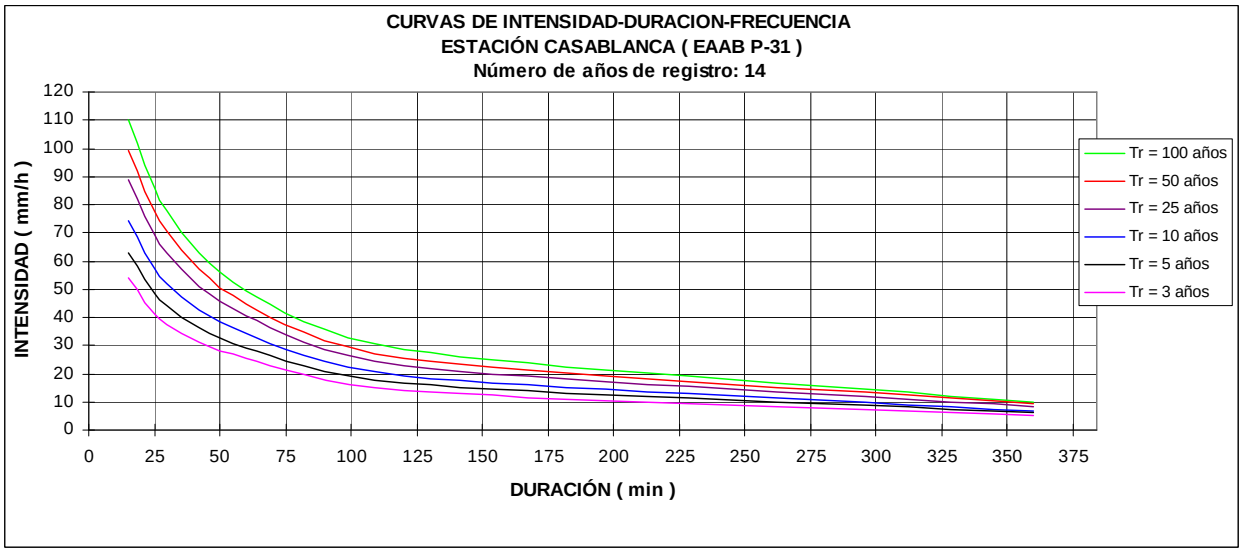


Figura 7-3. Curva IDF estación Casablanca

Tabla 7-6. Datos curva IDF estación Casablanca

Tiempo (minutos)	Periodo de retorno (años) / Intensidades (mm/h)						
	2.33	3	5	10	25	50	100
15	49.1	54.0	63.1	74.4	88.7	99.4	109.9
30	33.7	37.3	43.9	52.2	62.6	70.4	78.1
60	23.2	25.4	29.3	34.2	40.3	44.9	49.5
120	12.9	14.2	16.5	19.4	23.0	25.7	28.4
360	4.9	5.3	6.0	7.0	8.2	9.1	10.0

7.3.3. Cálculo de caudales de escorrentía directa

Para el cálculo de caudales en las diferentes quebradas, la duración de la tormenta de diseño se adoptó igual al tiempo de concentración de la cuenca con el fin de obtener el mayor caudal que se pudiese producir, por lo tanto se estimará la intensidad de lluvia en cada cuenca, como la correspondiente a una duración igual al tiempo de concentración obtenido con base en la curva IDF presentada anteriormente.

7.3.4. Características de las cuencas de las quebradas Santa Rita, Santo Domingo y La Carbonera

Las quebradas Santa Rita y La Carbonera, son los cauces que bordean en los costados norte y sur de la zona del deslizamiento, en tanto que la quebrada Santo Domingo atraviesa la zona de estudio, razón por la cual se hace importante tener conocimiento de los caudales que podrían pasar por estos cauces, como producto de una creciente generada por intensos aguaceros. En la **Tabla 7.7** se presentan las características morfométricas más importantes de estas cuencas.

Estas características, serán empleadas para calcular el tiempo de concentración y posteriormente estimar los caudales de creciente en cada una de las cuencas para diferentes periodos de retorno.

Tabla 7-7. Características morfométricas de las cuencas

Quebrada	Área (Km^2)	Perímetro (Km)	Cota Superior (m.s.n.m)	Cota Inferior (m.s.n.m)	Longitud cauce Ppal. (Km)	Pendiente (m/m)
Santa Rita	0.45	3.27	2804	2573	1.13	20.39
Santo Domingo	0.40	2.97	2814	2601	1.13	18.83
La Carbonera	0.16	2.43	2806	2600	0.90	22.89

7.3.5. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de las cuencas se estimó a partir de las características hidrológicas de las mismas, mediante la ecuación de Kirpich, la cual se escribe a continuación:

$$T_c = 0.066 \frac{L^{1.155}}{H^{0.385}}$$



Donde:

Tc	*tiempo de concentración en horas*
L	*longitud del cauce principal en Km*
H	*desnivel total del cauce principal en Km*

Se adoptó que el tiempo de concentración mínimo es de 15 minutos, dado el caso, el establecido con las características de la cuenca fuese inferior a este valor. En la Tabla 7.8 se presentan los tiempos de concentración de las quebradas Santa Rita, Santo Domingo y La Carbonera.

Tabla 7-8. Tiempos de concentración de las cuencas

Quebrada	Tiempo de concentración (minutos)
Santa Rita	8.04
Santo Domingo	8.28
La Carbonera	6.44

Como se puede apreciar, los tiempos de concentración en cada una de las cuencas, es relativamente bajo, por tal razón, para efectos de cálculo de caudal, se asumirá que el tiempo de concentración es de 15 minutos, como se mencionó anteriormente.

7.3.6. Estimación de caudales máximos

Los caudales máximos se calcularon considerando el período de retorno establecido dependiendo del tipo de estructura, su costo y su importancia relativa respecto al tamaño de la cuenca (y por lo tanto asociado a la magnitud de los daños en caso de fallar la capacidad hidráulica de la obra). Los periodos de retorno utilizados dependieron en gran medida del

tipo de obra utilizada. Valores típicos del periodo de retorno, se ilustran en la **Tabla 7.9**.

Tabla 7.9 Periodos de retorno para obras de drenaje (Chow, V., T., 1994)

Tipo de obra	Período de retorno en años
Canales	25 - 50
Alcantarillas	10
Cunetas	3

Los caudales máximos generados en las cuencas analizadas en este estudio, se pueden estimar utilizando el método del hidrograma unitario triangular, recomendado por el U.S. Bureau of Reclamation de los EEUU , cuyos parámetros básicos son los siguientes:

$$Qp = 0.208\ A\ Pe\ /\ Tp$$

$$Tp = D/2 + 0.6\ Tc$$

$$Tb = 2.67\ Tp$$

Donde:

Qp caudal pico en m3/s

A área de la cuenca en km2

Pe precipitación efectiva en mm

Tp tiempo al pico en horas

D duración de la lluvia efectiva en horas

Tc tiempo de concentración en horas

Tb tiempo base en horas

La precipitación efectiva (Pe) se esti[1]ma utilizando el método del Soil Conservation Service de los EEUU2, el cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{N} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20320}{N} - 203.2}$$

Donde:

Pe precipitación efectiva en mm

P precipitación de tormenta de diseño en mm

N número de curva, correspondiente al complejo hidrológico suelo – vegetación

Dado que el número del complejo hidrológico depende del tipo de suelo, de la cobertura vegetal, del uso del suelo y de la condición de humedad antecedente de la cuenca, se asumió una condición de humedad antecedente II (promedio), con un número de curva igual a 85 para ambas cuencas, dado que existe una alta intervención en cuanto a construcciones con algunas zonas permeables como se ilustra en el **Plano 8**.

Si se supone que la duración efectiva de la tormenta es de 1 hora, con un tiempo de concentración igual a 15 minutos para las cuencas, el tiempo al pico y el tiempo base, serán:

$$Tp = D/2 + 0.6\ Tc$$

Si D =1 hora, Tp = 0.65 horas

$$Tb = 2.67\ Tp$$

$$Tb = 1.74 \text{ horas}$$

[1] BUREAU OF RECLAMATION, U.S. "DISEÑO DE PRESAS PEQUEÑAS". CAP. 2

De igual forma, con 1 hora de duración de tormenta, las intensidades se pueden obtener del Tabla 7.10 que corresponde a los datos de la curva IDF.

Tabla 7-9. Caudales estimados para las quebradas Santa Rita, Santo Domingo y La Carbonera

Periodo de retorno	Intensidad (mm/h)	Precipitación total (mm)	CN	Precipitación efectiva (mm)	Caudal pico(m^3/s)		
					Santa Rita	Santo Domingo	La Carbonera
2.33	23.2	23.2	85	3.43	0.50	0.44	0.17
3	25.4	25.4	85	4.41	0.64	0.57	0.22
5	29.3	29.3	85	6.35	0.92	0.81	0.32
10	34.2	34.2	85	9.09	1.31	1.17	0.45
25	40.3	40.3	85	12.89	1.86	1.65	0.64
50	44.9	44.9	85	15.99	2.31	2.05	0.80
100	49.5	49.5	85	19.25	2.78	2.47	0.96

En términos generales, los caudales en la quebrada Santa Rita, van desde 0.48 a 2.68 m3/s, en tanto que para la quebrada Santo Domingo, los caudales pico, van desde 0.58 a 3.27 m3/s. Para la quebrada La Carbonera, los caudales van desde 0.17 a 0.96 m3/s. La **Figura 7.4** muestra los caudales en función del periodo de retorno.

7.3.7. Balance hídrico

En esta sección se estima un balance hídrico para la zona de estudio, con el fin de tener un estimativo del caudal promedio que se infiltra en la zona, una vez se produzca un aguacero en la cuenca.

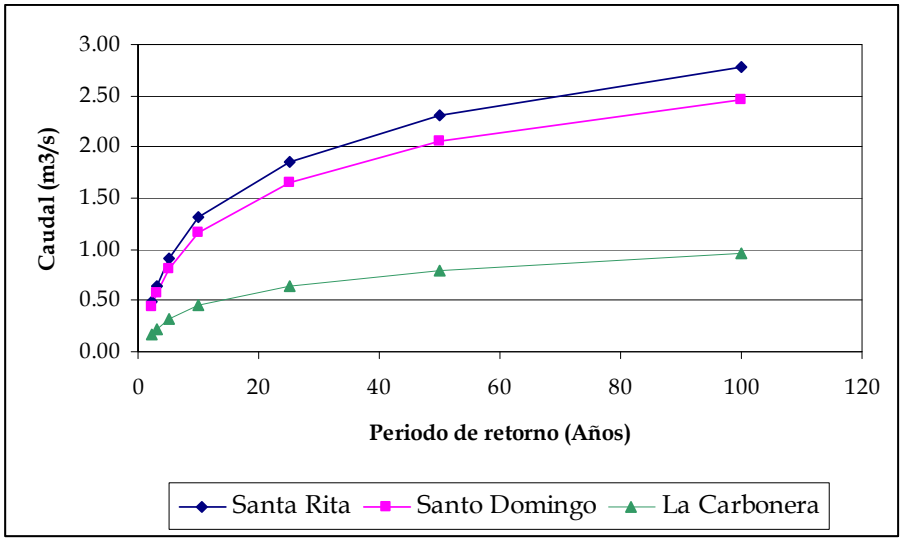


Figura 7.4 Caudales para diferentes periodos de retorno

El balance de masa para las cuencas se puede expresar como:

$$P = VS - ETP + S \pm FSB$$

Donde:

P Es el volumen de entrada por precipitación en la cuenca

VS El volumen superficial que considera el caudal de entrada y de salida a la cuenca

ETP Evapotranspiración real

S Almacenamiento

FSB Flujo de agua subterránea

Resulta importante destacar que para un periodo de análisis anual, se asume que el almacenamiento en las cuencas, es nulo, por tanto el término S se hace igual a cero.

De acuerdo con lo anterior, y además, si el volumen total de entrada y/o salida (VT) es igual a la suma del volumen de agua superficial y el volumen subsuperficial, VT = VS ± FSB, se tiene:

$$P = VT - ETP$$

O lo que es lo mismo:

$$VT = P - ETP$$

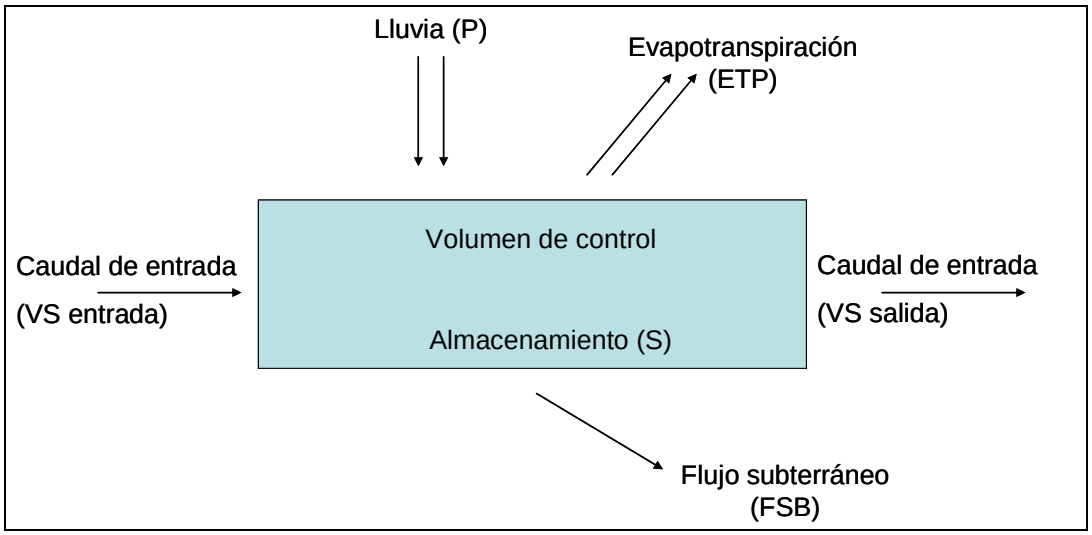


Figura 7-4. Balance Hídrico

El volumen de control se define como la cuenca hasta el punto o sitio donde se termina la zona de estudio en la parte baja del deslizamiento en el barrio El Espino. En la **Figura 7. 5** se presentan los diferentes componentes del balance hídrico en la cuenca.

El área considerada para el balance hídrico corresponde al área de cada una de las cuencas, es decir 0.45 Km2 para la quebrada Santa Rita, 0.40 Km2 para la quebrada Santo Domingo y 0.16 Km2 para la quebrada La Carbonera. El único parámetro para estimar de forma indirecta, es la evapotranspiración, el cual, a continuación se presenta la forma como se estimó para las cuencas.

7.3.7.1. Calculo de la evapotranspiración

Los datos de evapotranspiración son estimados a partir de los datos de temperatura con la ecuación de Thornthwaite para el cuál, la evapotranspiración potencial se define a partir de la siguiente ecuación:

$$Ej = 16\left(\frac{10\,Tj}{I}\right)^{a}$$

Donde Ej es la evapotrasnpiración potencial mensual del mes j, no ajustada, la temperatura media mensual del mes j (en °C), el índice de calor que se define a partir de la siguiente expresión:

$$I = \sum_{i=1}^{12}\left(\frac{Tj}{5}\right)^{1.514}$$

$$a = 0.675x10^{-6} I^{3} - 0.771x10^{-4} I^{2} + 1.792x10^{-2} I + 0.49$$

Los valores de deben ser ajustados a la longitud del día y al número de días en el mes.

La estación climatológica mas cercana a la cuenca corresponde a la estación Vitelma, de la cual se cuenta con los registros de precipitación y temperatura en una longitud de registro de 20 años. Los datos promedio de los parámetros mencionados se presentan para esta estación en el **Tabla 7.10**, en el cual también se muestra el valor promedio de los datos de lluvia de las estaciones Casablanca y

Sierra Morena; nótese que en magnitud, los valores de lluvia de la estación Vitelma, son casi el Doble que el de las otras estaciones.

En el **Tabla 7.11** se presenta el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos de temperatura en la estación Vitelma; aquí se comparan los valores medios mensuales multianuales de precipitación con los valores medios de evapotranspiración calculados.

Nótese que la evapotranspiración es casi constante (Ver **Figura 7.6**), contrario a lo que ocurre con la lluvia, que presenta variaciones a lo largo del año. En algunos meses, la precipitación supera la evapotranspiración significando esto, que en esos meses del año, hay agua disponible para escorrentía superficial y subsuperficial, es decir agua que aumenta los caudales en las quebradas. Sin embargo, son más los meses en los cuales la evapotranspiración potencial se encuentra por encima de la lluvia, lo cual indica que la zona es bastante seca.

Tabla 7-10. Temperatura y precipitación media mensual multianual itelma (2800 m.s.n.m.)

Vitelma (2800 m.s.n.m.)												
	Ene	**Feb**	**Mar**	**Abr**	**May**	**Jun**	**Jul**	**Ago**	**Sep**	**Oct**	**Nov**	**Dic**
Temperatura promedio (°C)	11.59	11.83	11.77	11.9	11.84	11.66	11.34	11.65	11.73	11.68	12.27	12.06
Precipitación promedio (mm)	40.0	56.7	78.6	134.5	98.0	70.2	67.0	63.4	57.4	98.1	115.7	69.2
Promedio de los datos de lluvia de las estaciones Casablanca y Sierra Morena												
Precipitación promedio (mm)	21.53	24.37	44.89	81.05	77.45	51.66	34.81	27.41	39.86	80.94	58.72	36.21

Tabla 7-11. Cálculo de la evapotranspiración

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T (°C)	11.59	11.83	11.77	11.9	11.84	11.66	11.34	11.65	11.73	11.68	12.27	12.06	11.8
I	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.6	3.5	3.6	3.6	3.6	3.9	3.8	43.91
A	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
Ei (mm)	51	52	51	52	52	51	49	51	51	51	54	53	
FC	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02	1.02
P (mm)	21.53	24.37	44.89	81.05	77.45	51.66	34.81	27.41	39.86	80.94	58.72	36.21	578.90
ETP (mm)	51.6	48.2	53.0	53.2	55.0	52.4	52.2	53.4	51.8	52.6	53.6	54.1	630.99
P-ETP	-30.04	-23.81	-8.14	27.84	22.49	-0.79	-17.41	-26.00	-11.94	28.39	5.17	-17.85	-52.09

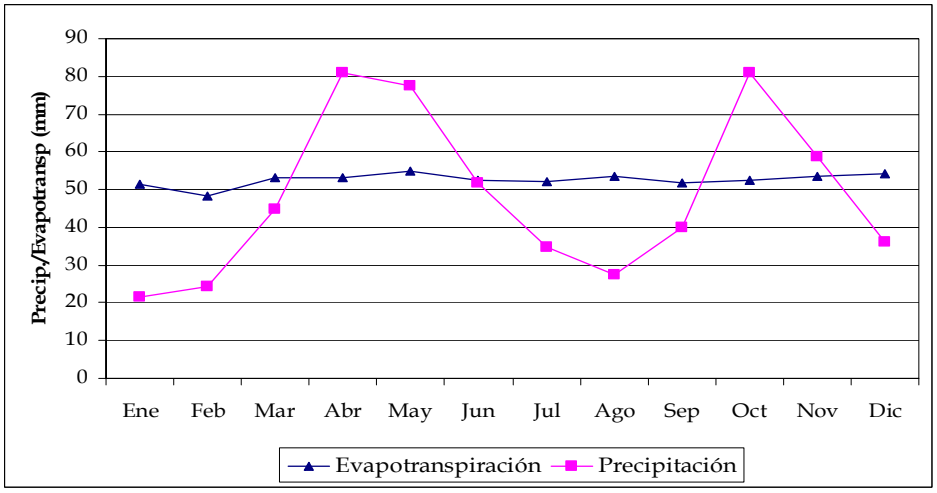


Figura 7-5. Comparación de la evapotranspiración con la precipitación

7.3.7.2. Balance de agua en la cuenca

Como ya se mencionó, la precipitación en la zona, corresponde al promedio de los registros histórico mensuales de las estaciones Casablanca y Sierra Morena los cuales se presentan en la columna 2 de la **Tabla 7.13**. Esta precipitación, se puede convertir en volumen, si se multiplica por el área de cada una de las cuencas, valores que se presentan en la columna 3. La evapotranspiración que se presenta en

la columna 4 corresponde a la estimada en el numeral anterior. El agua disponible (columna 5), corresponde a la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración y que también se puede presentar como un volumen al multiplicarla por el área de la cuenca (columna 6).

El volumen total estimado o caudal total, es un volumen por unidad de tiempo, si se multiplica la columna 6 (agua disponible) por el factor de conversión entre unidades de tiempo en segundos a meses (columna 7).

Los valores iguales a cero en la columna 7, indican que el flujo total incluyendo agua superficial y subterránea en la cuenca es nulo en los meses de enero a marzo, junio a septiembre y diciembre. Lo anterior implica que estos cauces, en la gran mayoría del tiempo en un año, permanecen secos.

Tabla 7-12. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada Santa Rita

Mes	P (mm)	P (m^3)	EVT (mm)	Agua disponible (mm)	Agua disponible (m^3)	Volumen total estimado (l/s)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Ene	21.5	9688.5	51.6	-30	-13518	0.00
Feb	24.4	10966.5	48.2	-24	-10712	0.00
Mar	44.9	20200.5	53.0	-8	-3665	0.00
Abr	81.1	36472.5	53.2	28	12529	4.83
May	77.5	34852.5	55.0	22	10119	3.90
Jun	51.7	23247	52.4	-1	-355	0.00
Jul	34.8	15664.5	52.2	-17	-7836	0.00
Ago	27.4	12334.5	53.4	-26	-11701	0.00
Sep	39.9	17937	51.8	-12	-5371	0.00
Oct	80.9	36423	52.6	28	12774	4.93
Nov	58.7	26424	53.6	5	2326	0.90
Dic	36.2	16294.5	54.1	-18	-8031	0.00

Tabla 7-13. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada Santo Domingo

Mes	P (mm)	P (m³)	EVT (mm)	Agua disponible (mm)	Agua disponible (m³)	Volumen total estimado (l/s)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Ene	21.5	8612	51.6	-30	-12016	0.00
Feb	24.4	9748	48.2	-24	-9522	0.00
Mar	44.9	17956	53.0	-8	-3258	0.00
Abr	81.1	32420	53.2	28	11137	4.30
May	77.5	30980	55.0	22	8994	3.47
Jun	51.7	20664	52.4	-1	-315	0.00
Jul	34.8	13924	52.2	-17	-6966	0.00
Ago	27.4	10964	53.4	-26	-10401	0.00
Sep	39.9	15944	51.8	-12	-4774	0.00
Oct	80.9	32376	52.6	28	11354	4.38
Nov	58.7	23488	53.6	5	2067	0.80
Dic	36.2	14484	54.1	-18	-7139	0.00

Tabla 7-14. Balance Hídrico en la cuenca de la quebrada La Carbonera

Mes	P (mm)	P (m³)	EVT (mm)	Agua disponible (mm)	Agua disponible (m³)	Volumen total estimado (l/s)
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Ene	21.5	3444.8	51.6	-30	-4806	0.00
Feb	24.4	3899.2	48.2	-24	-3809	0.00
Mar	44.9	7182.4	53.0	-8	-1303	0.00
Abr	81.1	12968	53.2	28	4455	1.72
May	77.5	12392	55.0	22	3598	1.39
Jun	51.7	8265.6	52.4	-1	-126	0.00
Jul	34.8	5569.6	52.2	-17	-2786	0.00
Ago	27.4	4385.6	53.4	-26	-4160	0.00
Sep	39.9	6377.6	51.8	-12	-1910	0.00
Oct	80.9	12950.4	52.6	28	4542	1.75
Nov	58.7	9395.2	53.6	5	827	0.32
Dic	36.2	5793.6	54.1	-18	-2856	0.00

7.4. MANEJO DE CUERPO DE AGUA PREVIO A LAS OBRAS DE MITIGACIÓN

Cabe aclarar que los diseños presentados para el manejo de los cuerpos de agua (canalización de quebradas) se presenta a nivel de Fase II, debido a que se requiere de la verificación y aprobación de las diferentes entidades concernientes en el tema.

Dado que las obras se realizarán por etapas, siendo la reconformación de los cauces de la zona la primera etapa, proceso constructivo inicial, se recomiendan las siguientes acciones con el fin de permitir un buen manejo de las aguas superficiales de forma que faciliten el desarrollo de las siguientes etapas y/o la construcción de las obras mitigación proyectadas.

Actualmente los cauces de las quebradas, funcionan como cauces naturales no confinados. Para mejorar las condiciones hidráulicas de las mismas, se debe realizar un manejo inicial, con el fin de evacuar las aguas generadas por la escorrentía superficial producto de las lluvias y sub-superficiales, e infiltraciones, etc. Esto implica una reconformación de los cauces, excavando el lecho del mismo con el fin de obtener una mayor sección transversal con capacidad suficiente para dicho fin, adicionalmente haciendo una limpieza, retiro de basuras y escombros y remoción de especies vegetales, con el fin de despejar el cauce original de estos cuerpos de agua. De igual manera se debe drenar los sitios de acumulación de agua existentes en el cuerpo del deslizamiento, mediante canales abiertos en tierra con el objeto de aliviar presiones y mejorar la escorrentía superficial.

Para evitar la filtración de agua de los cauces naturales hacia la zona de intervención se proyecta realizar previos manejos durante la etapa de construcción, mediante la colocación de geodrenes o geomembranas en las paredes laterales de los canales provisionales construidos para la





conducción del agua de escorrentía, de forma que se evite el paso del flujo de este canal (provisional o de manejo) hacia afuera del mismo.

Las aguas lluvias provenientes de los barrios que se encuentran en la parte superior de las cuencas drenantes a los cauces naturales, deberá ser recogida por medio de canaletas revestidas en tierra y/o revestidas con alguna malla geosintética o geotextil no tejido impregnado con emulsión asfáltica. Dichas aguas deberán ser conducidas hacia los cauces principales (quebradas La Carbonera, Santa Rita y Santo Domingo).

Durante la construcción de la canalización de quebradas. Hacer una verificación detallada de las tuberías de aguas domésticas que actualmente quedan y vierten las aguas al cuerpo del deslizamiento y definir su ubicación. Una vez localizadas se realizara manualmente una cuneta en tierra dirigida a la quebrada más cercana. Esta cuneta deberá ser revestida con tela impermeable o geotextil no tejido impregnado con emulsión asfáltica.

Posterior a la obra. Una vez construido las obras de canalización y definido el cauce se realizarán campañas de limpieza y reconocimiento quincenales con el fin de verificar el flujo libre del agua y retirar los posibles desprendimientos de suelo que puedan ocurrir a lo largo de las márgenes o acumulaciones de basuras.

Coordinar con la EAAB para que se realice el mantenimiento y limpieza de los sistemas de alcantarillado y desarenadores existentes tanto en la parte alta como el la parte baja de la ladera.

8. INVESTIGACION DEL SUBSUELO

La investigación del subsuelo comprende las actividades de exploración del subsuelo y los ensayos de laboratorio. Por lo tanto, en este capítulo se presentan los resultados de estas actividades pero también se complementan con aquellos provenientes de los estudios anteriores.

8.1. EXPLORACIÓN

La exploración del subsuelo se realizó mediante métodos de exploración directa e indirecta y se complementó con la información disponible de estudios anteriores. De los primeros se ejecutaron cinco perforaciones mecánicas con recuperación continua de núcleos, tres trincheras y dos apiques; y de los segundos se realizaron 12 ensayos de refracción sísmica. La localización de los sitios explorados se muestran en **Plano 2**, y en la **Tabla 8.1** se resumen las principales características de los mismos.

8.1.1. Exploración Directa

Como es usual, el objetivo de esta exploración fue el de identificar por observación directa el perfil del subsuelo y tomar muestras de material para ensayos geomecánicos, los cuales son aspectos básicos para la evaluación de la estabilidad del terreno y diseño de obras. Los lugares y profundidad de las perforaciones fueron definidos en una primera etapa considerando las características geológicas y geomorfológicas identificadas inicialmente y la información disponible de los estudios realizados anteriormente en la misma zona. Sin embargo, durante el avance del estudio y los hallazgos en las mismas perforaciones se identificaron condiciones del terreno que dieron

lugar a modificaciones en la localización, profundidad y número de perforaciones. Adicionalmente y dado que la longitud de perforación estimada en los términos de referencia (120 m) se encontró insuficiente para la magnitud del área de estudio, fue necesario complementar la exploración directa con los ensayos geofísicos que se describen más adelante.

Tabla 8-1. Relación de las perforaciones ejecutadas por el Consorcio Altos de la Estancia

Perforación	N (m)	E (m)	Profundidad	Nivel Freático
PCAE1	89133.173	97916.532	40.50m	12.00m
PCAE2	89468.453	98235.638	25.00m	2.76m
PCAE3	88740.770	98543.786	19.20m	2.70m
PCAE4	88900.000	98176.545	32.00m	N.D.
PCAE5	89439.419	98644.362	13.30m	N.D.
APCAE1	98824.000	89206.000	1.20m	N.D.
APCAE2	98722.000	89388.000	1.35m	N.D.
TRCAE1	98308.227	88932.422	Longitud = 12.3m	N.D.
TRCAE2	98478.623	89311.859	Longitud = 9.6m	N.D.
TRCAE3	98507.758	89514.676	Longitud = 21.3m	N.D.

*N.D. = No Detectado

De las cinco perforaciones, tres (CAE-1, CAE 2 Y CAE-4) se ejecutaron en el sector de La Carbonera y a mayor profundidad que las otras dos realizadas en El Espino (CAE-3 y CAE-5). Ello debido a que el primero contaba con un número menor de información disponible y a menor profundidad que El Espino.

El registro de campo de estas perforaciones junto con el de las trincheras y apiques se encuentra en el Anexo 2. Para las perforaciones, sin embargo, se realizó una descripción más detallada del perfil mediante el examen

cuidadoso de los núcleos de material recuperado con el objeto de identificar una unidad litológica a la cual hacerlo corresponder. Ello se muestra en las figuras **Figura 8.1 a Figura 8.5.**

Por otra parte y como se observa en los registros del anexo, las trincheras fueron muy útiles para realizar una descripción detallada del subsuelo y la medición de rasgos estructurales con lo cual se establecieron parámetros de resistencia de los macizos rocosos en su condición in situ, particularmente el llamado Índice Geológico de Resistencia (GSI) que como se verá más adelante se utilizó para modelar los materiales rocosos de acuerdo con el Criterio General de Falla de Hoek y Brown. Vale la pena mencionar que, aunque el registro de la exploración se presenta en este informe, los resultados de la misma sirvieron anteriormente para construir los modelos y secciones geológicas presentados en el Informe Preliminar 2 y que a la postre fueron la base para el modelo geológico-geotécnico empleado en los análisis que se exponen en este documento.

DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA - LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ D.C.

Perforación: CAE 1	Fecha: 11/1/07	Sondeo Mecánico	N = 89133.173	E = 97916.532	Sector La Carbonera	Profundidad = 32m	N.F. (m) = 12

m	Profundidad (m) De	Profundidad (m) A	Tipo	Descripción	Muestras No.	Muestras De (m)	Muestras A (m)	USCS
0	0	0.8		Material de relleno - Gravas en matriz arcillo arenosa habano - material saturado.				
	0.8	2		Arcilla algo arenosa color café oscuro, humedad y plasticidad altas, consistencia blanda.	1	1	1.4	
2	2	3.4		Arcilla limosa gris con oxidaciones, presenta lentes de arena fina y fragmentos de arenisca, consistencia firme a dura, humedad media , material fisurado aprox 10°	2	2.5	3	
4	3.4	4.9		Arena de grano fino con fragmentos de arenisca bastante friables, material con oxidaciones.	3	4.7	5	
	4.9	5		Arcilla habana clara con algo de arena fina, humedad alta, consistencia blanda.	4	4.9	5	
6					5	5	6	
					6	6	8	
8	5	12.3		Fragmentos de arenisca angulares color habano claro de grano fino, en matriz areno limosa con oxidaciones, presenta intercalaciones friables.	7	8	9.5	
10					8	9.5	11	
12					9	11	12.5	
	12.3	12.5		Arcilla habana clara de consistencia blanda.				
	12.5	15.3		Bloques de arenisca angulares de de grano fino color habano, en matriz arcillo arenosa.	10	12.5	14	
14					11	14	15.5	
	15.3	15.4		Arcilla habana clara de consistencia blanda.				
16	15.4	17		Bloques de arenisca angulares de grano fino color habano, en matriz arcillo arenosa.				
					12	17	18.5	
18					13	18.5	20	
20	17	25.5		Fragmentos de arenisca subangulares color habano con oxidaciones, en matriz arcillosa habano claro, humedad y plasticidad alta.				
22					14	20	24	
24					15	24	25.5	
26	25.5	26.5		Bloques de arenisca angulares de grano fino color habano fisurados, presenta relleno de limo organico al interior de las fisuras.	16	25.5	26.5	CL
	26.5	28.5		Fragmentos de arenisca gris de grano fino, en matriz arcillo limosa gris oscuro de humedad y plasticidad altas.	17	26.5	28.5	
28	28.5	30		Fragmentos de arcillolita amarilla oxidada en matriz arcillosa café claro. Presenta fragmentos de carbon.	18	28.5	30	CL
30	30	32		Arcilla limosa gris oscura conpresencia de materia organica en avanzado estado de descomposición, de consistencia firme a dura, humedad media, plasticidad alta. RPI=(3.75,3.0,4.0,4.5)kg/cm2, TORCOMETRO=0.9kg/cm2	19	30	32	CL
32					20	31	32	CH
	32	33.5		Arcillolita habano rojizo con oxidaciones	21	32	33.5	
34	33.5	34.5		Arcillolita gris amarillenta conpresencia de oxido bastante meteorizada con presencia de arcilla gris oscura bastante organica	22	33.5	34.5	CH
	34.5	36		Arcillolita negra organica de humedad y plasticidad media consistencia muy dura	23	34.5	36	
36	36	37		Carbón	24	36	37	
38	37	40.5		Arcillolita gris oscura con trazas amarillas humedad moderada, material bastante plastico, consistencia dura	25	37	40.5	CL
40								

Figura 8-1. Registro de perforación CAE-1. Sector La Carbonera

DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA - LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ D.C.

Perforación: CAE2	Fecha: 11/7/07	Sondeo Mecánico	N = 98235.638	E = 89468.453	Sector La Carbonera	Profundidad = 25m	N.F. (m) =2.76

m	Profundidad (m) De	Profundidad (m) A	Tipo	Descripción	Muestras No.	Muestras De (m)	Muestras A (m)	USCS
0	0	1		Relleno de escombros conformado por materiales varios, recebo y presencia de arena de color amarillo a ocre y de grano fino.	1	0	0.45	
					2	0.5	0.95	CL
2	1	5.67		Limo arenoso de color amarillo con tonos rojizos, con algo de presenciade arcilla de color habano. Hacia la parte inferior, se presentan fragmnetos de areniscas cuarzosas, de grano fino y de tamaño grava.	3	1.2	1.65	CL
					4	2.2	2.65	CL
4					5	3.2	3.65	CL
					6	4.2	4.65	
					7	5.2	5.65	CL
6	5.67	16		Fragmentos de areniscas cuarzosas, de color amarillo claro a habano en matriz de composición arcillosa de color amarillo, con algo de arena de grano medio.	8	5.67	7.2	
8					9	7.2	8.9	
					10	8.9	10.4	
10					11	10.4	11.4	
					12	11.4	12.9	CL
12					13	12.9	13.35	
					14	13.35	14.85	
14					15	14.85	16	
16	16	20		Fragmentos de arenisca cuarzosa, de color amarillo claro a habano, de grano fino, dura, compacta, con planos de fracturas algo oxidados, con inclinaciones desde verticales a unos 60° con la horizontal.	16	16	17.4	
18								
20	20	21		Fragmentos de arenisca habano claro. Angulares	17	20	21	
	21	22		Fragmentos de arenisca habano claro de tamaño 5cm, presenta diaclasas verticales	18	21	22	
22	22	23		Fragmentos de roca arenisca angulares color habano claro	19	22	23	
24	23	25		Roca arenisca habano claro de grano fino con diaclazas verticales, material bastante fracturado	20	23	25	

Figura 8-2. Registro de perforación CAE-2. Sector La Carbonera

DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA - LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ D.C.

Perforación: CAE3	Fecha: 11/9/07	Sondeo Mecánico	N = 98543.786	E = 88740.77	Sector El Espino	Profundidad = 19.2m	N.F. (m) =2.7

m	Profundidad (m) De	Profundidad (m) A	Tipo	Descripción	Muestras No.	Muestras De (m)	Muestras A (m)	USCS
0	0	0.45		Material de relleno, antigua cimentacion de vivienda	1	0	0.45	
	0.45	1.85		Fragmentos de arenisca cuarzosa color habano claro - antigua cimentacion de vivienda	2	0.45	1.85	
2	1.85	2.05		Arcilla limosa Negra organica el material presenta fragmentos de arenisca - humedad moderada - consistencia media	3	1.85	2.05	
	2.05	2.95		Fragmentos de roca arenisca gris clara con oxidaciones, algunos fragmentos son amarillos	4	2.05	2.95	
4	2.95	4.5		Fragmentos de arenisca bastante alterados color gris claro	5	2.95	4.5	
	4.5	6		Fragmentos de arenisca habano claro , presenta arcilla habana clara con fragmento y luego continua solamente la arcilla de humedad media a alta y consistencia media a blanda	6	4.5	6	
6	6	7		No se recupera,probablemente sea arcilla				
	7	7.7		Fragmentos de arenisca gris	7	7	7.7	
8	7.7	8.5		Arenisca gris claro presenta inclusiones de ramas fosilizadas	8	7.7	8.5	
	8.5	9.5		Arenisca habano claro de grano medio	9	8.5	9.5	
10	9.5	10.35		Arenisca habana de grano medio con inclusiones de carbón	10	9.5	10.35	
	10.35	11.4		Arenisca amarilla grisacea de grano medio con fragmentos	11	10.35	11.4	
	11.4	11.6		Arenisca habana cuarzosa con oxidaciones, presenta diaclasas verticales	12	11.4	11.6	
12	11.6	12.4		Arenisca habana claro a amarillo con buen recobro	13	11.6	12.4	
	12.4	13.5		Arenisca habano claro con oxidaciones, presenta diaclasas verticales	14	12.4	13.5	
14	13.5	14.3		Arenisca habana masiva con oxidaciones y diaclasas verticales	15	13.5	14.3	
	14.3	15		Arenisca habana grisacea con oxidaciones, bastante fracturada	16	14.3	15	
	15	15.6		Arenisca amarilla clara con discontinuidades rellenas de arcilla gris clara	17	15	15.6	
16	15.6	16.3		Arenisca habano claro con oxidaciones y diaclasas verticales presenta arcilla gris clara en las discontinuidades	18	15.6	16.3	
	16.3	17.2		Arenisca amarilla con trazas oscuras y en la base rojizas, se observa inclusion de mismo material algo arcilloso	19	16.3	17.2	
18	17.2	18.1		Arenisca habana oscura con oxidaciones de grano grueso apariencia cuarzosa, material friable, presenta intercalaciopnes arcillosas	20	17.2	18.1	
20								
22								
24								

Figura 8-3. Registro de perforación CAE-3. Sector El Espino

DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA - LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ D.C.

Perforación: CAE 4	Fecha: 11/9/07	Sondeo Mecánico	N = 98176.545	E = 88900	Sector La Carbonera	Profundidad = 32m	N.F. (m) =ND

m	Profundidad (m) De	Profundidad (m) A	Tipo	Descripción	Muestras No.	Muestras De (m)	Muestras A (m)	USCS
0	0	1.5		Arcilla limosa café oscura organica hasta 0.4m humedad natural media alta y consistencia media, continua de color gris pardo hasta 1.5	1	0	1.5	
2	1.5	2.5		Arcilla limosa algo arenosa carmelita con fragmentos de arcillolita hasta de 3/8" humedad media alta, consistencia firme, continua hasta tomarce habano claro de consistencia media y sin presencia de arena. RPI 2.7 - T= 0.75 tsf	2	1.5	2.5	
	2.5	3.5		Arenisca friable con incrustaciones de arcillolita rojiza, el material se encuentra bastante fracturado hacia la bas ese toma gris y no presenta arcillolita , con textura gruesa y bastante friable.	3	2.5	3.5	
4	3.5	4.5		Arena de grano medio saturada color amarillo, aproximadamente hasta 3.8m, continua arcilla gris clara plastica de consistencia blanda, con presencia de arena menor al 10%	4	3.5	4.5	
	4.5	6		Fragmentos de arenisca en matriz areno limosa material lavado hasta 5.5m, continua arcillolita gris claro algo arenosa con presencia de intercalaciones de fragmentos de arenisca.	5	4.5	6	
6	6	7		Arcilla habana grisacea con intercalaciones de arenisca en la parte superior presenta oxidaciones, humedad alta, consistencia blanda. RPI 1.5 , T=0.95	6	6	7	
	7	8		Fragmentos de arenisca angulares hasta 7.4 m continua intercalacion de 0.09m de arcilla gris con oxidaciones y continua roca arenisca bastante fracturada color crema grano fino	7	7	8	
8	8	9		Continua arenisca bastante fracturada	8	8	9	
	9	10		Arenisca habana con trazas carbonosas de grano fino cuarzosa, se presenta menos alterada que el estrato antenor	9	9	10	
10	10	11		Continua el mismo material, de apariencia sana	10	0.95	0.97	
	11	12		Arenisca bastante fracturada con presencia de diaclasas casi verticales	11	11	12	
12	12	13		Continua el mismo material bastante fracturado	12	12	13	
	13	14		Arenisca color crema de apariencia sana	13	13	14	
14	14	15		Continua el mismo material, con una intercalacion de arcilla grisacea de 7 cm de espesor a una profundidad de 14.5m	14	14	15	
	15	16		Continua arenisca color crema de grano medio	15	15	16	
16	16	17		Continua el mismo material algio mas fracturado	16	16	17	
	17	18		continua el material fracturado hasta los 17.3m continuando el material sano con presencia de trazas rojizas.	17	17	18	
18	18	19		Continua arenisca crema de grano medio y trazas rojizas - buena recuperacion	18	18	19	
	19	20		Continua el mismo material	19	19	20	
20	20	21		Arenisca habano claro con trazas rojizas, presenta diaclasas casi verticales	20	20	21	
	21	24		Fragmentos de roca arenisca de grano grueso cuarzoso color crema	21	21	24	
22								
24	24	27		Continua arenisca de grano grueso color ocre y con algunos segmentos crema , el material se encuentra bastante fracturado, en los ultimos 15 cm, se recupera arcilla inorganica café rojizo, humedad media , consistencia firme	22	24	27	
26								
28	27	31.2		Fragmentos angulosos en matriz arcillosa habano claro	23	27	31.2	
30								
	31.2	31.7		Arenisca con presencia de estratificacion ondulada color crema intercalado con	24	31.2	31.7	
32	31.7	32		café oscuro, material bien fracturado.	25	31.7	32	
				Arcillolita color crema de consistencia dura				
34								

Figura 8-4. Registro de perforación CAE-4. Sector La Carbonera

DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN PARA EL SECTOR ALTOS DE LA ESTANCIA - LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ D.C.

Perforación: CAE5	Fecha: 11/30/07	Sondeo Mecánico	N = 98644.362	E = 89439.419	Sector El Espino	Profundidad = 13.3m	N.F. (m) =ND

m	Profundidad (m) De	Profundidad (m) A	Tipo	Descripción	Muestras No.	Muestras De (m)	Muestras A (m)	USCS
0	0	2		Relleno heterogeneo con escombros y basura				
2	2	3.5		Fragmentos de roca arenisca en matriz arcillosa, areniscas de grano medio, material heterogeneo presenta oxidaciones	1	2.8	3.5	
4	3.5	4.5		Fragmentos de arenisca color crema de grano medio con oxidaciones	2	3.5	4.5	
	4.5	6		Fragmentos de arenisca parda amarillenta con presencia de oxidaciones tamaños entre 2 y 5 cm grano medio	3	4.5	6	
6	6	7.7		Roca arenisca habano claro de grano grueso, material intacto	4	6	7.7	
8	7.7	9.8		Fragmentos de arenisca cuarzosa con incrustaciones de arcillolita	5	7.7	9.8	
10	9.8	10		Arcilla limosa café claro con vetas rojizas humedad y plasticidad alta, consistencia firme	6	9.8	10	
	10	10.8		Arcillolita gris con presencia de material organico humedad media consistencia firme	7	10	10.8	
	10.8	11.35		Arcillolita amarilla quemada, consistencia dura, humedad moderada	8	10.8	11.35	
12	11.35	13.3		Fragmentos de arenisca cuarzosa color entre marron y crema, grano grueso presenta fraguras llenas de arcillolita café	9	11.35	13.3	

Figura 8-5. Registro de perforación CAE-5. Sector El Espino

8.1.2. Exploración Indirecta

Como se dijo, adicional a la exploración directa se ejecutaron 12 Perfiles Geosísmicos PGS, los cuales se presentan con la nomenclatura PGS en la **Figura 8-1**. El informe detallado de estos perfiles se presenta en el Anexo 2 y la relación de sus características en la **Tabla 8.2**.

En total se efectuaron 7 ensayos en el sector de La Carbonera y 5 en el sector de El Espino. Estos fueron realizados de manera paralela a las curvas de nivel, siguiendo un alineamiento recto desde la parte alta de cada una de las laderas, hasta su parte más baja.

Como se manifiesta en el Anexo 2, la interpretación de los perfiles sísmicos se hizo empleando el método de cálculo conocido como ¨Delay Times¨ que condujo a establecer tres conjuntos principales de estratos, de los cuales el más profundo corresponde al basamento rocoso y los dos más superficiales

a depósitos de suelos y material removido o colocado por acción antrópica.

Ellos se describen como sigue:

a) Conjunto 1: Caracterizado por velocidades de onda bajas, con variaciones del orden de 150 a 250 m/seg de velocidad compresional, lo cual es correlacionable con un suelo superficial, blando y de constitución predominantemente fina. Su relación con la geología local indica que corresponde a un estrato conformado por sedimentos orgánicos y sedimentos arcillosos de consistencia blanda.

Tabla 8-2. Relación de los Perfiles Geosísmicos efectuados por el Consorcio Altos de la Estancia

PERFILES GEOSÍSMICOS								
No.	DESDE			HASTA			LONGITUD	SECTOR
	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN		
1	98304.35	89540.68	2641.71	98358.05	89522.89	2635.61	57.00	La Carbonera
2	98292.33	89501.25	2652.07	98342.50	89479.06	2652.19	55.00	La Carbonera
3	98144.87	89501.37	2686.02	98190.32	89476.67	2678.14	53.00	La Carbonera
4	98268.05	89464.49	2667.06	98304.77	89419.93	2667.84	58.00	La Carbonera
5	98212.12	89380.33	2691.96	98177.72	89423.88	2692.13	56.00	La Carbonera
6	98013.19	89303.47	2748.36	98006.85	89356.38	2750.61	53.00	La Carbonera
7	97902.70	89210.03	2796.22	97892.45	89266.19	2790.67	57.00	La Carbonera
8	98430.68	88680.62	2771.71	98376.64	88686.68	2775.21	54.00	El Espino
9	98436.88	88817.98	2754.92	98381.46	88822.04	2763.31	56.00	El Espino
10	98460.46	88981.80	2741.49	98514.46	88976.59	2731.66	54.00	El Espino
11	98513.88	89195.26	2701.16	98557.46	89160.60	2699.54	56.00	El Espino
12	98506.75	89364.04	2659.27	98553.97	89333.02	2662.56	57.00	El Espino

Conjunto 2: Este conjunto corresponde a depósitos compuestos por suelos residuales, intercalaciones de materiales granulares (pocos) y finos (predominio) y su velocidad de onda es variable entre 400 y 800 m/s aproximadamente, con frecuentes variaciones laterales y en profundidad de la velocidad y del espesor del material. Su correlación con la geología

local indica que esta capa corresponde a depósitos de ladera compuestos por arcillas de consistencia media a firme.

Conjunto 3: Corresponde al basamento rocoso, cuya velocidad de onda es variable entre 1000 y 2700 m/s. En este caso, las velocidades más bajas corresponden probablemente a rocas meteorizadas y suelos residuales duros, mientras que las velocidades superiores a 2000 m/s corresponden a rocas blandas predominantemente arcillolitas o areniscas con intercalaciones arcillosas.

Adicionalmente, las imágenes de tomografías sísmicas muestran que el subsuelo tiene capas algo plegadas y los contactos entre capas son curvos con variaciones en el espesor de un sitio a otro. El subsuelo no es homogéneo pero los estratos muestran cierta tendencia a ser subparalelos y seguir la inclinación de la topografía. El contacto entre la primera y la segunda capa se encuentra a profundidades variables entre menos de un metro y alrededor de 2 a 3 metros. El contacto entre la segunda y la tercera capa se encuentra también a profundidades variables por la curvatura en los contactos entre estratos y el rango de variación está entre 5 y 15 metros, siendo más común encontrar este contacto a profundidades entre 6 y 9 metros.

8.1.3. Información secundaria

Como información secundaria se contó con aquella tomada de los estudios relacionados en la **Tabla 8. 3.**

En general se puede decir que con la información secundaria y la obtenida en el presente estudio se logró un cubrimiento relativamente razonable de ambas zonas, tanto de la Carbonera como de El Espino. De esta manera, para los análisis se contó con 22 perforaciones en el sector de El Espino variando entre los 4.0 metros de profundidad y los 37.7 metros; y para el

sector de la Carbonera con 14 perforaciones que varían entre los 4.0 y los 37.0 metros de profundidad.

8.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

Durante la etapa de exploración de campo se obtuvieron muestras de material, tanto en roca como en suelo. Posteriormente, sobre muestras escogidas se realizaron los respectivos ensayos de laboratorio para su caracterización física y geomecánica. En la **Tabla 8.4** se presenta el resumen de las muestras ensayadas en cada una de las perforaciones efectuadas por el Consorcio Altos de la Estancia, junto con la relación del tipo de ensayos ejecutados con ellas. Se incluyen en esta tabla los datos correspondientes a 3 muestras superficiales en bloque y dos muestras de bulto, tomadas en el Sector de El Espino. Los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados para este estudio se presentan en el Anexo 3.

Adicional a los ensayos realizados por el Consorcio Altos de la Estancia, los resultados de estos se complementaron con los de los estudios relacionados en la Tabla 8. 3. De esta manera se elaboraron las **Tabla 8 5 y Tabla 8.6** en la que se resumen los resultados de todos los ensayos disponibles.

Tabla 8-3. Relación de perforaciones de otros estudios ejecutados en los sectores de la Carbonera y El Espino

Ejecutor	Perforación	N (m)	E (m)	Profundidad	Nivel Freático
INGEOCIM LTDA. 1998	PIGC1	88770.000	97910.000	4.00m	N.D.
CIVILES LTDA. 1999	PCIV1	89449.716	98732.744	6.55m	N.D.
	PCIV2	89442.324	98747.978	4.55m	N.D.
INGENIERÍA Y GEOTECNIA LTDA. 1999	PIGL1	89507.893	98128.761	12.20m	N.R.
	PIGL2	89478.038	98111.038	7.50m	N.R.
	PIGL3	89385.659	98092.420	7.00m	N.R.
	PIGL4	89360.495	98121.715	5.40m	N.R.

Ejecutor	Perforación	N (m)	E (m)	Profundidad	Nivel Freático
	PIGL5	89263.595	98060.583	3.50m	N.R.
	PIGL6	89359.183	98233. 841	6.50m	N.R.
	PIGL7	89320.622	98323.794	6.95m	N.R.
GEOTECNIA Y CIMENTACIONES 2001	PGYC1	89256.640	98600.410	9.20m	N.R.
	PGYC2	89178.850	98653.830	14.00m	N.R.
	PGYC3	89230.790	98495.260	16.80m	N.R.
	PGYC4	89339.090	98546.850	10.00m	N.R.
INGEOMINAS 2003	PING1	89068.090	98696.071	30.10m	N.R.
	PING2	89034.457	98633.776	28.90m	N.R.
	PING3	88872.412	98588.121	30.40m	N.R.
	PING4	89045.946	98508.746	23.80m	N.R.
	PING5	88971.334	98503.219	21.50m	N.R.
	PING6	88876.596	98440.934	26.10m	N.R.
	PING7	88793.893	98380.411	23.10m	N.R.
	PING8	89109.100	98449.261	30.10m	N.R.
	PING9	88948.859	98452.249	37.70m	N.R.
	PING10	89164.879	98827.361	19.20m	N.R.
	PING11	89443.565	98662.081	21.10m	N.R.
INGENIERÍA Y GEORIESGOS 2004	PIGR1	89265.120	98197.790	14.00m	N.R.
	PIGR2	89118.979	98140.916	37.00m	N.R.
	PIGR3	89100.139	97944.465	24.00m	N.R.
	PIGR4	88667.334	98496.776	23.80m	N.R.

*N.D. = No Detectado
*N.R. = No Reportado

Tabla 8-4. Ensayos de laboratorio realizados por el Consorcio Altos de la Estancia

PROGRAMA ENSAYOS DE LABORATORIO		HUMEDAD NATURAL	TAMIZADO	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	PESO ESPECÍFICO	PESO UNITARIO	COMPRESIÓN EN SUELO	COMPRESIÓN EN ROCA	CARGA PUNTUAL	CORTE DIRECTO
Muestra	Prof. (m)										
PCAE1-M 3	3.40 – 5.00	X					X				X
PCAE1-M 6	6.00 – 8.00	X					X				X
PCAE1-M16	25.50 – 26.50	X		X	X		X	X			X
PCAE1-M18	28.50 – 30.00	X	X	X	X	X	X	X			
PCAE1-M19	30.00 – 31.00	X	X	X	X	X	X	X			X
PCAE1-M20	31.00 – 32.00	X	X	X	X	X	X	X			X
PCAE1-M21	32.00 – 33.50	X				X	X				
PCAE1-M22	33.50 – 34.50	X	X	X	X	X	X	X			X
PCAE1-M24	36.00 – 37.00					X	X				
PCAE1-M25	37.00 – 40.50	X		X	X	X	X	X			X
PCAE2-M2	0.50 – 0.95	X	X	X	X						
PCAE2-M3	1.20 – 1.65	X	X	X	X	X					
PCAE2-M4	2.20 – 2.65	X	X	X	X						
PCAE2-M5	3.20 – 3.65	X	X	X	X						
PCAE2-M7	5.20 – 5.65	X		X	X						
PCAE2-M10	8.90 – 10.40	X	X								
PCAE2-M12	11.40 – 12.90	X	X	X	X		X				X
PCAE2-M13	12.90 – 13.35	X	X				X				
PCAE2-M15	14.85 – 16.00	X					X				X
PCAE2-M20	23.00 – 25.00									X	
PCAE3-M9	8.50 – 9.50	X					X		X		
PCAE3-M10	9.50 – 10.35	X					X				X
PCAE3-M13	11.60 – 12.40						X		X		
PCAE3-M18	15.60 – 16.30						X		X		
PCAE3-M19	16.30 – 17.20						X		X		

PROGRAMA ENSAYOS DE LABORATORIO		HUMEDAD NATURAL	TAMIZADO	LÍMITE LÍQUIDO	LÍMITE PLÁSTICO	PESO ESPECÍFICO	PESO UNITARIO	COMPRESIÓN EN SUELO	COMPRESIÓN EN ROCA	CARGA PUNTUAL	CORTE DIRECTO
Muestra	Prof. (m)										
PCAE3-M20	17.20 – 18.10	X					X			X	X
PCAE4-M 9	9.1 – 10.4						X		X		
PCAE4-M 13	13.5 – 13.7						X		X		
PCAE4-M 18	18.7 – 19.00						X		X		
PCAE4-M 20	20.0 – 21.0									X	
PCAE5-M 4	6.0 – 6.5						X		X		
PCAE5-M 5	7.5 - 8.0									X	
PCAE5-M 7	10.0 – 10.5									X	
BLQ1	Escarpe la carbonera	X					X				X
BLQ2	El Espino "cuerpo deslizado"	X	X	X			x				X
BLQ3	EL Espino III	X	X	X	X	X		X			
APIQUE 1	0.30 – 1.20	X	X	X	X						X
APIQUE 2	0.50 – 1.30	X	X	X	X						X
TOTAL		26	15	16	15	9	25	7	8	5	15

Nota: a los materiales de los apiques 1 y 2 se les realizo ensayo de proctor modificado.

Tabla 8-5. Resumen de ensayos geomecánicos Sector La Carbonera

Perforación Número (Fecha)	Sector	Nivel Freático	Coordenadas		Descripción	Muestra No.	USCS	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	Gs
			Norte	Este									
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Bloques de arenisca angulares de grano fino color habano fisurados, presenta relleno de limo organico al interior de las fisuras.	16	CL	16.5	25.3	16.4	8.9	0.991	
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Fragmentos de arcillolita amarilla oxidada en matriz arcillosa café claro. Presenta fragmentos de carbon.	18	CL	22.6	41.4	21.4	20.0	0.940	2.67
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Arcilla limosa gris oscura conpresencia de materia organica en avanzado estado de descomposición, de consistencia firme a dura, humedad media, plasticidad alta. RPI=(3.75,3.0,4.0,4.5)kg/cm2, TORCOMETRO=0.9kg/cm2.	19	CL	17.9	41.5	21.0	20.5	1.150	2.62
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Arcilla limosa gris oscura conpresencia de materia organica en avanzado estado de descomposición, de consistencia firme a dura, humedad media, plasticidad alta. RPI=(3.75,3.0,4.0,4.5)kg/cm2, TORCOMETRO=0.9kg/cm2.	20	CH	16.7	50.1	20.5	29.6	1.126	2.61
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Arcillolita gris amarillenta conpresncia de oxido bastante meteorizada con presencia de arcilla gris oscura bastante organica	22	CH	17.8	50.6	17.0	33.6	0.976	2.61
CAE1 (1/11/2007)	Carbonera	12.00	89133.17	97916.53	Arcillolita gris oscura con trazas amarillas humedad moderada, material bastante plastico, consistencia dura	25	CL	16.7	32.5	16.8	15.7	1.006	2.61
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Relleno de escombros conformado por materiales varios, recebo y presencia de arena de color amarillo a ocre y de grano fino.	2	CL	19.1	37.4	18.3	19.1	0.957	
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Limo arenoso de color amarillo con tonos rojizos, con algo de presenciad e arcilla de color habano. Hacia la parte inferior, se presentan fragmentos de areniscas cuarzosas, de grano fino y de tamaño grava.	3	CL	15.7	37.1	16.4	20.7	1.033	2.61
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Limo arenoso de color amarillo con tonos rojizos, con algo de presencia de arcilla de color habano. Hacia la parte inferior, se presentan fragmnetos de areniscas cuarzosas, de grano fino y de tamaño grava.	4	CL	24.3	36.0	14.8	21.2	0.553	
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Limo arenoso de color amarillo con tonos rojizos, con algo de presencia de arcilla de color habano. Hacia la parte inferior, se presentan fragmnetos de areniscas cuarzosas, de grano fino y de tamaño grava.	5	CL	17.7	40.8	17.5	23.3	0.994	
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Limo arenoso de color amarillo con tonos rojizos, con algo de presenciade arcilla de color habano. Hacia la parte inferior, se presentan fragmnetos de areniscas cuarzosas, de grano fino y de tamaño grava.	7	CL	12.1	24.1	11.3	12.8	0.932	
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Fragmentos de areniscas cuarzosas, de color amarillo claro a habano en matriz de composición arcillosa de color amarillo, con algo de arena de grano medio.	12	CL	13.3	35.9	16.7	19.2	1.180	
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Fragmentos de areniscas cuarzosas, de color amarillo claro a habano en matriz de composición arcillosa de color amarillo, con algo de arena de grano medio.	15		3.7					
CAE2 (7/11/2007)	Carbonera	2.76	89468.45	98235.64	Roca arenisca habano claro de grano fino con diaclazas verticales, material bastante fracturado	20							
IGC1 (1/8/1998)	Carbonera		88770.00	97910.00	Arenisca cuarzosa friable y limpia de grano fino y redondo, color amarillo claro	2		22.0					
IGL1	Carbonera		89507.89	98128.76	Arena arcillosa de color amarillo	9	CL	18.5	40.0	18.0	22.0		
IGL1	Carbonera		89507.89	98128.76	Arcilla arenosa de color gris claro con gravas de arenita friable	12	CH	24.7	86.0	24.0	62.0		
IGL1	Carbonera		89507.89	98128.76	Arcilla arenosa de color gris claro con gravas de arenita friable	14	CH	19.2	79.0	22.0	57.0		
IGL1	Carbonera		89507.89	98128.76	Arcilla de color gris calra, de consistencia muy firme con pequeños fragmentos de arenisca	16	CL	20.2	50.0	17.0	33.0		
IGL2	Carbonera		89478.04	98111.04	Arcilla limosa de color café con gravas de arenita, de baja humedad	1	CL	13.7	22.0	9.0	13.0		
IGL2	Carbonera		89478.04	98111.04	Arenita de grano fino de color habana, friable y deleznable	6	CL	22.0	36.0	14.0	22.0		



Tabla 8-6. Resumen de ensayos geomecánicos Sector El Espino

Perforación Número (Fecha)	Sector	Nivel Freático	Coordenadas		Descripción	Muestra No.	USCS	W_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	Gs
			Norte	Este									
BLQ1	Espino				Roca arcillolita color gris								2.620
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca habano claro de grano medio	9							
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca habana de grano medio con inclusiones de carbón	10							
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca habana claro a amarillo con buen recobro	13							
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca habano claro con oxidaciones y diaclasas verticales presenta arcilla gris clara en las discontinuidades.	18							
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca amarilla con trazas oscuras y en la base rojizas, se observa inclusion del mismo material algo arcilloso	19							
CAE3 (9/11/2007)	Espino	2.70	88740.77	98543.79	Arenisca habana oscura con oxidaciones de grano gruso apariencia cuarzosa, material friable, presenta intercalaciones arcillosas.	20							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Arcilla habana grisacea con intercalaciones de arenisca en la parte superior presenta oxidaciones, humedad alta, consistencia blanda. RPI 1.5 , T=0.95	6							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Fragmentos de arenisca angulares hasta 7.4 m continua intercalacion de 0.09m de arcilla gris con oxidaciones y continua roca arenisca bastante fracturada color crema grano fino	7							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Arenisca bastante fracturada con presencia de diaclasas casi verticales	11							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Arenisca color crema de apariencia sana	13							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Arenisca crema de grano medio y trazas rojizas - buena recuperacion	18							
CAE4 (9/11/2007)	Espino		88900.00	98176.55	Arenisca crema de grano medio y trazas rojizas - buena recuperacion	19							
CIV1 (17/2/1999)	Espino		89449.72	98732.74	Relleno de caolinita gris clara en estado suelto. Presenta humedad media a alta y baja plasticidad. La consistencia es media, y el contenido de materiales tamaño grava y de escombros de construcción se incrementa con la profundidad.	3	ML	27.8	28.7	24.1	4.6	0.200	
CIV1 (17/2/1999)	Espino		89449.72	98732.74	Relleno de caolinita gris clara en estado suelto. Presenta humedad media a alta y baja plasticidad. La consistencia es media, y el contenido de materiales tamaño grava y de escombros de construcción se incrementa con la profundidad.		CL	13.9	24.5	11.1	13.4	0.790	
CIV2 (17/2/1999)	Espino		89442.32	98747.98	Relleno limoso de color pardo claro a gris, que presenta altos contenidos de gravas procedentes de desechos de construcción.Plasticidad baja, e incremento de la humedad con la profundidad.	1	ML	17.3	30.6	26.1	4.5	0.200	
GYC1	Espino		89256.64	98600.41	Conglomerados en matriz de arcilla, con algo de arena fina, gravas y cantos	1	CH	36.0	66.0	21.0	45.0		
GYC1	Espino		89256.64	98600.41	Conglomerados en matriz de arcilla, con algo de arena fina, gravas y cantos	2	CH	34.0	64.0	19.0	45.0		
GYC2	Espino		89178.85	98653.83	Conglomerados y gravas en matriz de arcilla habana	1	CH	29.0	63.0	17.0	46.0		
GYC2	Espino		89178.85	98653.83	Conglomerados y gravas en matriz de arcilla habana	2							
GYC2	Espino		89178.85	98653.83	Conglomerados y gravas en matriz de arcilla habana	3	CH	31.0	59.0	24.0	35.0		
GYC3	Espino		89230.79	98495.26	Conglomerados en matriz de arcilla con arena y gravas	1	CH		59.0	18.0	41.0		
GYC3	Espino		89230.79	98495.26	Conglomerados en matriz de arcilla con arena y gravas	3	CL	38.0	48.0	25.0	23.0		
GYC4	Espino		89339.09	98546.85	Relleno de arcillas, gravas y piedras	1	MH		63.0	40.0	23.0		
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Capas delgadas de limo y arcilla	1							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Fragmentos de arenisca friable en matriz arcillosa	5							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Arcilla con fragmentos de arenisca	9							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Arcilla con fragmentos de arenisca	10							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Arcilla con fragmentos de arenisca	13							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Arcilla con fragmentos de arenisca	18							
IGR4	Espino		88667.33	98496.78	Arcilla con fragmentos de arenisca	20							





9. CARACTERIZACIÓN GEOMECANICA DE LOS MATERIALES

En capítulos anteriores se caracterizó la zona de estudio y sus alrededores de acuerdo con varios de los aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y antrópicos que permiten comprender el origen y dinámica de los movimientos en masa que la han venido afectando. Dando continuidad a ello y con base en lo presentado en el capítulo anterior, en este se complementa esa caracterización con los parámetros geotécnicos de los materiales que dan lugar a establecer su comportamiento mecánico, con lo cual se tendrá un modelo geológico-geotécnico integral para los análisis de estabilidad y diseño de obras.

Dado que cada una de las laderas, El Espino y La Carbonera, corresponden a zonas de origen geomorfológico y comportamiento geotécnico diferente, es necesario considerar cada una de ellas de forma separada y hacer una distinción entre los tipos de materiales presentes en cada unidad.

9.1. SECTOR DE LA CARBONERA

Una visión general de los tipos de suelos en el sector de La Carbonera se muestra en la Figura 9.1. En esta, los datos de las series están organizados de acuerdo a su profundidad, escrita enseguida al nombre de la perforación y representada en la figura por la forma de la convención.

De esta figura se puede apreciar que en esta zona predominan los materiales arcillosos de alta y baja plasticidad. Para profundidades menores

a los 2,5 m, se encuentra una secuencia de materiales arcillosos de baja y alta plasticidad que según la descripción de los registros de perforación corresponden a un relleno heterogéneo compuesto por materiales limosos, arenosos y algunos rellenos antrópicos conformados por desechos de construcción. A partir de esta profundidad y hasta los 5m aproximadamente, todos los materiales caracterizados se encuentran clasificados como suelos arcillosos de baja plasticidad. Estos corresponden a materiales arcillo-arenosos con presencia de gravas de arenisca. Los materiales con profundidad menor a 5m se encuentran representados en la carta de plasticidad mediante un símbolo cuadrado.

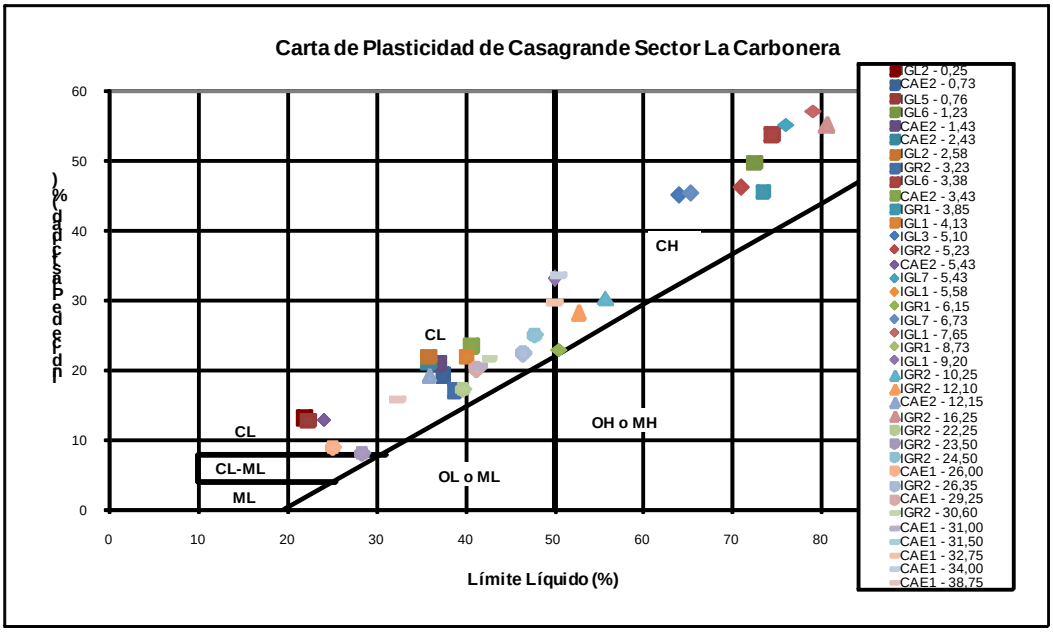


Figura 9-1. Clasificación de suelos según la Carta de Plasticidad de Casagrande para el sector La Carbonera

Para profundidades mayores a 5,0 m empiezan a aparecer nuevamente materiales arcillosos de alta plasticidad, la cual va disminuyendo conforme se incrementa la profundidad, tal como se muestra por los símbolos triangulares en la carta de plasticidad. En general este estrato corresponde

a una matriz arcillosa continua con fragmentos de arenisca y arcillolita y se extiende hasta aproximadamente 20 m de profundidad. El límite para esta capa está dado en la carta de plasticidad por el cambio entre los símbolos triangulares y circulares. Finalmente, a profundidades mayores a 20m se encuentran en general materiales arcillosos de baja plasticidad. Estos en realidad corresponden a las intercalaciones arcillosas de la roca base tipo arenisca.

En cuanto a la humedad de los materiales presentes en sector de La Carbonera, como se puede apreciar en la **Figura 9.2**, se observan valores relativamente bajos de humedad y su variación en profundidad no es muy significativa. El rango de humedad se encuentra entre el 10 y el 30% aproximadamente, cuyos valores más altos corresponden a los materiales arcillosos de alta plasticidad localizados en los primeros 5 metros de profundidad.

En lo que respecta a la plasticidad, como se puede apreciar en la **Figura 9.3**, los materiales con mayor plasticidad se encuentran ubicados en las primeras capas de material, y son de alguna manera correspondiente con los que presentan una mayor humedad, como se puede observar en la Figura 5.2. En general, se aprecia una disminución de la plasticidad con la profundidad con un predominio de materiales de alta plasticidad hasta aproximadamente los 10 m y a profundidades mayores, predominan los materiales de baja plasticidad.

Por su parte, los materiales presentan una variación del peso unitario con la profundidad tal y como se muestra en la **Figura 9.4**. Los materiales de menor densidad se encuentran en los primeros 10m de profundidad y corresponden en su mayoría a materiales limosos aunque también se encuentran algunos

materiales arcillosos, con pesos unitarios cercanos a las 2,05 t/m³. Posterior a los 20m de profundidad, ya empiezan a registrarse los materiales rocosos correspondientes a areniscas y arcillolitas cuyos pesos unitarios en promedio varían de 2,10 a 2,20 t/m³.

Con respecto a la resistencia de los materiales, en las figuras Figura 9.5 a la Figura 9.11, se presentan los resultados de los ensayos de corte directo efectuados por el Consorcio para este estudio.

Estos resultados muestran que en general el material de la roca base correspondiente a la arcillolita, presenta unas características de resistencias mayores a las de la arenisca que muestra un alto grado de alteración y baja resistencia al corte.

Un análisis más detallado de los parámetros geomecánicos se presenta en el Anexo 1.

9.1.1. Caracterización de unidades geotécnicas según los parámetros geomecánicos

A partir de los ensayos realizados tanto por el Consorcio Altos de la Estancia como por las otras firmas consultoras, se procedió a la respectiva caracterización geomecánica de las diferentes estratos presentes en el subsuelo. De acuerdo con las secciones geológicas, estos estratos en el subsuelo del sector de La Carbonera corresponden a los siguientes grupos de materiales: Coluvión, Suelo residual, Arcilla Negra Dura, Arenisca, Arcillolita y Material Deslizado

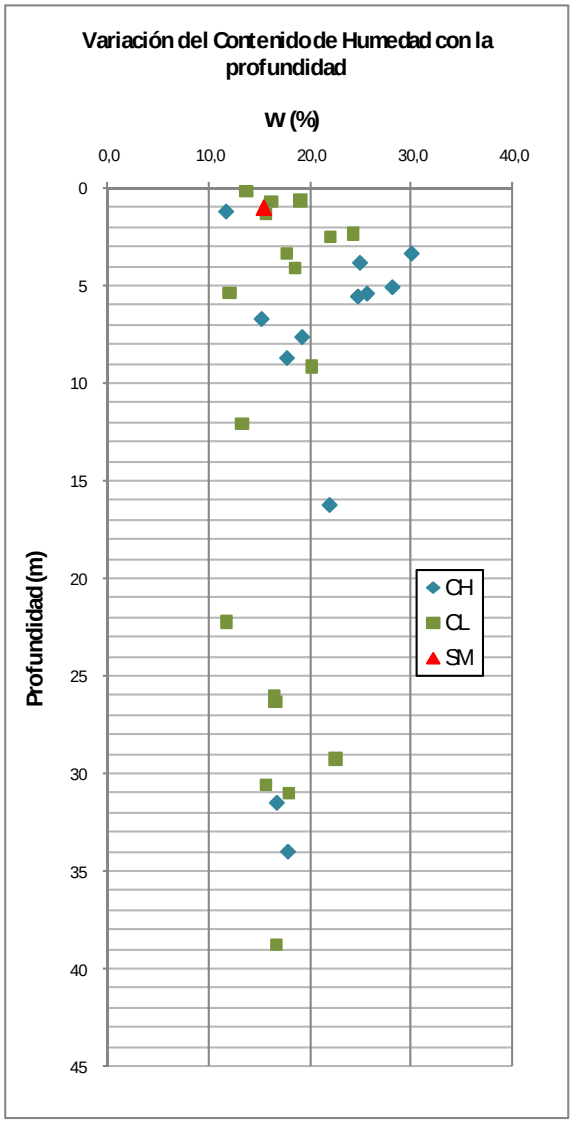


Figura 9-2. Variación de la humedad con la profundidad, sector La Carbonera

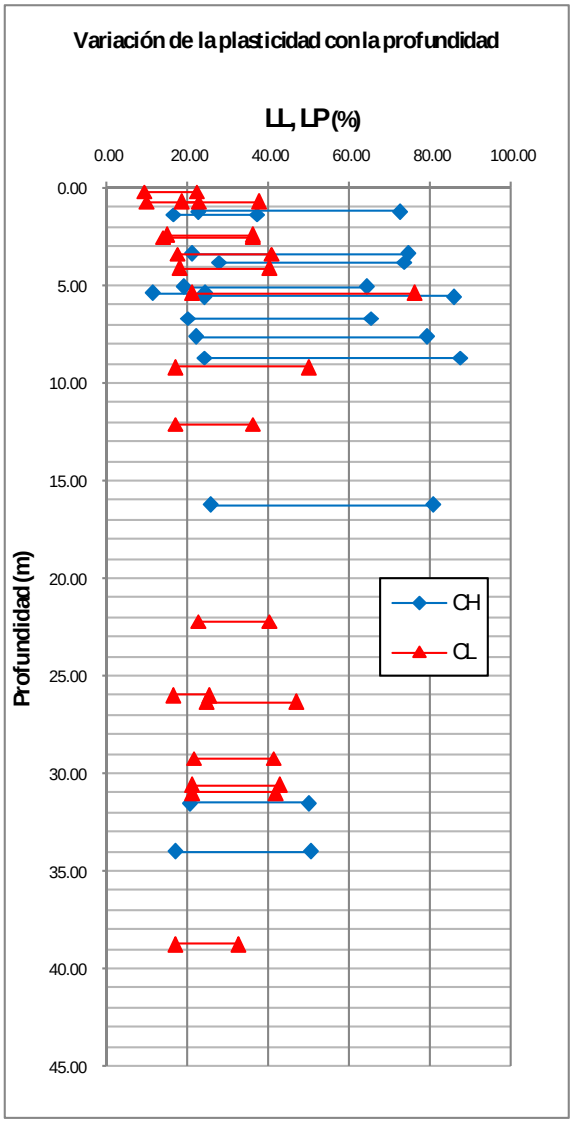


Figura 9-3. Variación de la plasticidad con la profundidad, sector La Carbonera

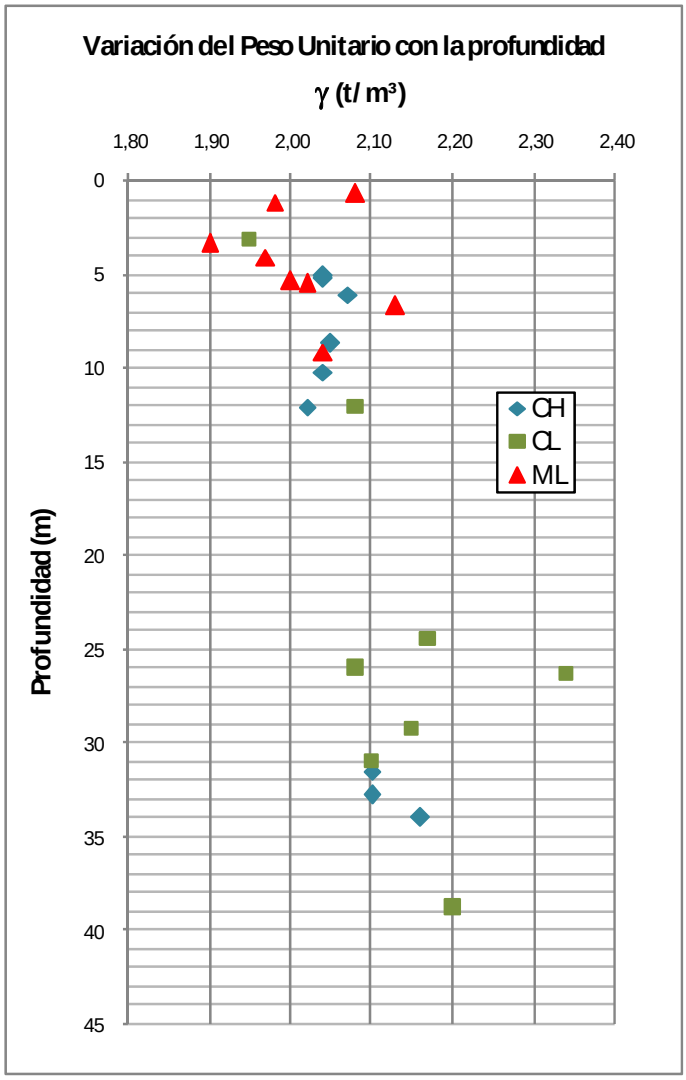


Figura 9-4. Variación del peso unitario con la profundidad sector La Carbonera

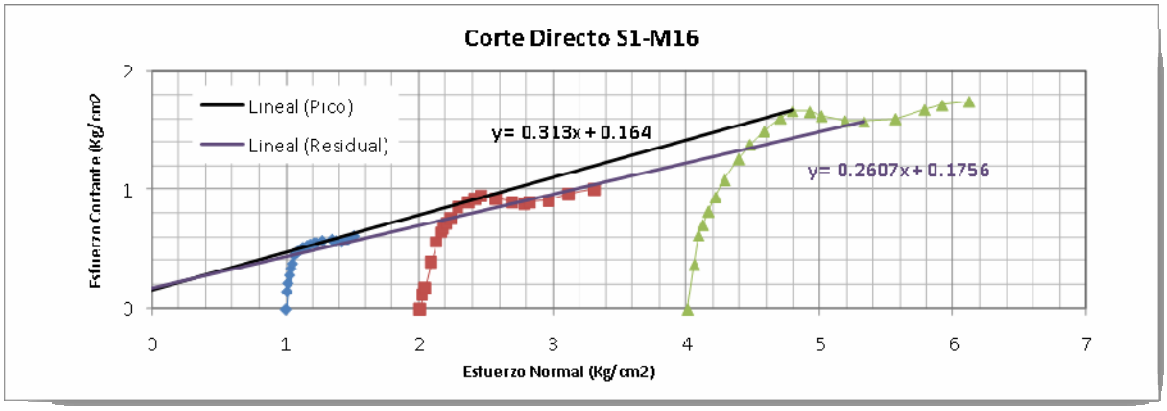


Figura 9-5. Resultados Corte Directo CAE1-M16. Arenisca

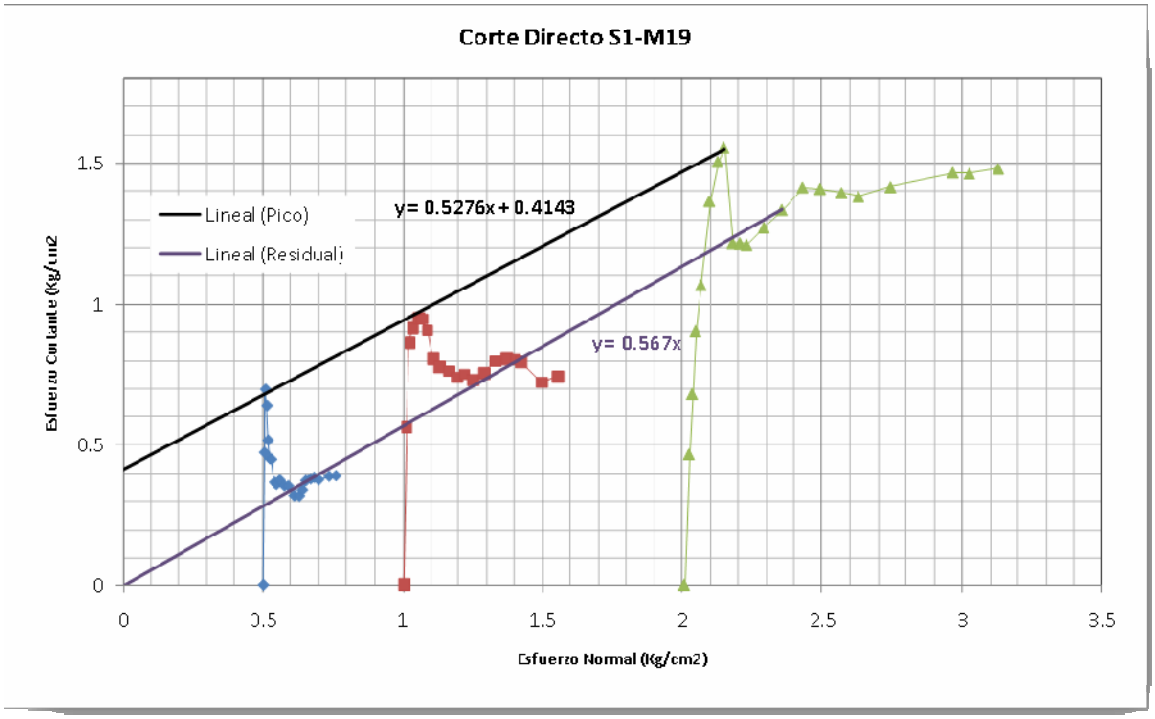


Figura 9-6. Resultados Corte Directo CAE1-M19. Arcillolita

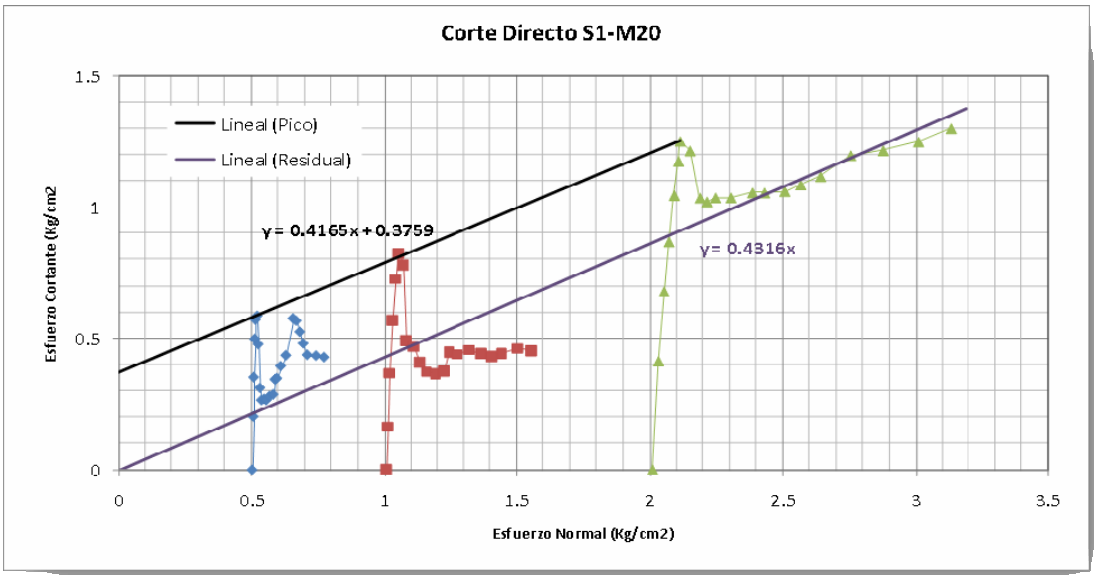


Figura 9-7. Resultados Corte Directo CAE1-M20. Arcillolita

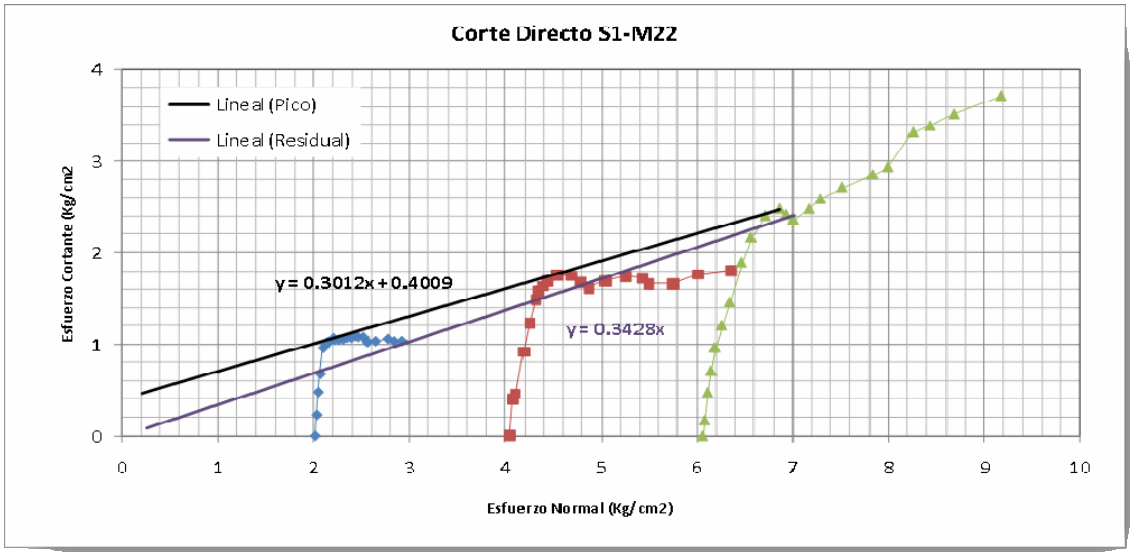


Figura 9-8. Resultados Corte Directo CAE1-M22. Arcillolita

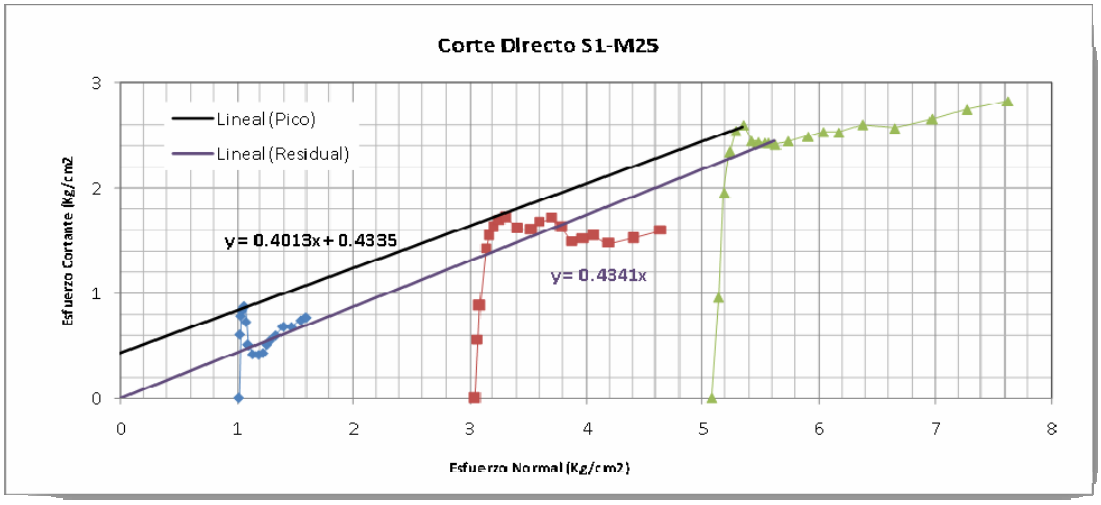


Figura 9-9. Resultados Corte Directo CAE1-M25. Arcillolita

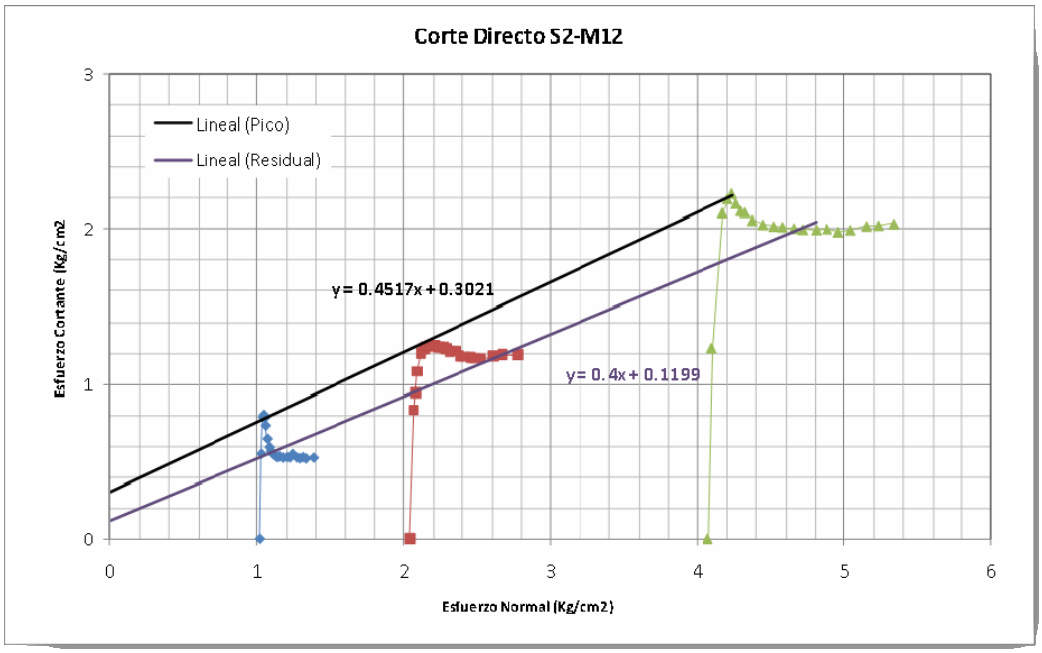


Figura 9-10. Resultados Corte Directo CAE2-M12. Arenisca

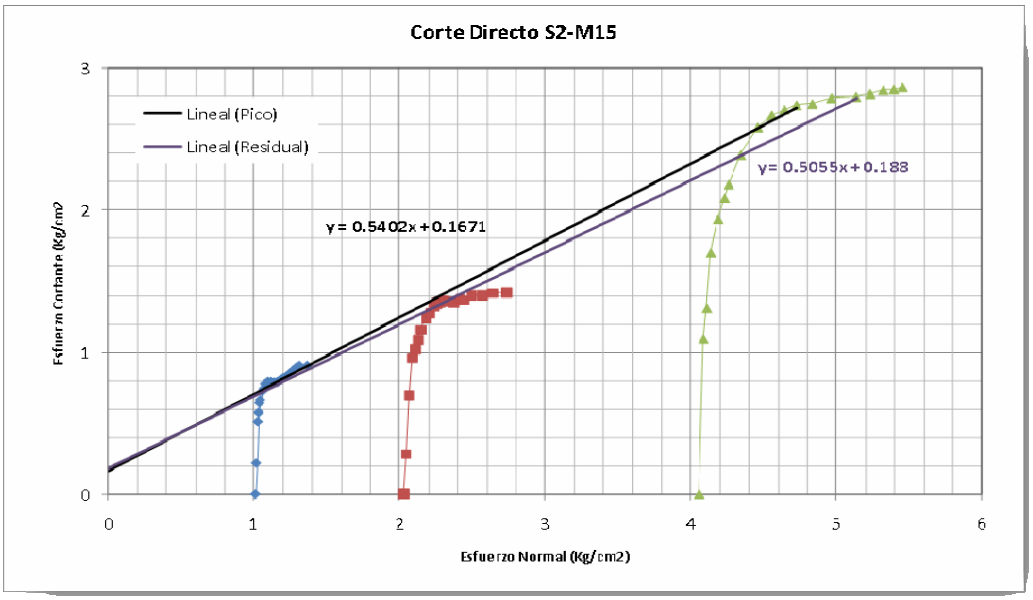


Figura 9-11. Resultados Corte Directo CAE2-M15. Arenisca

Con base en la clasificación anterior y el análisis de la variación de los parámetros (ver Anexo 3), a cada material se le asignaron los valores promedio y desviación estándar que se presentan en la **Tabla 9.1**. En este caso, sin embargo, el suelo residual de la arenisca se despreció en el análisis debido a que su espesor es poco significativo.

No obstante lo anterior, se debe tener en cuenta que los parámetros de los macizos rocosos difieren de aquellos del material rocoso. Por ello, para el caso de la Arenisca y la Arcillolita que se pueden considerar como macizos rocosos fracturados, en este estudio se prefirió emplear el método empírico conocido como Criterio General de Falla Hoek y Brown (Hoek et al, 2002; Hoek 2002). Este criterio considera la reducción de la resistencia del macizo rocoso por distintas condiciones geológicas mediante el Indice de Resistencia Geológica (GSI) y está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}\left(m_b\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

Donde m_b y s son constantes del material, m_b está dada por la siguiente expresión:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

Siendo s y a constantes del macizo rocoso definidas como:

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

Tabla 9-1. Parámetros de resistencia del material del Sector La Carbonera

Material	PARAMETRO				
	C'p (Ton/m2)	øp (°)	C'r (Ton/m2)	ø'r (°)	δt (Ton/m3)
Arcilla negra	3.95	25.2	0	26.5	2.10
Coluvión	0.9	27.3	SD	SD	2.0
Material deslizado	0.22	18	SD	SD	1.99
Arenisca	3.65	22.3	1.57	21.1	2.03
Arcillolita	4.15	19.4	0	21.2	2.18

Y D un factor que depende del grado de alteración de la masa rocosa debido a daños por voladuras y relajación de esfuerzos.

Para la obtención de los valores más representativos de la resistencia a la compresión uniaxial de la arcillolita en el sector de la Carbonera, se utilizó una distribución normal, encontrándose que la resistencia media es de aproximadamente 90 ton/m2 (ver **Figura 9.12**). Este valor es extremadamente bajo y muy posiblemente obedece a la fuerte alteración de las muestras durante el muestreo, transporte y manipulación en laboratorio. Unos análisis preliminares con estas resistencias arrojan resultados que indican una condición de falla de todo el talud rocoso aún sin agua, lo

cual no corresponde con lo que se observa en el terreno. Por ello, como se presenta en la **Tabla 9.3** (Parámetros de resistencia del material del Sector La Carbonera), se adoptó una resistencia correspondientes a un roca muy débil (ISRM, 1981), pero que se encontraría dentro del rango de valores de resistencia de este material como lo indica la **Figura 9.12**.

En cuanto a la arenisca, este material presentó una gran dispersión en los valores de carga puntual, lo cual motivo al uso de solamente los ensayos de compresión uniaxial. Los resultados ajustado a una distribución normal se ilustran en la **Figura 9.13**, encontrándose que la resistencia media de la arenisca es de aproximadamente 3264 t/m2.

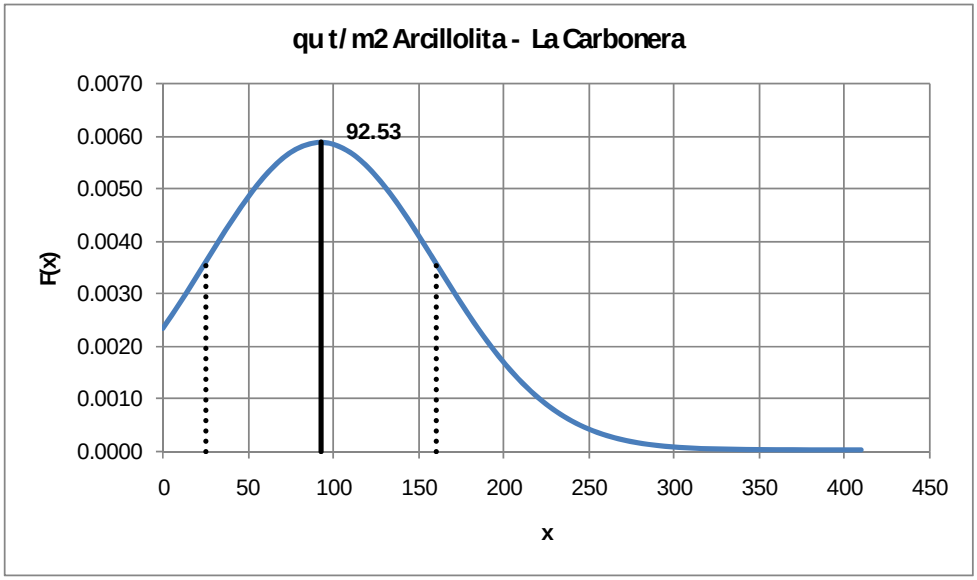


Figura 9-12. Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial de la arcillolita. Sector La Carbonera

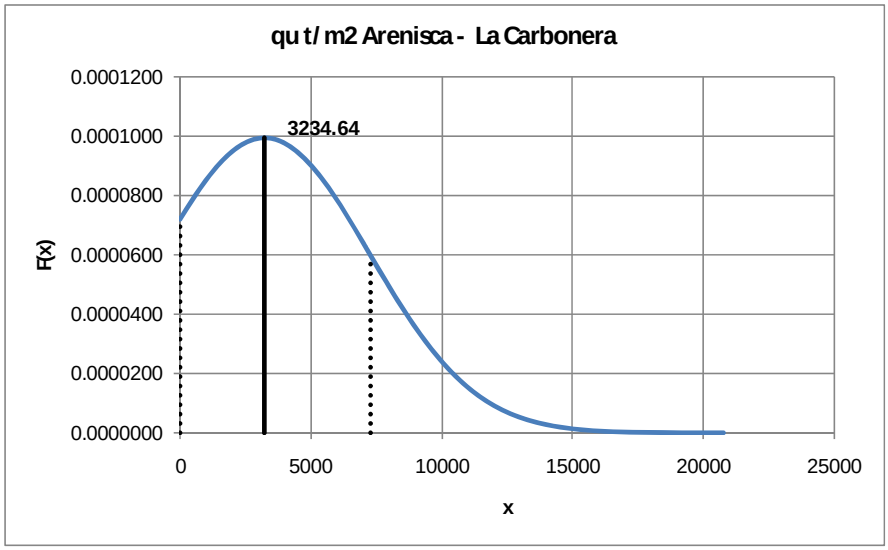


Figura 9-13. Ajuste a una distribución normal de los valores de resistencia a la compresión Uniaxial. Arenisca Sector La Carbonera

De acuerdo con lo anterior y el levantamiento de las columnas estratigráficas mostrado en el anexo 2, se encuentran los siguientes parámetros para las masas rocosas:

Tabla 9-2. Parámetros de macizos rocosos para criterio de falla de Hoek y Brown

MACIZO ROCOSO	PARAMETRO						
	GSI	σ_{ci} (kPa)	D	mb	mi	s	a
ARENISCA	50	32000	0.5	1.57186	17	0.0012726	0.505734
ARCILLOLITA	35	3000	0.2	0.379111	5	0.0004359	0.51595

9.2. SECTOR EL ESPINO

Para el sector de El Espino se procedió a analizar los datos de la misma manera a como se hizo con el sector de La Carbonera, organizando toda la información recopilada de estudios anteriores e incluyendo la obtenida en

este estudio. Se seleccionaron todas las muestras producto de la exploración del subsuelo, y se procedió a procesar la información recopilada. Los materiales fueron igualmente clasificados de acuerdo al sistema USCS y se exponen en la carta de plasticidad de Casagrande presentada en la Figura 9.14. Los datos de las series están organizados de acuerdo a su profundidad, escrita posterior al nombre de la perforación.

De esta figura se puede apreciar que sobre la zona de estudio se encuentra un primer depósito correspondiente a un relleno heterogéneo conformado por materiales arenosos, arcillosos y algunos limos. Este se encuentra hasta una profundidad aproximada de 3,5 m. Está representado por los símbolos triangulares en la carta de plasticidad.

En seguida aparece una capa donde predominan los materiales arcillosos de baja plasticidad y algunos limos. En general estos corresponden a limos arenosos y arenas arcillosas con algunos fragmentos de arenisca fracturada según las descripciones derivadas de los registros de perforación. Esta capa en promedio se encuentra hasta a unos 6,0 m de profundidad y está representada en la carta de plasticidad por las X. A partir de esta profundidad empieza a aparecer la intercalación de areniscas y arcillolitas, representada en la carta de plasticidad por los símbolos en forma de rombo. Esta secuencia de materiales presenta algunas variaciones en la plasticidad de los materiales señalando valores mayores para los depósitos de arcillolita y menores para las secuencias de areniscas.

Hacia los 18 a 20 metros, se detectó un lente de carbón representado por los símbolos cuadrados en la carta de plasticidad, el cual sirve como frontera entre la intercalación de areniscas arcillolitas y una secuencia de arcillolitas de consistencia firme que aparecen hasta el final de los registros,

alcanzando una profundidad máxima medida cercana a los 30 metros. Las arcillolitas están representadas en la carta de plasticidad mediante círculos y muestran características de plasticidad baja a media.

En cuanto a la humedad de los materiales presentes en sector de El Espino, se puede apreciar en la Figura 9.15, que en los primeros 5 metros hay diferentes tipos de material con valores de humedad desde muy bajos (10%) hasta valores cercanos al 40%. Estos valores se dan para los materiales correspondientes al relleno heterogéneo conformado por limos, arcillas y algunas arenas. A medida que se avanza en profundidad, los valores de humedad se tienden a concentrar alrededor del 15 y el 20% en materiales arcillosos de alta y baja plasticidad, y algunos materiales de carácter arenoso, hasta aproximadamente los 18 m de profundidad. A partir de este punto, los valores de humedad corresponden a los más bajos en materiales de consistencia arcillosa, y ya no se encuentran materiales arenosos.

En lo que respecta a la plasticidad, como se puede apreciar en la **Figura 9.16**, para el sector de El Espino, los materiales con mayor plasticidad se encuentran ubicados en las primeras capas de material, y son de alguna manera correspondientes con los que presentan una mayor humedad, como se puede observar en la **Figura 9.15**. Predominan en los primeros 10m los materiales arcillosos y la plasticidad disminuye conforme se avanza en profundidad.

Por su parte, los materiales presentan una variación del peso unitario con la profundidad como se muestra en la **Figura 9.17**. Los materiales de menor densidad se encuentran en los primeros 5 m de profundidad y corresponden a materiales heterogéneos dentro de los que se incluyen limos, y arcillas. Aproximadamente a una profundidad entre los 8 y los 15 m se encuentra

una capa conformada por diferentes tipos de material, correspondientes a la intercalación de areniscas y arcillolitas con pesos unitarios bastante altos para las areniscas (cercanos a las 2,3 t/m³) y para las arcillolitas se encuentran valores en promedio de 2,1 t/m³. Ya sobre el estrato de arcillolita, se observa que tanto para los materiales de alta y baja plasticidad, en general se presenta una tendencia al incremento en los valores de peso unitario con la profundidad, alcanzando un valor máximo medido de 2,3t/m³ para la profundidad máxima alcanzada cercana a los 30 m.

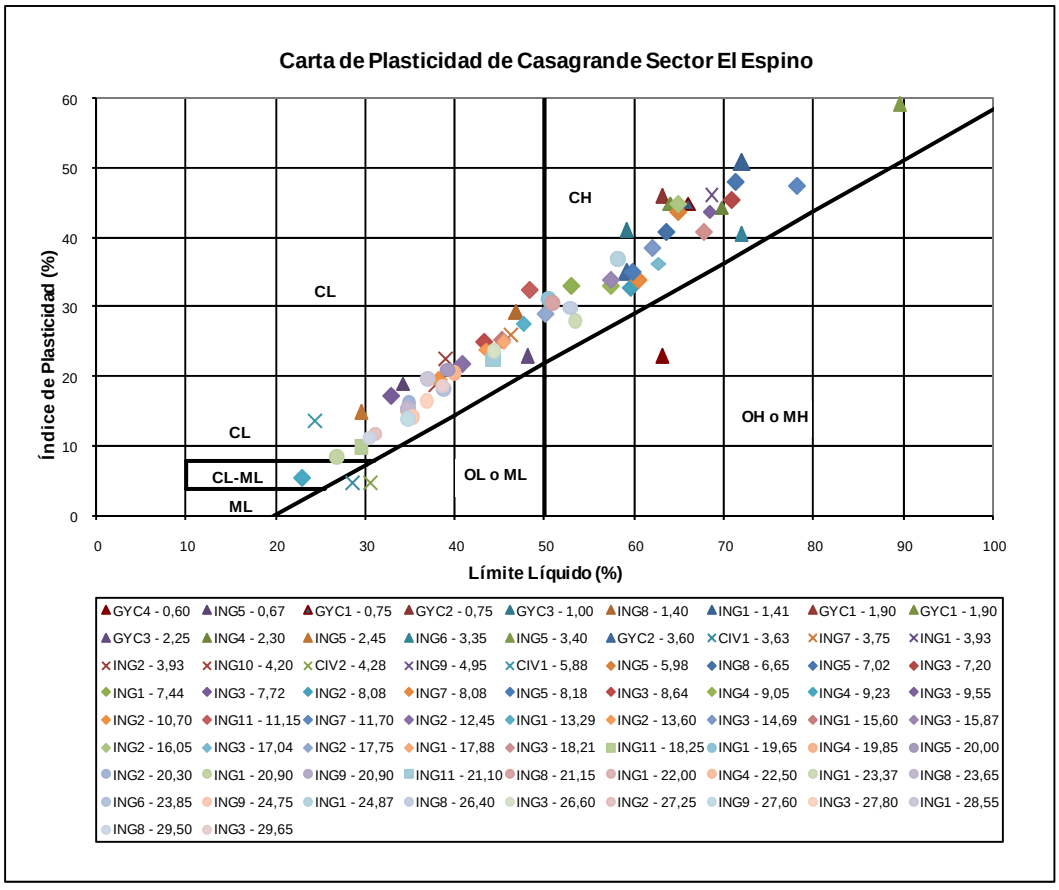


Figura 9-14. Clasificación de suelos según la Carta de Plasticidad de Casagrande. Sector El Espino

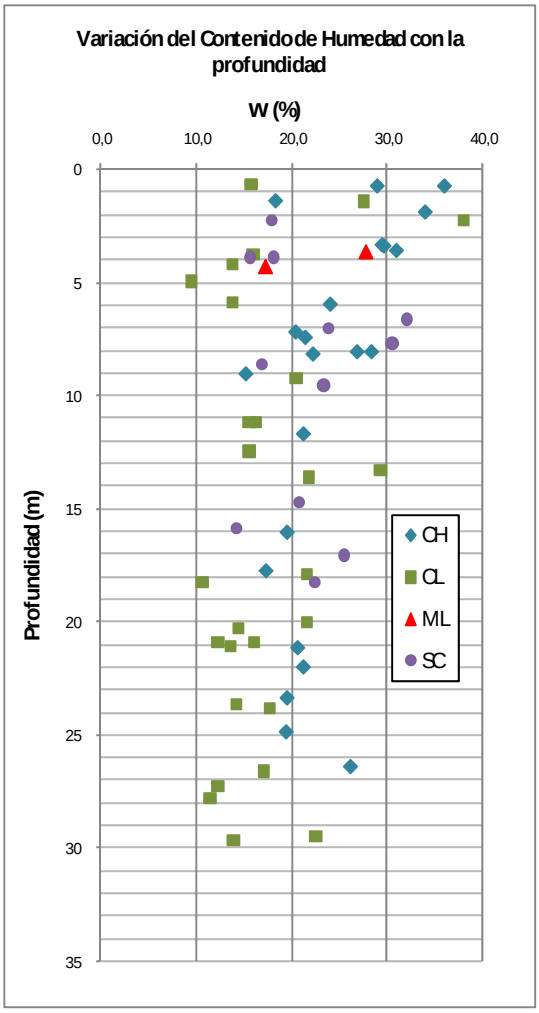


Figura 9-15. Variación de la humedad con la profundidad, sector El Espino

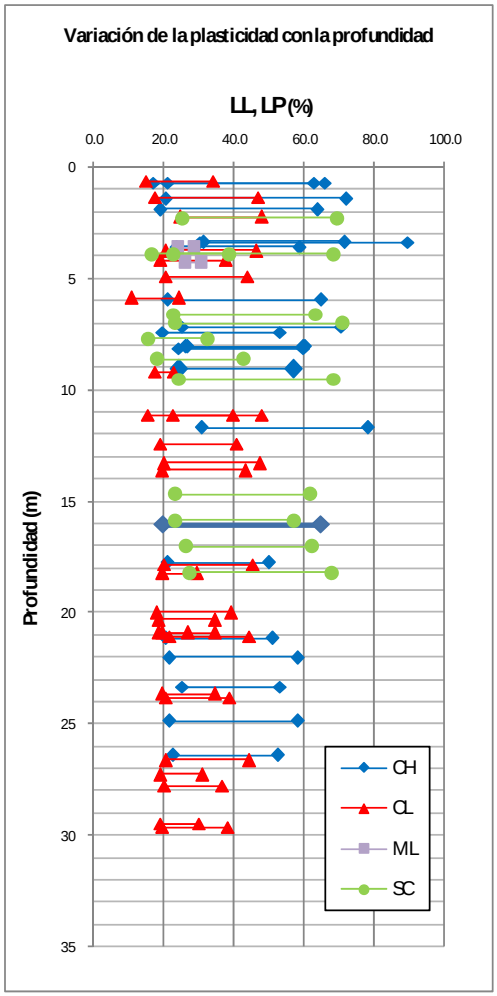


Figura 9-16. Variación de la plasticidad con la profundidad sector El Espino

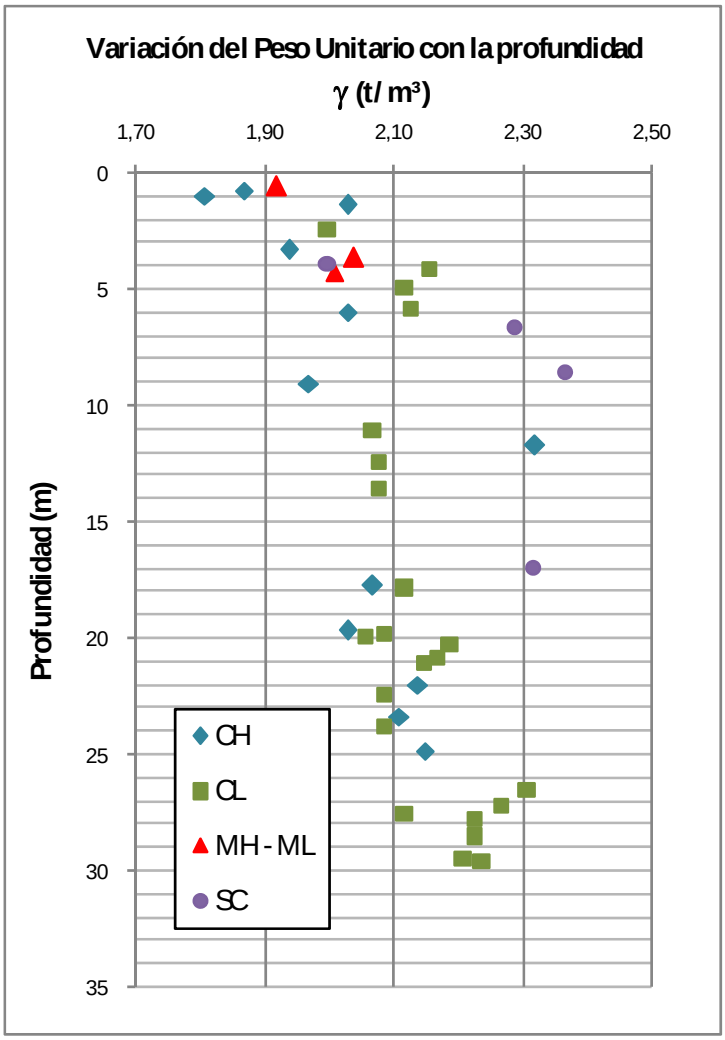


Figura 9-17. Variación del peso unitario con la profundidad sector El Espino

Con respecto a la resistencia de los materiales, de la **Figura 9.18** a la **Figura 9.20** se presentan los resultados de los ensayos de corte directo efectuados por el Consorcio para este estudio.

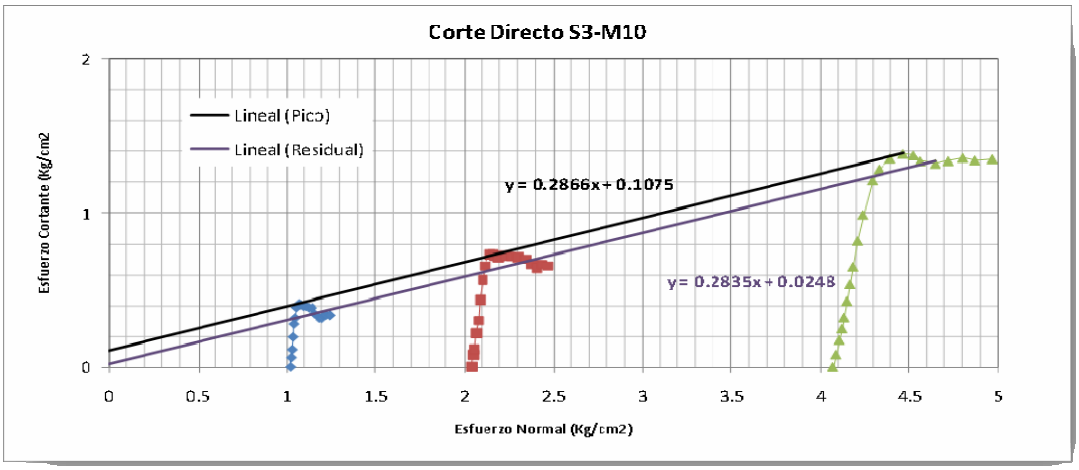


Figura 9-18. Resultados Corte Directo CAE3-M10. Arenisca

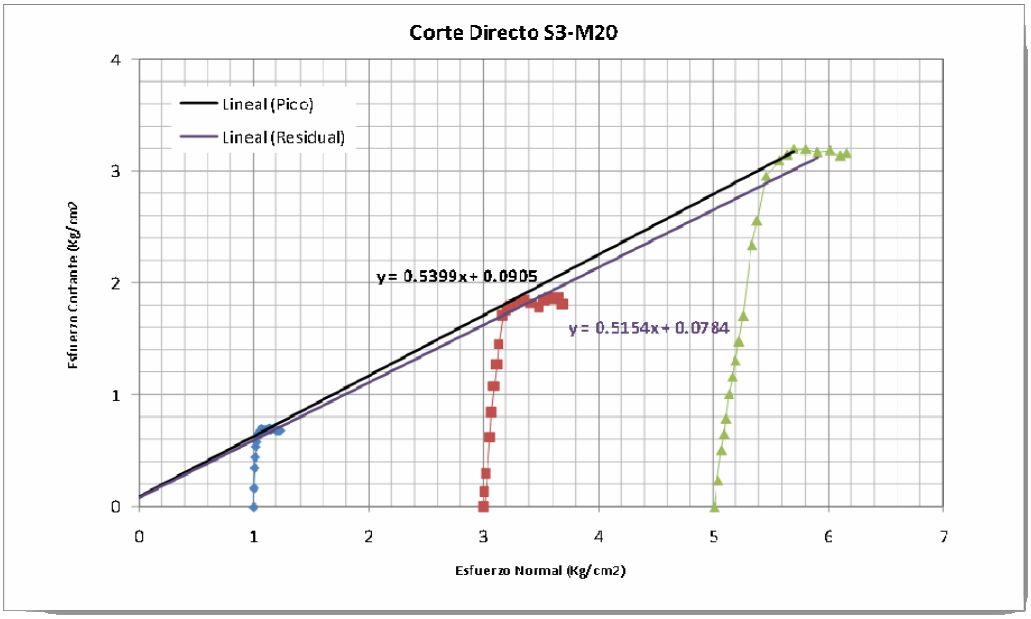


Figura 9-19. Resultados Corte Directo CAE3-M20. Arenisca

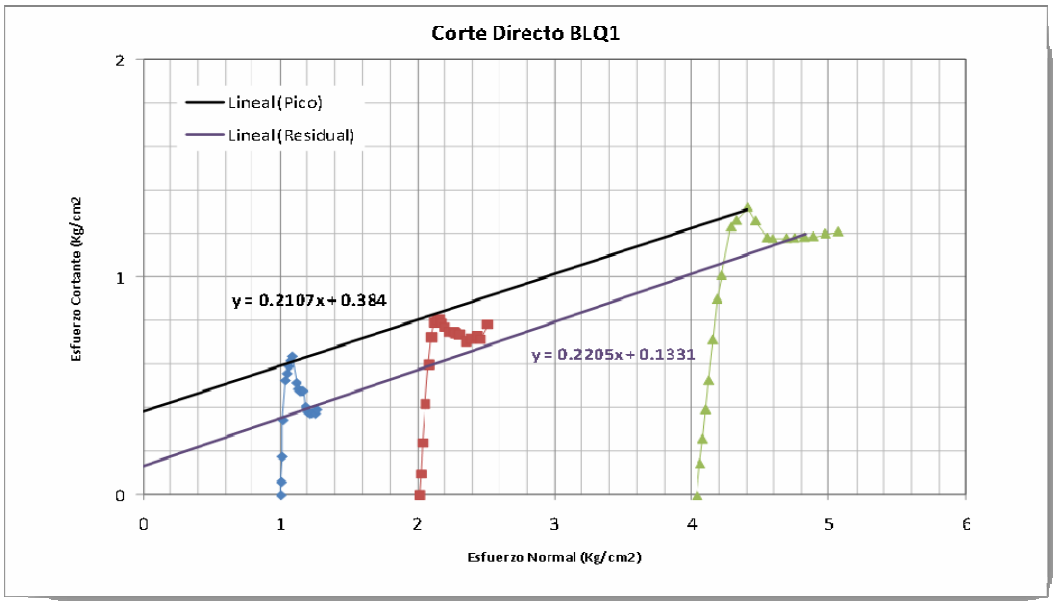


Figura 9-20. Resultados Corte Directo BLQ1. Arcillolita

De los cortes directos efectuados en el sector de El Espino, no se puede inferir de antemano un comportamiento definido ni de la arenisca ni de la arcillolita dado el limitado número de datos. Si se observa las figuras anteriores se puede observar que uno de los cortes en la arenisca muestra un comportamiento relativamente satisfactorio en términos de resistencia mientras que el otro señala parámetros de resistencia bastante bajos. Por su parte, la arcillolita muestra características de resistencia mayores en comparación con la arenisca.

Al analizar los datos en conjunto, incorporando los resultados obtenidos en otros estudios, se logrará efectuar una completa caracterización de cada uno de los depósitos de roca, como se explica a continuación.

9.2.1. Caracterización de unidades geotecnicas según los parámetros geomecánicos

Al igual a como se efectuó en el sector de La Carbonera, se procedió para El Espino a clasificar los materiales de acuerdo a su condición geotécnica. De esta manera a cada material se le asignaron los valores promedio y desviación estándar se presentan en la **Tabla 9.5.**

Tabla 9-3. Parámetros de resistencia del material del Sector La Carbonera

		Parámetro					
		Valor	c'p (Ton/m²)	ϕ'p (°)	c'r (Ton/m²)	ϕ'r (°)	γt (t/m³)
Material	Relleno Heterogéneo	Promedio	3,5	18,4	1,50	22,8	2,02
		Desviación	N.D.	N.D.	0,71	14,5	0,014
	Arenisca	Promedio	2,0	19,8	0,5	21,4	2,20
		Desviación	1,735	7,5	0,424	7,9	0,018
	Arcillolita	Promedio	8,1	31,7	1,49	28,0	2,17
		Desviación	5,714	11,5	1,99	7,6	0,112
	Material Deslizado	Promedio	1,76	27,0	N.C.	N.C.	1,89
		Desviación	0,078	N.D.	N.C.	N.C.	0,106

En cuanto a los parámetros del macizo rocoso, se procedió al igual que en el sector de La Carbonera, obteniendo los resultados presentados en la **Tabla 9.4**.

En este sector afloran rocas de la formación Guaduas, correspondientes a arcillolitas-lodolitas y areniscas. Aunque el macizo rocoso es similar al anterior, se realizaron ensayos de compresión inconfinada y carga puntual para la caracterización del material rocoso. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Para la arcillolita se contó con tres ensayos de compresión inconfinada en roca, siendo el valor promedio de 180.57 t/m2 (Figura 9.21).

Para este caso los parámetros utilizados para la obtención de la resistencia del macizo rocoso, fueron los siguientes: qu=180.57 t/m2, GSI= 45, mi=4, D=0.3. Los parámetros obtenidos mediante el programa RocLab, fueron los siguientes: c= 0.059 MPa, φ=19.50 (Figura 9.22). Nótese que los anteriores valores son relativamente bajos a consecuencia del intenso fracturamiento de la roca, tal como se explico en el capítulo de Geología.

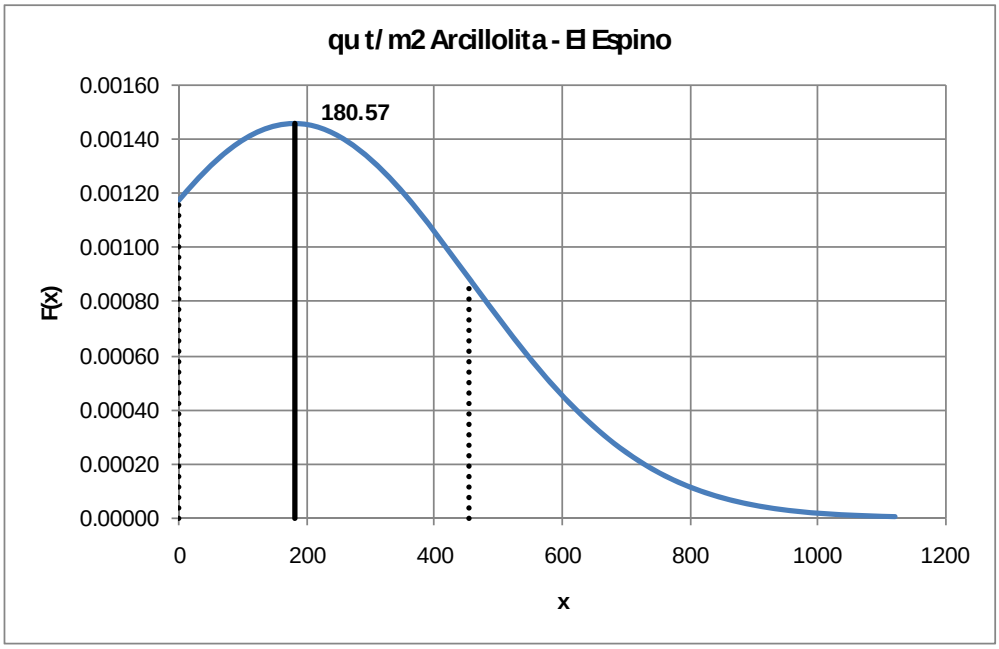


Figura 9-21. Ajuste a una distribución normal de los valores de resistencia a la compresión Uniaxial. Arcillolita Sector El Espino

Tabla 9-4. Resumen de ensayos sobre el macizo rocoso. Sector La Carbonera

Arriba del Escarpe

Nomenclatura	Sector	Coordenadas		Muestra			γ_t (Ton/m³)	γ_d (Ton/m³)	Compresión en Roca	I_{50} (Ton/m²)	Tipo
		Norte	Este	No.	de	a			q_u (Ton/m²)	Perp	
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	1.00	0.0	7.1	2.17	2		71.4	Arenisca
ING7	Espino-A	88793.89	98380.41	3.00	2.8	3.3	2.23			72.6	Arenisca
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	3.00	7.3	8.2				85.5	Arenisca
ING7	Espino-A	88793.89	98380.41	9.00	8.2	10.9	2.25			108	Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	3.00	0.8	2.2	2.48			136	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	2C	13.6	16.8	2.32			147.5	Arenisca
ING7	Espino-A	88793.89	98380.41	11.00	12.5	14.1	2.29			187.4	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	2A	8.4	11.2	2.27			190.1	Arenisca
ING7	Espino-A	88793.89	98380.41	11.00	14.1	14.3	2.25	2.25		196.9	Arenisca
ING9	Espino-A	88948.86	98452.25	6.00	14.6	14.8	2.27			197.1	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	3.00	16.8	18.4	2.26			200.4	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	3B	20.0	21.6	2.23			215.4	Arenisca
ING9	Espino-A	88948.86	98452.25	7.00	15.2	15.6	2.24			232.9	Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	7.00	5.3	5.8	2.3			321.2	Arenisca
CAE3	Espino-A	88740.77	98543.79	20.00	17.2	18.1	2.27			353.7	Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	5.00	2.7	3.3	2.29	1.79		371.2	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	2B	11.2	13.6	2.35			394.5	Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	11.00	7.2	8.1	2.45			419.9	Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	3A	18.4	20.0	2.32			473.6	Arenisca
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	6.00	14.1	15.3				499.3	Arenisca
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	4.00	10.6	12.6	2.31			517.2	Arenisca
IGR4	Espino-A	88667.33	98496.78	18.00	15.5	16.5				553.3	Arenisca
IGR4	Espino-A	88667.33	98496.78	13.00	11.5	12.5				645.5	Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	14.00	11.4	15.4	2.42			726.5	Arenisca
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	8.00	18.8	21.4	2.35			795.2	Arenisca
CAE3	Espino-A	88740.77	98543.79	9.00	8.5	9.5	2.285		8750.6		Arenisca
CAE3	Espino-A	88740.77	98543.79	13.00	11.6	12.4	2.258		7725		Arenisca
CAE3	Espino-A	88740.77	98543.79	18.00	15.6	16.3	2.282		7521.5		Arenisca
ING5	Espino-A	88971.33	98503.22	16.00	18.5	21.5	2.06	1.69			Arcillolita
CAE3	Espino-A	88740.77	98543.79	19.00	16.3	17.2	2.254		5736.5		Arenisca
IGR4	Espino-A	88667.33	98496.78	20.00	17.4	19.0	2.28	2.24			Arenisca
IGR4	Espino-A	88667.33	98496.78	21.00	19.0	20.5	2.26		9469		Arenisca
ING6	Espino-A	88876.60	98440.93	4.00	21.6	26.1	2.09	1.77			Arcillolita
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	9.00	25.8	27.4	2.31	1.97			Arcillolita
ING9	Espino-A	88948.86	98452.25	10.00	26.0	26.5	2.17		22.4		Arcillolita
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	11.00	27.6	28.0	2.23	2			Arcillolita
ING3	Espino-A	88872.41	98588.12	13.00	28.9	30.4	2.24	1.96			Arcillolita

Abajo del Escarpe

Nomenclatura	Sector	Coordenadas		Muestra			γ_t (Ton/m³)	γ_d (Ton/m³)	Compresión en Roca	I_{50} (Ton/m²)	Tipo
		Norte	Este	No.	de	a			q_u (Ton/m²)	Perp	
ING10	Espino	89164.879	98827.361	1	4	4.4	2.16	1.9			Arcillolita Remoldeada
ING2	Espino	89034.457	98633.776	4	7.65	8.5	2.62			318.8	Arcillolita Remoldeada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	8	8.9	9.2	1,97	1.71			Arcillolita Remoldeada
ING11	Espino	89034.457	98633.776	3	9.5	9.6	2.41			399.1	Arcillolita Remoldeada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	6	11	11.3	2.07	1.79			Arcillolita Remoldeada
ING2	Espino	89034.457	98633.776	7	12.1	12.8	2.08	1.8			Arcillolita Remoldeada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	7	12.5	13	2.14	1.89			Arcillolita Remoldeada
ING2	Espino	89034.457	98633.776	8	12.8	14.4	2.08	1.71			Arcillolita Remoldeada
ING10	Espino	89164.879	98827.361	4	13.4	13.8	2.28	2.13			Arcillolita Remoldeada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	10	20	20.4	2.17	1.91	22.4		Arcillolita Remoldeada
BLQ1	Espino						2.11	2.036	496.9		Arcillolita Remoldeada
ING8	Espino	89109.1	98449.261	2	2.3	3.7	2.19			144.2	Arenisca Fracturada
ING8	Espino	89109.1	98449.261	5	14.9	16.9	2.42			208.5	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	17	20.7	21.2	2.36			254	Arenisca Fracturada
ING2	Espino	89034.457	98633.776	1	1.3	3.15	2.31			335	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	14	16.3	19.2	2.3			350.4	Arenisca Fracturada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	2	5.4	5.7	2.26			384.01	Arenisca Fracturada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	4	10.2	10.4	2.3			401.39	Arenisca Fracturada
ING1	Espino	89068.09	98696.071	8	7.63	9.8	2.35			408.2	Arenisca Fracturada
ING8	Espino	89109.1	98449.261	4	9.6	14.9	2.2			437.7	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	12	10.9	12.85	2.37			490.6	Arenisca Fracturada
ING10	Espino	89164.879	98827.361	3	9.5	9.8	2.39			538.66	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746		12.85	13.28				552.4	Arenisca Fracturada
ING11	Espino	89443.565	98662.081	1	3	3.4	2.21			578.54	Arenisca Fracturada
ING8	Espino	89109.1	98449.261	6	16.9	19.9				588.1	Arenisca Fracturada
ING2	Espino	89034.457	98633.776	3	4.7	7.65	2.24			671.4	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	5	8.36	8.6	2.45			687.8	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	11	10	10.9	2.23			689.9	Arenisca Fracturada
ING4	Espino	89045.946	98508.746	10	9.25	10	2.46			712.5	Arenisca Fracturada
ING1	Espino	89068.09	98696.071	5	4.5	5.05	2.02			794.9	Arenisca Fracturada
ING1	Espino	89068.09	98696.071	6	5.05	7.25	2.29			837	Arenisca Fracturada
ING1	Espino	89068.09	98696.071	9	9.8	12.22	2.23			943.6	Arenisca Fracturada

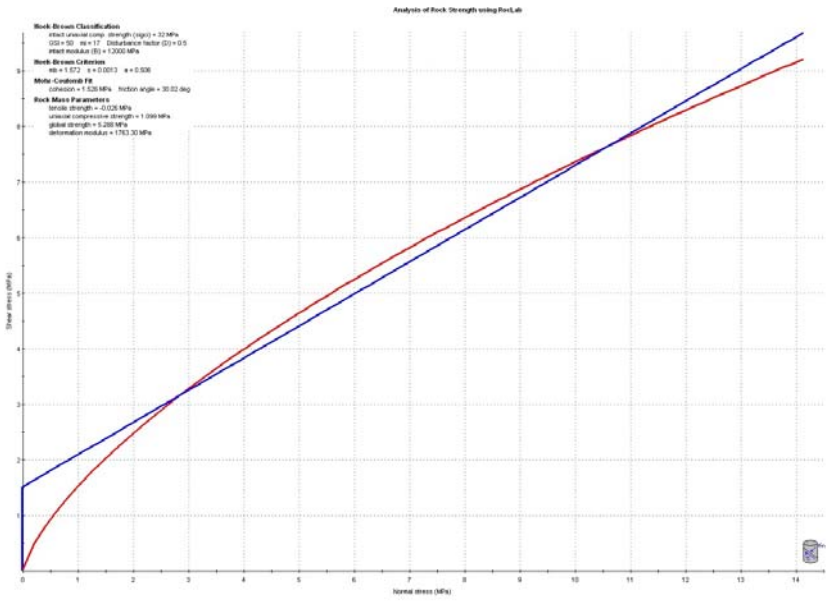


Figura 9-22. Envolvente de resistencia del macizo rocoso, Arcillolita sector El Espino

En el caso de la arenisca la distribución de los valores de compresión uniaxial se ilustra en la **Figura 9.23**, donde se observa que la resistencia máxima es de 7077 t/m2 (70.8 MPa). Los parámetros utilizados fueron los siguientes: GSI = 50, mi = 17, D = 0.5. A partir de los anteriores valores se obtuvo la envolvente de resistencia del macizo rocoso, la cual se presenta en la **Figura 9.24**, los parámetros de resistencia de Mohr –Coulomb, se presentan en color azul, obteniéndose: c = 3.4 MPa, φ= 30o. Estos parámetros son relativamente altos, lo cual conlleva a que los estratos más estables corresponde a la arcillolita, es decir medidas de mitigación tipo anclajes deberán en lo posible quedar embebidos en este estrato.

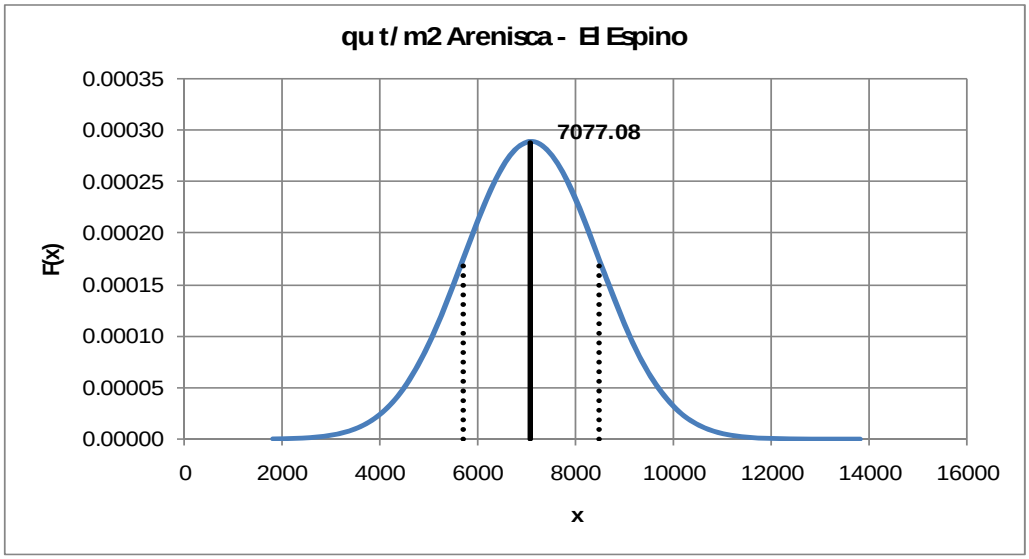


Figura 9-23. Distribución de la resistencia a la compresión uniaxial, Arenisca sector El Espino.

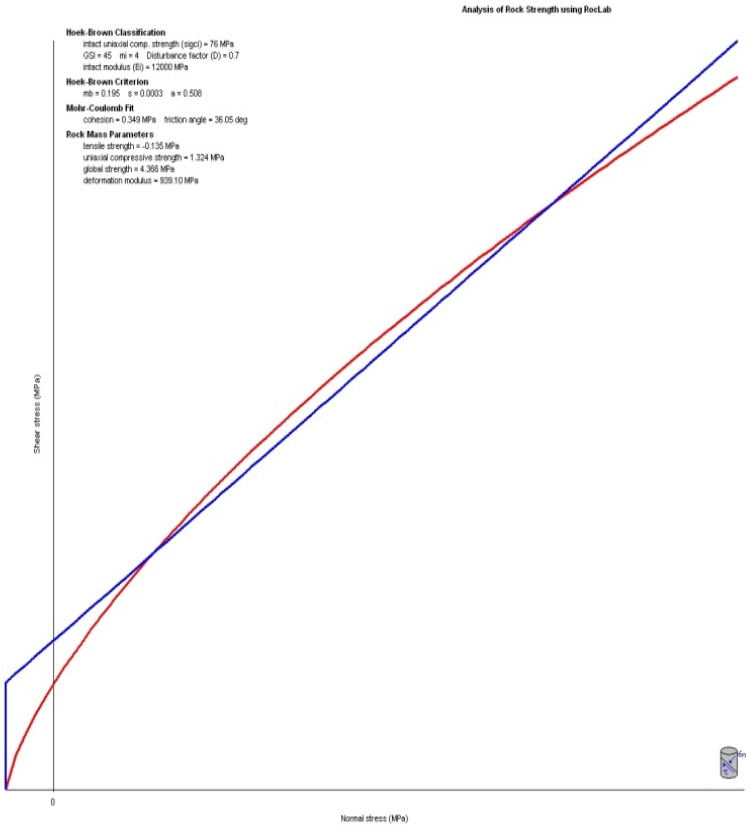


Figura 9-24. Envolvente de resistencia Arenisca, sector El Espino

10. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

En el presente capítulo se presentan los análisis estabilidad de las laderas que conforman los sectores del Espino y la Carbonera, para lo cual se hará uso de la información geológica, geomorfológica, hidrogeológica, y la caracterización geotécnica de los materiales y macizos rocosos previamente expuesta. Para ello, se consideran diferentes escenarios de análisis. En el **Plano 9** Análisis de Amenaza situación actual se presenta la planta y perfiles y en el **Anexo 4** el cálculo de memorias, particularmente los que tienen que ver con las condiciones del agua subterránea y fuerza sísmica. En la tabla 10.1 se presenta el resumen de los análisis de estabilidad de taludes con las obras de mitigación propuestas.

Tabla 10-1Resumen de los factores de seguridad de taludes con las obras de mitigación propuestas.

CONDICION DE ANALISIS	PERFIL	FACTOR SEG.
1. Situación Actual – Condición Normal	La Carbonera – DZ1	1.241
2. Situación Actual – Condición Extrema	La Carbonera – DZ1	0.773
3. Situación Actual – Condición Normal	La Carbonera – DZ2	1.035
4. Situación Actual – Condición Extrema	La Carbonera – DZ2	0.646
5. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior	La Carbonera – DZ2	1.490
6. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Alternativa 1	La Carbonera – DZ2	1.329
7. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Alternativa 2	La Carbonera – DZ2	1.026
8. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Inferior	La Carbonera – DZ2	1.440

CONDICION DE ANALISIS	PERFIL	FACTOR SEG.
9. Situación Actual – Condición Normal	La Carbonera – DZ3	0.987
10. Situación Actual – Condición Extrema	La Carbonera – DZ3	0.674
11. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior	La Carbonera – DZ3	1.332
13. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Alternativa 1	La Carbonera – DZ3	1.329
14. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Alternativa 2	La Carbonera – DZ3	1.025
15. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Inferior	La Carbonera – DZ3	1.389
16 Situación Actual – Condición Normal – Falla Tipo Circular	El Espino – E	1.047
17. Situación Actual – Condición Normal – Falla Tipo No Circular	El Espino – E	0.898
18. Situación Actual – Condición Extrema – Falla Tipo Circular	El Espino – E	0.618
19. Situación Actual – Condición Extrema – Falla Tipo No Circular	El Espino – E	0.585
20. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior – Falla Tipo Circular	El Espino – E	1.411
21. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior – Falla Tipo No Circular	El Espino – E	1.482
22. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Falla Tipo Circular – Alternativa 1	El Espino – E	1.328
23. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Falla Tipo Circular – Alternativa 2	El Espino – E	1.173
24. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Inferior – Falla Tipo Circular	El Espino – E	1.481

CONDICION DE ANALISIS	PERFIL	FACTOR SEG.
25. Situación Actual – Condición Normal – Falla Tipo Circular	El Espino – L	1.053
26. Situación Actual – Condición Normal – Falla Tipo No Circular	El Espino – L	1.232
27. Situación Actual – Condición Extrema – Falla Tipo Circular	El Espino – L	0.689
28. Situación Actual – Condición Extrema – Falla Tipo No Circular – Alternativa 1	El Espino – L	1.086
29. Situación Actual – Condición Extrema – Falla Tipo No Circular – Alternativa 2	El Espino – L	0.714
30. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior – Falla Tipo Circular	El Espino – L	1.441
31. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Superior – Falla Tipo No Circular	El Espino – L	1.157
32. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Falla Tipo Circular – Alternativa 1	El Espino – L	1.941
33. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Intermedio – Falla Tipo Circular – Alternativa 2	El Espino – L	1.191
34. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Sector Inferior – Falla Tipo Circular	El Espino – L	1.677
35. Obras de Mitigación – Condición Extrema – Falla Tipo No Circular	El Espino – M	1.602

10.1. CRITERIOS GENERALES

10.1.1. Secciones de análisis

Para efectos del análisis de la estabilidad se escogieron las secciones más representativas de cada sector. De esta manera, se emplearon las siguientes secciones para cada sector (ver **Figura 10 -1**):

Tabla 10-2. Secciones de análisis empleadas

Sector La Carbonera	Sector El Espino
DZC-DZ1	E-E
DZC-DZ2	K-K
DZC-DZ3	L-L

Las secciones correspondientes al sector de La Carbonera buscaron poder evaluar la estabilidad en el sentido del movimiento, que para este caso corresponde a la dirección desde la parte alta de la ladera, hacia la confluencia de las quebradas Santo Domingo y La Carbonera. Como se describió en la Geomorfología, esta zona está caracterizada por 3 cuerpos principales de movimiento identificados como DZ1, DZ2 y DZ3, de manera que cada sección se escogió aproximadamente siguiendo la parte central de cada uno de estos movimientos.

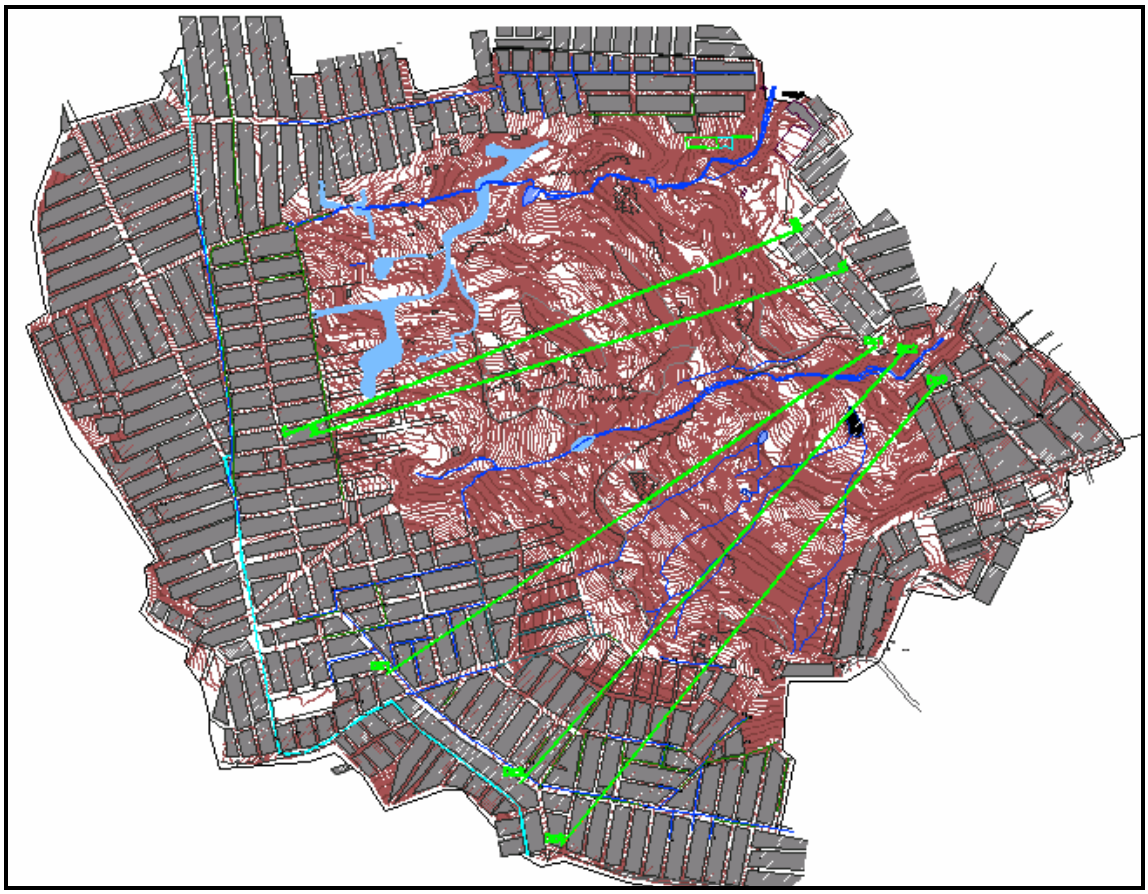


Figura 10-1. Secciones para análisis de estabilidad

Para el sector de El Espino se analizó la tendencia principal del movimiento en dirección de la pendiente, desde la parte alta a la parte baja más baja. Este análisis se efectuó empleando la sección E-E. Para esta sección se analizó como mecanismo de falla principal el de tipo traslacional. Adicionalmente se evaluaron el mecanismo de falla rotacional presente en los materiales de tipo superficial que se encuentran en dirección a las quebradas. Para este efecto se analizó la sección K-K. En cuanto al problema presentado en el barrio San Rafael, éste se analizó empleando la sección L-L.

10.1.2. Aceleración sísmica

La zona de estudio se encuentra localizada dentro de la microzona de Cerros a la que según el decreto de Microzonificación Sísmica de Bogotá, se le debe asignar un valor de aceleración sísmica Am = 0,24g. Sin embargo, para efectos de este estudio y en consenso con La Interventoría y la DPAE en reunión de 11 de Abril de 2008 se acordó utilizar una aceleración correspondiente a 2/3 Am, es decir 0,16g.

Basados en la Resolución 227 -06 Por la cual se adoptan los términos de referencia para la ejecución de estudios detallados de amenaza y riesgo por fenómenos de remoción en masa para proyectos urbanísticos y de construcción de edificaciones en Bogotá D.C. El numeral 3.4 hace referencia al ANÁLISIS DE ESTABILIDAD – EVALUACIÓN DE AMENAZA donde:

La evaluación de la amenaza se deberá realizar para los siguientes escenarios:

1. Para la situación actual y para los procesos de remoción en masa identificados como parte del modelo geológico – geotécnico propuesto para los distintos sectores, bajo las condiciones normales y extremas de niveles de agua, (ver numeral 3.2.1.3.) y de sismo a las que podrá estar expuesta el área de estudio. La aceleración crítica a ser considerada en los análisis de tipo pseudo-estático deberá estar de acuerdo con el numeral 3.2.1.5. y no podrá ser menor a 2/3 de la aceleración máxima (Am), debidamente justificada.

Esta reducción de la aceleración máxima establecida para el sitio, se justifica en el hecho de que los análisis seudo-estáticos de equilibrio limite como los empleados en este estudio, consideran el sismo como una carga permanente, cuando en realidad esta dura segundos o fracciones de segundo y por lo tanto tomar el valor total de la aceleración máxima puede ser demasiado conservador. En este sentido y para el caso de presas, por ejemplo, autores como Makdisi y Seed (1978), Hynes-Griffin y Franklin (1998) y Bray et al (1998), basados en observaciones de campo y retroanálisis, recomiendan factores de reducción de la aceleración sísmica que van desde 0.2 hasta 0.75 para factores de seguridad de uno, aunque con una reducción del 20% en la resistencia al corte no drenada. Por lo tanto, la

reducción del coeficiente de aceleración sísmica a 2/3 parece razonable para el caso de Altos de La Estancia.

10.1.3. Escenarios de análisis

Para los análisis de estabilidad en la situación actual, se establecieron las siguientes condiciones generales, aunque para cada sector se tienen algunas variaciones como se indica en los análisis de estabilidad:

a) Sin sismo y sin nivel freático, o con nivel normal de aguas
b) Sin Sismo y Nivel Freático Máximo.
c) Con Sismo y sin Nivel Freático
d) Con sismo y Nivel Freático Máximo

Con base en estos análisis se determina el requerimiento y el tipo de obras necesarias para estabilizar la zona de estudio, dados los mecanismos de falla y la susceptibilidad de los materiales presentes.

10.1.4. Método de análisis

Para el cálculo del factor de seguridad por deslizamiento se emplearon tres métodos de tajadas de equilibrio límite: el de Bishop Simplificado, el de Janbu Simplificado y el de Morgenstern y Price. Para ello se empleó el Software Slide de la firma canadiense RocScience.

10.2. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL SECTOR LA CARBONERA

10.2.1. Mecanismos de falla y susceptibilidad de los materiales

Para definir los mecanismos de falla y susceptibilidad de los materiales se tuvieron en cuenta las consideraciones expuestas en los estudios antecedentes en la zona, en conjunto con los aspectos mencionados en los informes geológicos y geomorfológicos presentados para este estudio. En

general, el mecanismo de falla que predomina en La Carbonera parece corresponder a un movimiento rotacional retrogresivo múltiple, el cual puede estar controlado parcialmente por la estratificación del macizo rocoso y quizá también por alguno de los estratos arcillosos débiles que lo conforman. Se estima que este mecanismo comenzó con las excavaciones mineras hacia el pie del cerro, avanzando ladera arriba con el tiempo y exacerbado por el deficiente manejo de aguas. Debido a este mecanismo, se tienen varios cuerpos de deslizamiento con múltiples superficies de falla y formas muy irregulares del terreno. Así, en superficie se observan zonas lobuladas, zonas planas, zonas inclinadas aproximadamente regulares y otras zonas con superficies muy irregulares. De igual manera, los distintos cuerpos exhiben diferentes condiciones de estabilidad, siendo la parte más activa la que corresponde a la cabeza de los movimientos. Todo ello indica que los análisis de estabilidad deben realizarse para mecanismos de falla tipo deslizamiento rotacional.

En general se esperaría que este mecanismo se siga repitiendo hacia arriba del actual escarpe principal y en algún momento alcance a afectar la denominada Fase III de la DPAE, aunque es muy difícil predecir en cuánto tiempo pueda ocurrir ello.

Como se detalla en el análisis morfodinámico, la dirección predominante del movimiento es hacia la confluencia de las quebradas Santo Domingo y La Carbonera. Así mismo, se identificaron tres cuerpos o tipos de movimientos que se denominaron DZ1, DZ2 y DZ3. El primero se localiza en el costado occidental del deslizamiento y se caracteriza por desarrollar una morfología irregular con la presencia de materiales blandos que forman múltiples escarpes y grietas semicirculares y transversales a la dirección del movimiento. Es el movimiento más superficial de los tres. El segundo, DZ2, se

encuentra en la parte central, es el de mayor profundidad y parece corresponder a la zona mas deprimida por acción de un antiguo deslizamiento que dejó un nicho de arranque en la parte alta de la ladera. Consta de fragmentos de roca, suelos y matriz arcillosa. La disposición de sus grietas es semicircular en la cabeza, semejando un movimiento rotacional, y tiende a ser longitudinal en el cuerpo y cerca de la pata. El tercero, DZ3, se caracteriza por desarrollar una estructura de deslizamiento de rocas que fueron removidas hace unos años dejando un piso de rocas fracturadas y con grietas diagonales a la dirección de movimientos.

En cuanto a la quebrada Santo Domingo, ésta ha presentado algunos levantamientos producto de los empujes hacia su parte media. En la parte alta ésta se ha mantenido estable, mientras que en su parte más baja se han presentado algunos hundimientos. Por otra parte se han evidenciado procesos erosivos en la parte baja de ésta quebrada al igual que en la de La Carbonera, dada la baja resistencia de los materiales a procesos denudativos. Así mismo, se identificaron rasgos de erosión lateral en las márgenes de la quebrada La Carbonera.

De acuerdo con lo anterior, el mecanismo de falla en este sector se caracteriza por:

- Mecanismo de falla de tipo rotacional con algún componente traslacional y carácter retrogresivo en el cuerpo del deslizamiento principal y algunos deslizamientos superficiales de la pata del movimiento en vecindad a las quebradas Santo Domingo y La Carbonera.
- Presencia de sistemas de grietas y escalonamientos perpendiculares a la dirección del movimiento.
- Superficies de falla que se pueden encontrar a lo largo del contacto entre el material deslizado y la unidad denominada Areniscas.
- Tres tipos de movimiento, todos con dirección hacia la confluencia de las quebradas Santo Domingo y La Carbonera
- Efectos de socavación de las márgenes de las quebradas

• Flujos de suelos del material localizado en inmediaciones de los cauces de las quebradas Santo Domingo y La Carbonera
• Alta Susceptibilidad de los materiales superficiales a procesos erosivos

10.2.2. Materiales y parámetros adoptados

Como se mencionó en el capítulo anterior, para efectos del análisis geotécnico, los materiales en la zona de La Carbonera se agruparon en los siguientes cinco tipos distribuídos en cada una de las secciones tal como se muestra en las **Figura 10.2, Figura 10.3, Figura 10.4 y en Anexo 4** cálculo de memorias**:**

Coluvión. Éste se caracteriza por ser un depósito de suelo inconsolidado, formado por bloques de areniscas cuarzosas amarillas de bordes subangulares, meteorizadas a poco meteorizadas, embebidas en una matriz predominantemente arcillosa, plástica, color crema amarillenta y en sectores grisácea. Se caracteriza por una alta densidad. Dado que este material se encuentra localizado arriba del escarpe principal, su modelación se hará con los valores de resistencia pico promedio obtenidos a partir de los ensayos de corte directo.

Arcilla Negra Dura. Este material se identificó inicialmente como un paleosuelo, pero posteriormente se lo asoció a un horizonte del macizo rocoso. Está compuesto por arcilla o arcilla limosa negra, ligeramente plástica a plástica, muy dura y algo orgánica.

Material Deslizado. Este material corresponde al suelo que conforma el deslizamiento. En general está compuesto por material proveniente del depósito fluvioglaciar, coluvión y suelo residual que en sectores se mezcla con bloques de arenisca arrastrada desde su base.

Arenisca. Corresponde al macizo de roca arenisca de grano medio a grueso de color amarillo, no cementada, con carácter friable al tacto, meteorizada a fresca, en bancos medios a gruesos, estratificación plano paralela inclinada en sentido de la pendiente, con presencia de diaclasamiento y con intercalaciones de limolitas y arcillolitas de diversos colores. Aparece por sectores en la zona arriba del escarpe principal y en la parte baja del

movimiento. Para efectos del análisis y dado su alto fracturamiento, en los parámetros de Hoek y Brown se le asignó un valor D=0.5.

Arcillolita. Dentro de este grupo se incluyen las dos familias de rocas arcillolitas que se identificaron en la zona del proyecto, tanto en el sector de La Carbonera como en el de El Espino. Una primer familia corresponde a las arcillolitas grises, crema y amarillentas, con finos niveles de arcilla limosa y limo arenoso, de consistencia blanda, aspecto masivo a finamente laminado, y una segunda correspondiente a las arcillolitas grises oscuras a negras carbonosas, masivas de consistencia baja a media fresca, húmedas a secas, en sectores oxidadas.

Con relación al suelo residual descrito en la Geología, este es de escaso espesor y tiene poca influencia en el mecanismo de falla presente en la zona, ya que corresponde a un delgado depósito superficial. Por lo tanto, éste se incluye simplemente como parte del material sobre el que se encuentre, no obstante que puede influir notablemente en el desarrollo de procesos erosivos.

En cuanto a los parámetros geotécnicos adoptados para cada material, estos se resúmen en la **Tabla 10.2** según la caracterización geotécnica del capítulo anterior.

Tabla 10-3. Parámetros de materiales para análisis de estabilidad de La Carbonera

MATERIAL	**PARAMETRO**						
SUELOS	C' (Ton/m^2)		ϕ' (^{o})		γt (Ton/m^3)		
Arcilla negra	3.95		25.2		2.1		
Coluvión	0.9		27.3		2		
Material deslizado	0.22		18		1.99		
MACIZO ROCOSO	GSI	σ_{ci} (kPa)	D	mb	mi	s	a
Arenisca	50	32000	0.5	1.57186	17	0.0012726	0.505734
Arcillolita	35	3000	0.2	0.379111	5	0.0004359	0.51595

10.2.3. Niveles freáticos

Para la definición de los niveles freáticos en el modelo geológico-geotécnico, se partió de la información encontrada en los estudios antecedentes y principalmente de las consideraciones expuestas en el Capítulo de Hidrogeología.

Para el sector de la Carbonera, se identificó que el macizo rocoso de la formación Guadalupe localizado en la parte alta de ladera era un material permeable con porosidad secundaria, lo que lo constituye en un acuífero potencial. Sin embargo, los depósitos coluviales y fluvioglaciar que se encuentran sobre este se clasificaron como depósitos de baja permeabilidad Por su parte, la arcillolita de la formación Guaduas, que se encuentra bajo toda la zona corresponde a un material impermeable. En cuanto a los materiales dentro del cuerpo del deslizamiento, éstos se caracterizan como materiales de alta permeabilidad, en particular los correspondientes a la arenisca, dado su alto grado de fracturamiento. Por su parte, los depósitos aluviales localizados en inmediaciones de las quebradas corresponden a materiales altamente permeables.

Por otro lado, para el modelo de flujo de toda la zona de estudio, se menciona que el intenso fracturamiento de los macizos de roca da lugar a flujos verticales. Sin embargo, cada sector maneja un modelo de flujo independiente, dado que la falla Rosales constituye una franja impermeable que evita que el flujo fluctúe de un sector a otro.

Revisando la información de precipitación de la zona se identificó que existe en ambas zonas un escaso aporte de infiltración por aguas lluvias y un alto aporte por parte de las aguas servidas al interior de los taludes.

En lo que respecta a la medición directa de niveles freáticos, ésta ha sido caótica y desordenada. Se han medido niveles bajos hacia la parte alta del sector de La Carbonera, los cuales van aumentando a medida que se desciende, llegando ser casi superficiales en la parte baja de la ladera. Sobre toda el área se han identificado algunos niveles colgados. Para este estudio en particular se detectaron algunos niveles variando de 3 a 12m de profundidad. En otras perforaciones no fueron detectados. Considerando que la zona de estudio presenta un régimen bimodal con lluvias de Marzo a Junio y de Octubre a Noviembre, y dado que las perforaciones se efectuaron durante el mes de Noviembre, puede concluirse que estos niveles corresponden a los más altos esperados de acuerdo al aporte de las lluvias.

De acuerdo con lo anterior, se estimaron los niveles freáticos más altos como aquellos que se muestran en las figuras **Figura 10.2, Figura 10.3 y Figura 10.4**, pero considerando que éstos corresponden a un cuerpo de agua colgado en la zona del deslizamiento, por encima del macizo de Arenisca. Arriba del escarpe principal, el nivel de agua indicaría simplemente un flujo de agua transitorio hacia el deslizamiento que no alcanzaría a saturar todo el macizo.

Con lo anterior quedaría entonces definido el modelo geológico-geotécnico para los análisis de estabilidad y diseño de obras, representado por las tres secciones de análisis que muestran la **Figura 10.2, Figura 10.3 y Figura 10.4.**

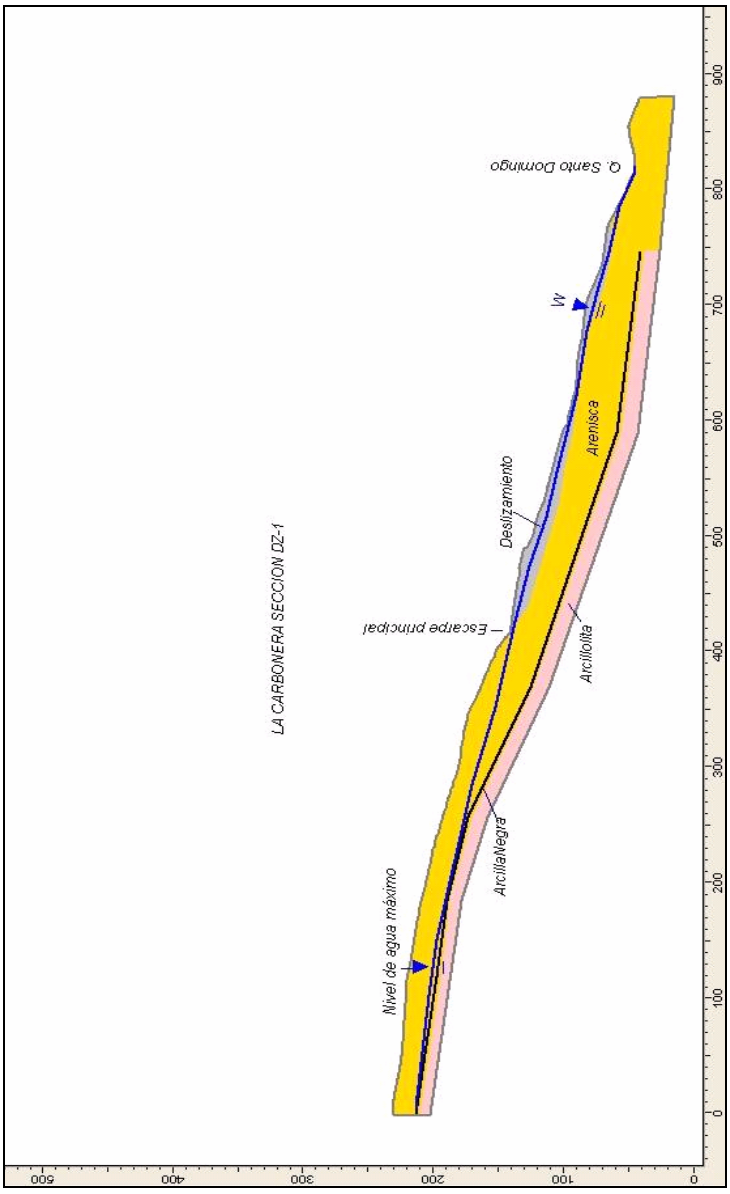


Figura 10-2. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-1

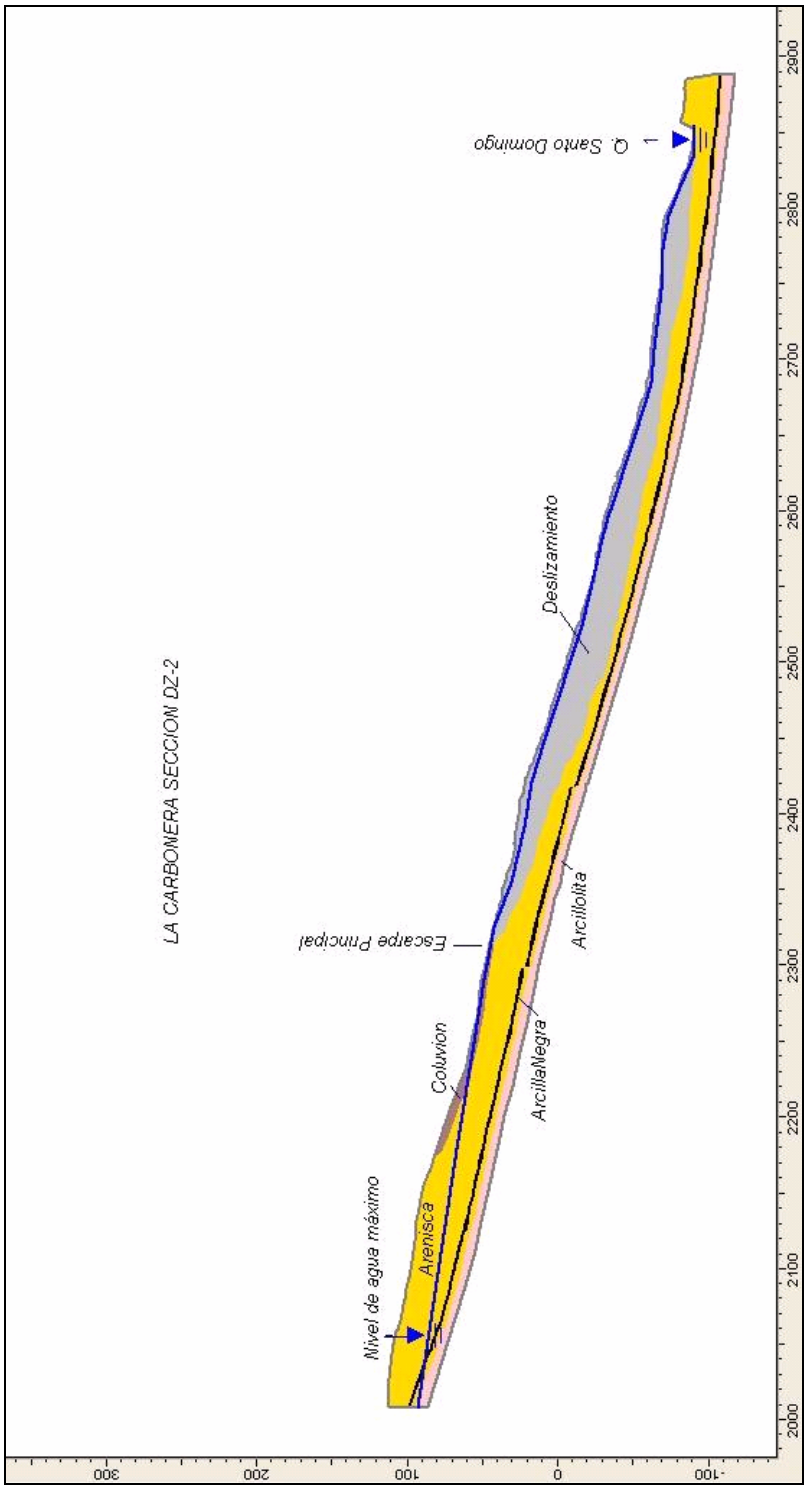


Figura 10-3. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-2

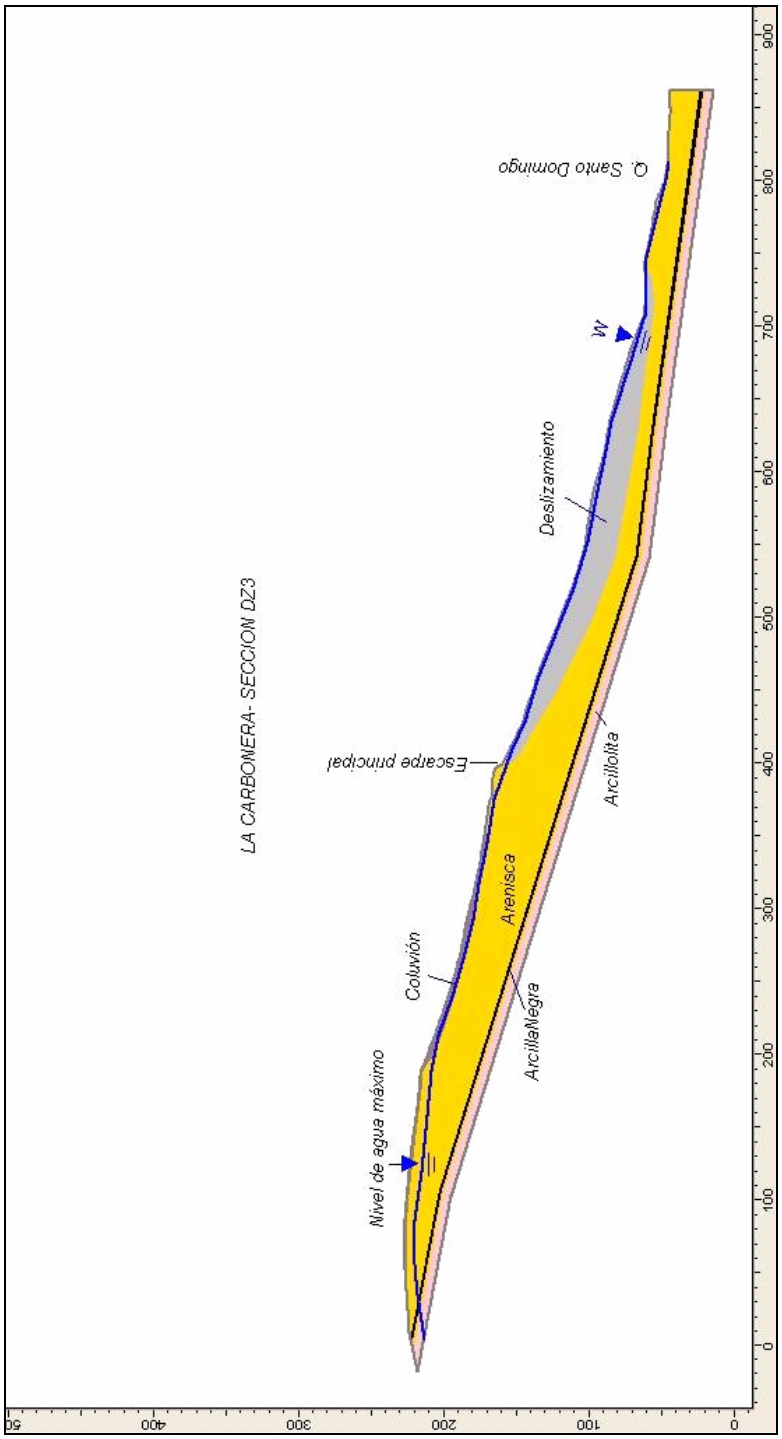


Figura 10-4. Modelo geológico-geotécnico para la Sección DZ-3

10.2.4. Análisis de estabilidad condición actual

En las **Figura 10.5 a Figura 10.13**, y en el **Anexo 4** cálculo de memorias, se presentan algunos resultados representativos de los análisis de estabilidad realizados para las tres secciones y para algunas de las condiciones de niveles freáticos y de sismo considerados. En vista de que la geomorfología y extensión de la zona dan lugar a factores de seguridad mínimos que corresponden a superficies de falla que en muchos casos son poco representativas de la condición general de todo el talud, antes que mostrar una tabla con factores de seguridad para cada condición de análisis, se prefiere presentar los resultados de ellos con la envolvente de superficies de falla que delimitan las zonas más críticas. Así, de las figuras se interpreta lo siguiente para la condición actual:

Para la Sección DZ-1, **Anexo 4** cálculo de memorias, se observa que con niveles de agua máxima como los que posiblemente se encuentren durante la temporada lluviosa y el flujo contínuo de aguas incontroladas del acueducto y alcantarillado, la zona más inestable corresponde a la del deslizamiento, particularmente la parte alta del mismo, hacia la cabeza del movimiento. Por otra parte, para la condición de aguas mínimas (o sin agua), la estabilidad en esta zona mejora ligeramente y se llega a una situación de estabilidad marginal. Así mismo, en esta condición se observa que las zonas menos estables corresponden tanto a la cabeza y cuerpo del movimiento como a la pata del mismo. En ambas condiciones, la zona arriba del escarpe principal muestra una estabilidad relativamente aceptable con factores de seguridad mayores a 1.5. Sin embargo, dada esta marginalidad en condiciones estáticas, en caso de sismo se presentaría una falla general del cuerpo del actual deslizamiento.

La sección DZ-2 se muestra muy inestable para la condición con nivel de agua máxima y se observa que prácticamente toda la zona del deslizamiento fallaría. Para el caso sin agua, sin embargo, se observa una mejora notable de la estabilidad aunque esta es marginal hacia el cuerpo del mismo y la pata del mismo continúa siendo inestable. En el caso de sismo y aún sin agua subterránea, se observa que fallaría toda la zona del actual deslizamiento y parte de la zona por detrás del escarpe principal. Sin embargo, bajo estas condiciones se mantendría en una estabilidad aceptable la zona arriba del deslizamiento. Para el caso de agua máxima y sismo, la zona arriba del escarpe principal bajaría su estabilidad a un nivel de amenaza media, según criterios de la Resolución 227/2006 de la DPAE. Vale la pena observar que en todas las situaciones la zona más inestable parece corresponder al pie del movimiento.

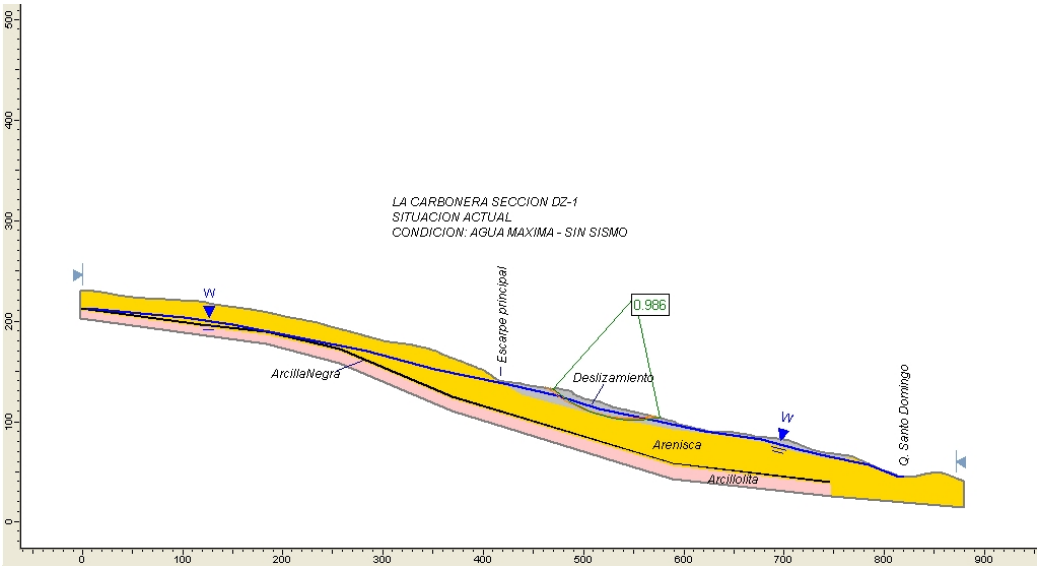


Figura 10-5. Sección DZ-1. Estabilidad con nivel de agua máxima y sin sismo

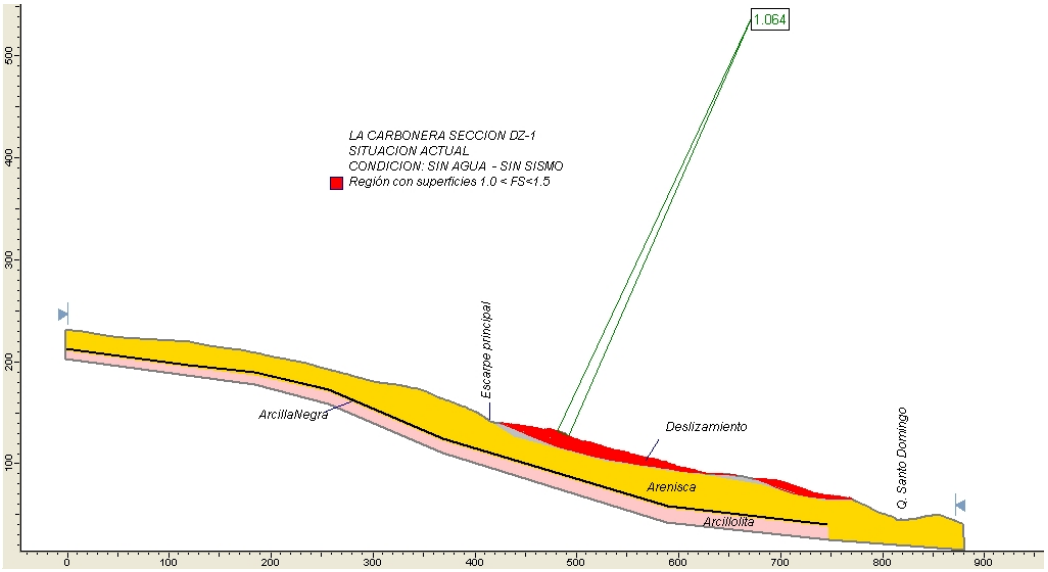


Figura 10-6. Sección DZ-1. Estabilidad con nivel de agua mínimo y con sismo

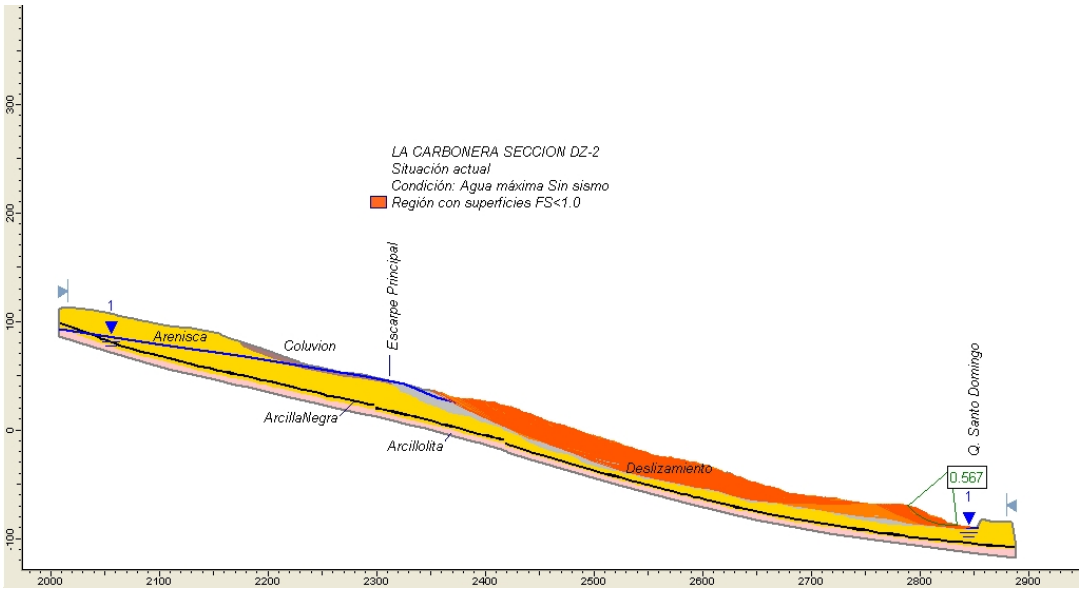


Figura 10-7. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua máximo y sin sismo

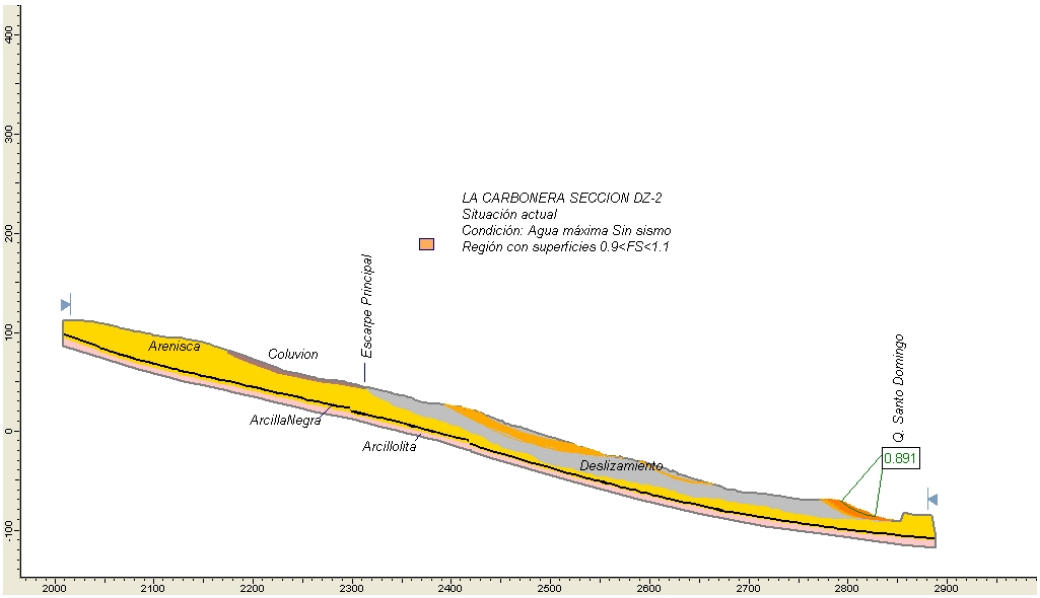


Figura 10-8. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo

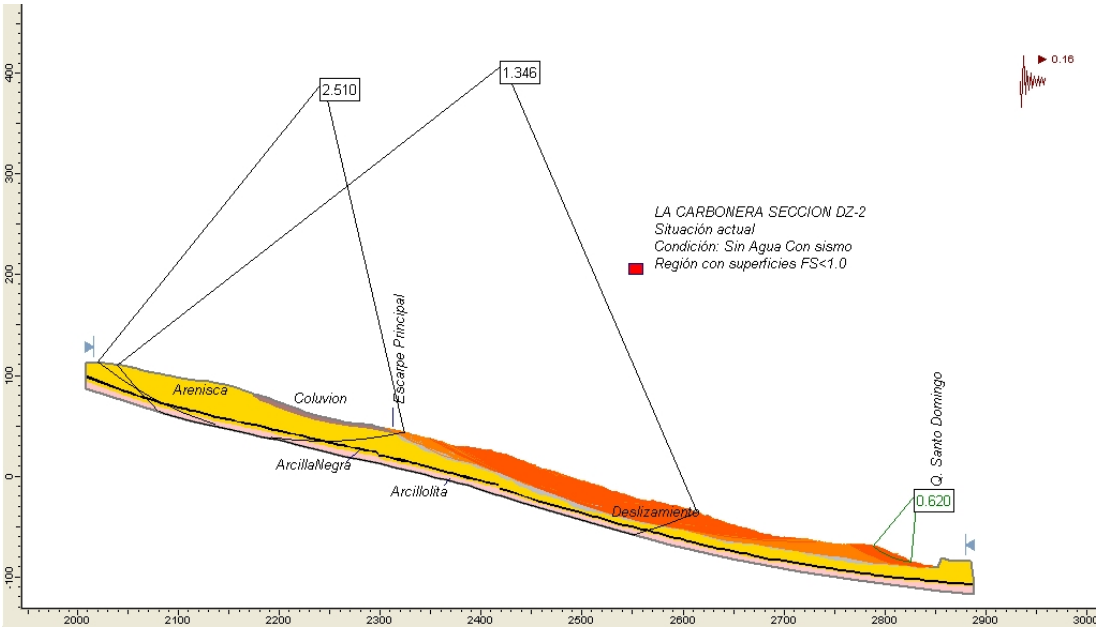


Figura 10-9. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua mínimo y con sismo

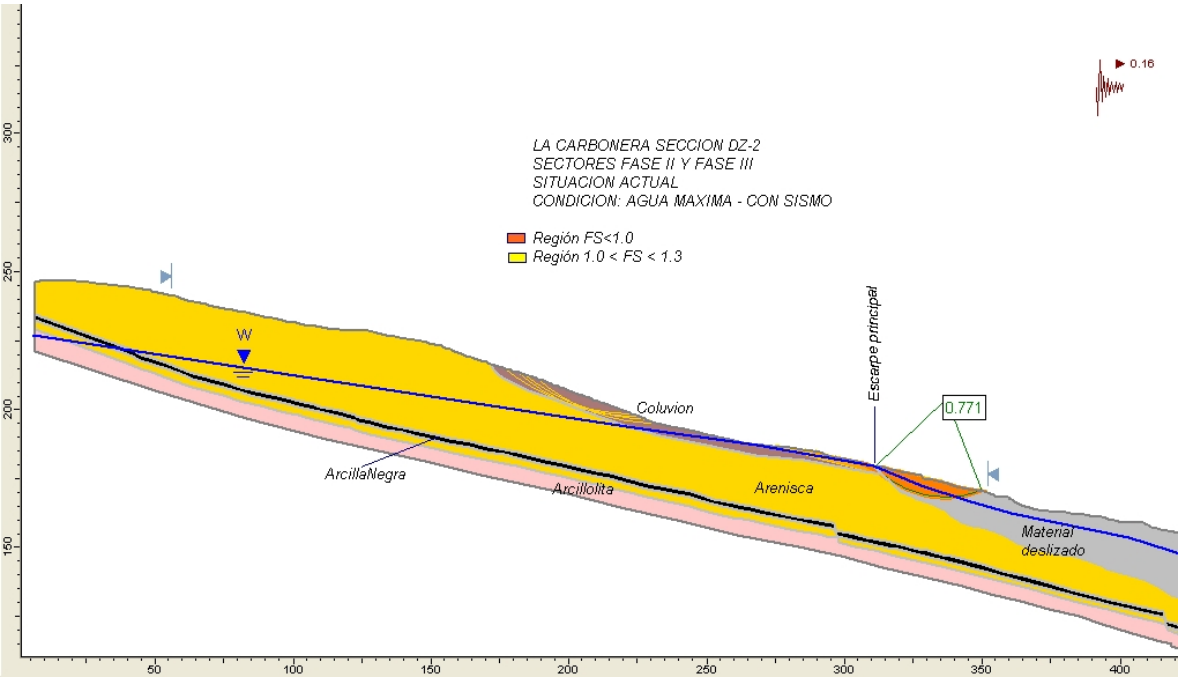


Figura 10-10. Sección DZ-2. Estabilidad con nivel de agua máximo y con sismo para la parte de ladera arriba del escarpe principal

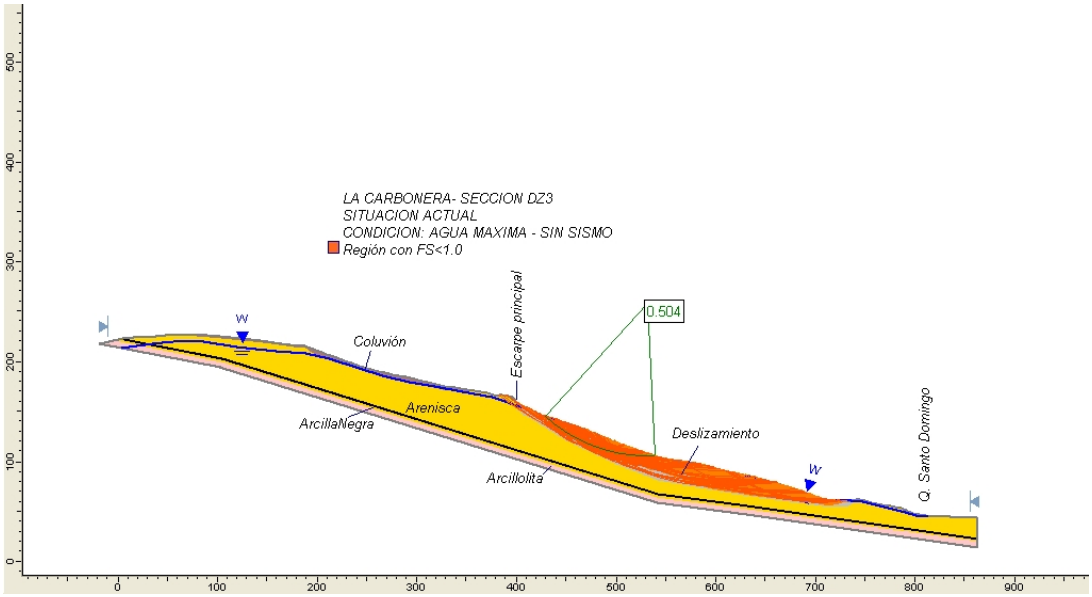


Figura 10-11. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua máximo y sin sismo

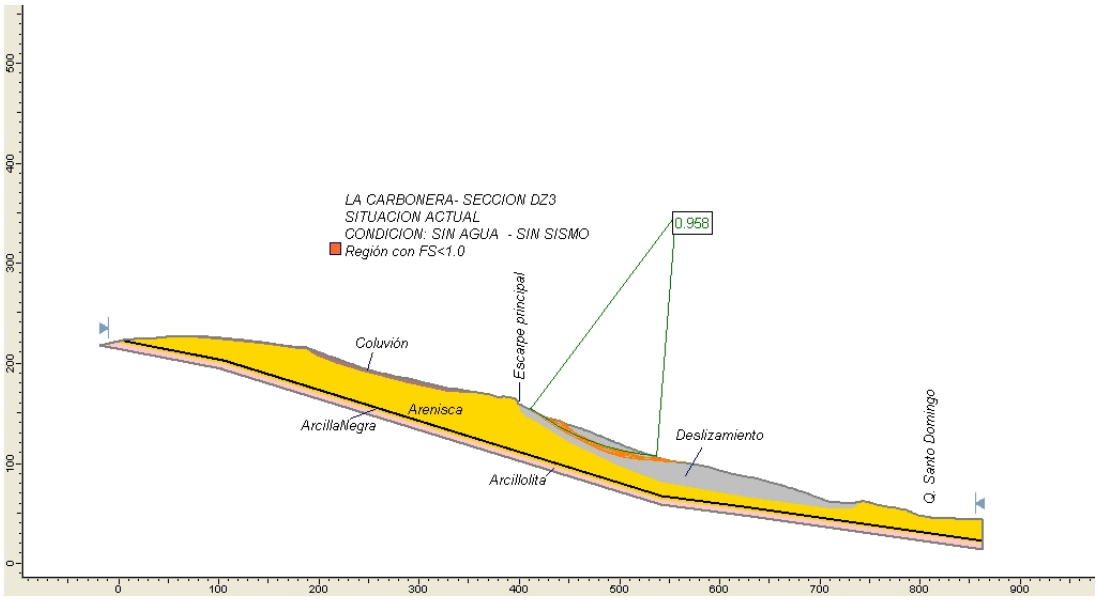


Figura 10-12. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo

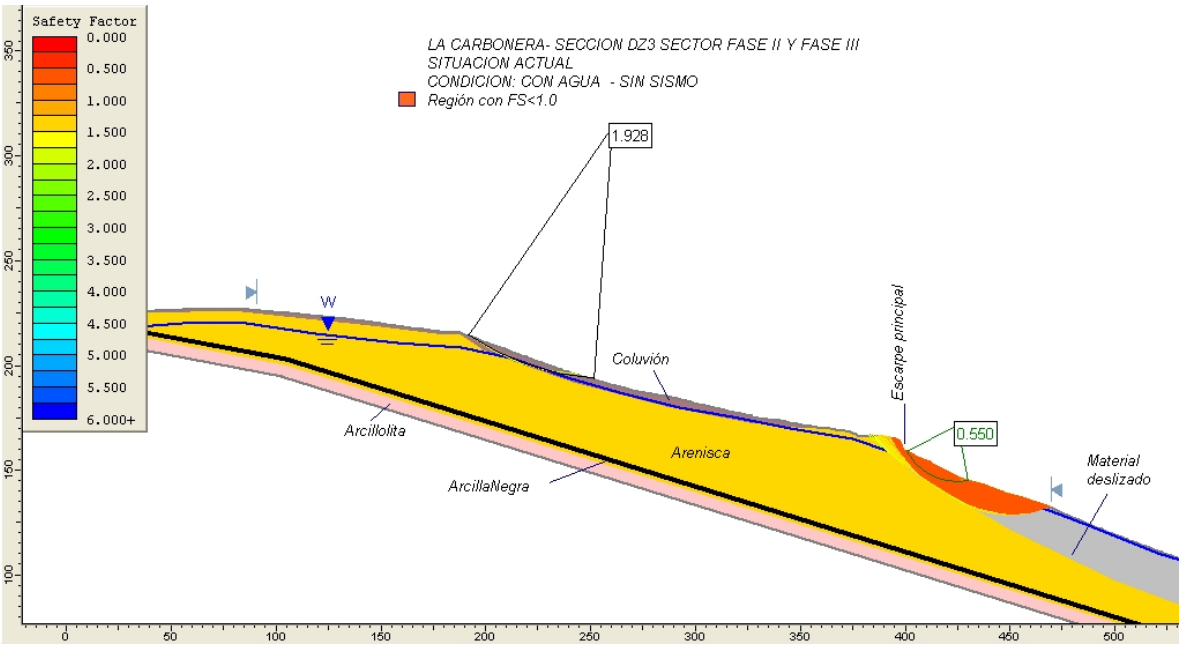


Figura 10-13. Sección DZ-3. Estabilidad con nivel de agua mínimo y sin sismo para la parte de ladera arriba del escarpe principal

Para la Sección DZ-3 se observa que la situación de estabilidad es similar a la DZ-2 aunque en este caso la zona más inestable corresponde a la zona de la cabeza y corona del movimiento. Así, en caso de niveles de agua máxima se presentan factores de seguridad muy por debajo de la unidad, indicando una gran movilidad del material. En el caso de ausencia de agua subterránea se observa una mejora notable de la estabilidad, pero persistiría una zona marginalmente inestable hacia la cabeza del movimiento como efectivamente se observa actualmente en campo. Para el caso de sismo, en ambas situaciones de agua subterránea se movilizaría toda la masa del deslizamiento y se alcanzaría afectar parte del terreno arriba de la corona.

Comparando la estabilidad de las zonas representadas por las tres secciones, se concluye que en general la que corresponde a la Sección DZ1 es la más estable y es en donde se moviliza menos material. Por su parte, las zonas de DZ2 y DZ3, muestran condiciones de estabilidad semejantes, aunque el material movilizado en la primera es mayor a las demás, lo cual concuerda con que en este sector el espesor del material deslizado es mayor. De todas, la parte más inestable parece corresponder a la pata del movimiento DZ-2.

De acuerdo con lo anterior, la condición que más ha prevalecido hasta el momento parece ser aquella de bajos niveles freáticos y sin sismo. Los movimientos retrogresivos y dentro del cuerpo del deslizamiento que se han venido presentando, posiblemente han obedecido a aumentos ocasionales del nivel de agua subterránea durante periodos de fuertes lluvias y a las descargas de aguas servidas y del acueducto. Así mismo, el efecto del agua sobre la condición de estabilidad de la ladera es doble: por una parte un aumento del nivel de aguas reduce la estabilidad de los materiales y por otra aumenta el área inestable. Lo mismo ocurre para las condiciones con y

sin sismo, aunque en este último caso, el efecto sobre la estabilidad y área involucrada es mucho más dramática que el del nivel de agua.

Los resultados de estos análisis indican que para mejorar la condición actual de estabilidad del sector de La Carbonera, se deben considerar obras y medidas para bajar al mínimo posible el nivel freático y para incrementar la resistencia al deslizamiento en las zonas más inestables. Las primeras incluirían las necesarias para controlar la infiltración de aguas superficiales y disminuir al máximo posible los eventuales niveles freáticos colgados. Debido a que los materiales son predominantemente arcillosos, esta disminución del nivel freático contribuiría también a aumentar la resistencia del mismo. Con relación a las obras de estabilización, los resultados indican que estas deben extenderse no solo en la ladera actualmente afectada por el deslizamiento sino en la zona arriba del escarpe principal. Además, la extensión de la zona de falla actual y de la zona que se podría ver involucrada durante eventos extremos de sismo y niveles de agua subterránea, exigen obras de magnitud muy importante no solo en extensión a lo largo de la ladera sino en profundidad para llegar a materiales competentes en donde soportarse.

10.3. ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL SECTOR EL ESPINO

10.3.1. Mecanismos de falla y susceptibilidad de los materiales

Para la zona de El Espino, se menciona como principal unidad de roca sobre la zona, la correspondiente a areniscas de la formación Guaduas. Éstas se encuentran cubiertas por suelos residuales, aluviones y humedales, y materiales heterogéneos. Los suelos residuales corresponden a materiales poco desarrollados y de poco espesor. Los depósitos aluviales y humedales corresponden a materiales compuestos por sedimentos arenolimosos con

presencia de algunas gravas. En cuanto a los depósitos heterogéneos, éstos corresponden a materiales de escombros y gravas en matriz arenosa poco compacta, arcilla limosa y suelos orgánicos. Estos presentan espesores aproximados de hasta 8m localizados hacia la corona del deslizamiento principal. Adicionalmente, sobre la parte baja de la ladera se identificaron algunos rellenos antrópicos.

En cuanto al material en el cuerpo del deslizamiento, éste corresponde a un material clastosoportado conformado por suelos residuales, materiales heterogéneos y roca en matriz arenolimosa. Bajo este material deslizado se presenta la formación Guaduas de areniscas ligeramente friables con algunos niveles de arcillolitas. Más en profundidad se logran identificar algunos niveles de carbón.

En el aspecto morfodinámico, la zona está caracterizada por presentar pendientes planas en la parte alta y en la parte baja y bastante altas hacia el sector del deslizamiento. Sobre éste se desarrollan superficies cóncavas y en general las pendientes se orientan en dirección noreste, lo cual sugiere un movimiento de la masa con preferencia a esta dirección hasta aproximadamente la mitad de la ladera hacia abajo del escarpe del escarpe principal. A partir de este punto muestra un movimiento bisectado tipo flujo en dirección hacia la quebrada Santa Rita y otro movimiento hacia la quebrada Santo Domingo. Los escarpes que se han desarrollado presentan contornos geométricos. Se presenta en general un hundimiento tanto en el cuerpo del deslizamiento como hacia su parte más baja, y tal como se ha venido evidenciando se han presentado levantamientos en la confluencia de la quebrada Santa Rita con el barrio San Rafael. El mecanismo de falla del deslizamiento principal es traslacional aunque se presentan algunos sectores muy locales con mecanismo de falla rotacional.

Este movimiento ha generado la aparición de tres diferentes escarpes marcados de acuerdo a los rasgos estructurales de la zona. En la pata del deslizamiento se identificaron cuatro deslizamientos apuntando en diferentes direcciones.

En cuanto a la quebrada Santa Rita, ésta presenta en su margen izquierda escarpes en dirección sureste y la quebrada Santo Domingo, hacia el sector de El Espino, ha sufrido algunos levantamientos. Adicionalmente estas quebradas han sido afectadas por intensos procesos erosivos.

Dado lo anterior, y con base en la información de antecedentes, para la zona de se han identificado los siguientes mecanismos de falla:

- Mecanismo de falla de tipo traslacional con carácter retrogresivo en el cuerpo del deslizamiento principal
- Presencia de sistemas de fallas perpendiculares a la dirección del movimiento principal.
- Superficie de falla a lo largo del contacto entre la intercalación de areniscas y arcillolitas y el depósito de arcillolita de la formación Guaduas.
- Dirección del movimiento principal en el sentido de la pendiente hacia aproximadamente la mitad del deslizamiento.
- Zona baja de la ladera con presencia de mecanismos de falla rotacionales en diferentes direcciones
- Efectos de socavación de las márgenes de las quebradas
- Flujos de suelos del material superficial localizado en inmediaciones de los cauces de las quebradas Santo Domingo y Santa Rita
- Alta Susceptibilidad de los materiales superficiales a procesos erosivos
- Proceso de levantamiento del terreno hacia el costado del barrio San Rafael, con algunas caídas de roca, producto de la alteración de la roca, dado el movimiento presentado

10.3.2. Materiales y parámetros adoptados

Tal y como se llevó a cabo para el sector de la Carbonera, en El Espino se identificaron cinco materiales. El resumen de los parámetros y diferentes

materiales adoptados para el modelo se presenta en la **Tabla 10.3** y la descripción de cada uno de éstos se presenta en los siguientes numerales.

Relleno Heterogéneo. Dentro de este grupo se incluye el material heterogéneo inconsolidado, compuesto por niveles plano paralelos de techo a base así: suelo orgánico poco desarrollado de textura limo arenosa a limo arcillosa de color gris a negro, material blando deleznable, con restos vegetales y fragmentos tamaño grava de arenisca. Continúa el nivel de arcilla limosa color gris con espesor aproximado de 50 cm. Le sigue paleosuelo limo arenoso gris con abundantes fragmentos de arenisca tamaño grava – guijos. Igualmente corresponde a una especie de paleosuelo más superficial bajo el cual se presenta suelo residual amarillo y roca meteorizada. En general este depósito es de baja resistencia de consistencia blanda a moderada. Para efectos de la modelación de este depósito, bajo el supuesto de falla traslacional se optó por trabajar con los parámetros de resistencia promedio. El material deslizado, se desplaza en bloques traslacionalmente sobre un plano de falla ó ruptura. En algunos sectores se mezcla con bloques de arenisca arrastrada desde su base. Si bien este material se encuentra arriba del escarpe, se modelará con parámetros de resistencia residuales dado que este corresponde a un depósito inconsolidado bastante heterogéneo. Se emplearán los valores promedio obtenidos a partir de los cortes directos. c' = 3.5 t/m2 y φ' = 18°. El valor de peso unitario corresponde al valor promedio obtenido por lo que γ = 2.02 t/m3.

Tabla 10-4. Resumen de parámetros de resistencia empleados en el modelo



Material deslizado. Este material corresponde al material que se desplaza en bloques traslacionalmente sobre un plano de falla, y que en sectores se mezcla con bloques de arenisca arrastrada desde su base. Para el caso del Espino el material deslizado corresponde al del relleno heterogéneo. Para su modelación, debido a la poca cantidad de datos con que se cuenta para este tipo de material se optó por emplear únicamente el dato correspondiente al estudio de INGEOMINAS, dado que la desviación estándar de los datos es bastante alta y al trabajar con valores promedio se incurre en una sobreestimación de los valores de resistencia del material. Se adoptó entonces un valor de c' = 2 t/m2 y φ' = 13°. El valor de peso unitario corresponde al valor promedio obtenido por lo que γ = 1.89 t/m3.

Roca arenisca. Corresponde a la roca arenisca de grano medio a grueso de color amarillo, no cementada, con carácter friable al tacto, meteorizada a fresca, en bancos medios a gruesos, estratificación plano paralela inclinada en sentido de la pendiente, con presencia de diaclasamiento. Para su modelación se adoptaron valores de resistencia pico para la roca arriba del escarpe y valores residuales para el material localizado ladera abajo del escarpe. Para el primer caso se emplearon valores promedio obteniendo un c' = 2.0 t/m2 y φ' = 20°. Por su parte, para la roca alterada, se buscó castigar un poco más los valores de resistencia, con el fin de poder simular el efecto de fracturamiento intenso que presenta la roca producto del deslizamiento. Por esta razón, para el depósito de arenisca localizado hacia abajo del escarpe principal se emplearon los valores residuales promedio pero restándoles el valor de la desviación estándar. Así, se obtuvieron valores de c' = 0. 0.08 t/m2 y φ' = 13° para el sector de El Espino. El valor de peso unitario corresponde al valor promedio obtenido igual a 2.20 t/m3.

Roca arcillolita. Corresponde a la misma formación presente en el sector de La Carbonera, obteniendo en este caso valores de c' = 8.0 t/m2 y φ' = 32° El valor de peso unitario corresponde al valor promedio obtenido por lo que para el sector de El Espino se tiene γ = 2.17 t/m3.

10.3.3. Niveles freáticos

Para la definición de niveles freáticos a ser empleados en el modelo geológico-geotécnico se partió de la información consignada en los estudios antecedentes y principalmente de las consideraciones expuestas en el Capítulo de Hidrogeología.

Para el sector de El Espino, se caracterizó la roca arenisca como un material de alta permeabilidad, mientras que el depósito de intercalaciones de arcillolita y areniscas corresponden a un lente impermeable, lo cual da lugar a la aparición de algunos niveles freáticos colgados. En cuanto a los depósitos antrópicos localizados en la parte baja del deslizamiento, éstos se identificaron como materiales permeables, aunque se menciona que no representan mayor influencia hidrogeológica en el área de estudio. Finalmente los depósitos de suelo residual hacia la parte alta de la ladera son bastante permeables.

En este caso también, los depósitos aluviales localizados en inmediaciones de las quebradas corresponden a materiales altamente permeables e influyen en los procesos de estabilidad en vecindad a las quebradas.

En cuanto a los rasgos estructurales que confinan el flujo, se aplican las mismas consideraciones que para el sector de La Carbonera. Por otro lado en el Espino se han encontrado niveles muy bajos hacia la zona del deslizamiento. Sobre toda el área se han identificado algunos niveles

colgados. Para este estudio en particular se detectaron algunos niveles variando de 3 a 12m de profundidad. En otras perforaciones no fueron detectados. Considerando que la zona de estudio presenta un régimen bimodal con lluvias de Marzo a Junio y de Octubre a Noviembre, y dado que las perforaciones se efectuaron durante el mes de Noviembre, puede concluirse que estos niveles corresponden a los más altos esperados de acuerdo al aporte de las lluvias. Sin embargo, como ya se ha mencionado, ésta no constituye el mecanismo aportante principal.

Dado lo anterior, para este sector también se optó por asumir, de manera conservativa, condiciones extremas de agua para la modelación, asumiendo como situación más crítica la saturación total del talud.

10.3.4. Modelo geotécnico para análisis de estabilidad

A partir de todas las consideraciones expuestas en los anteriores numerales, se definió el modelo geológico geotécnico a emplear en los análisis de estabilidad. En la Figura 10 -14 se presenta un perfil típico para el sector de El Espino, en donde se pueden apreciar la disposición de los diferentes materiales en profundidad, así como la presencia de los sistemas de fallas perpendiculares al movimiento. Se identifican en esta sección el escarpe principal y la superficie de falla en el contacto entre las arenisca-arcillolita y la arcillolita intacta.

10.3.5. Consideraciones para la modelación

Las consideraciones empleadas para la modelación, teniendo como base las suposiciones del modelo geológico-geotécnico expuestas en el capítulo anterior se presentan a continuación:

- Para este sector se modeló la falla traslacional en el contacto entre la arenisca y la arcillolita. Este tipo de falla se modeló únicamente para la

zona localizada abajo del escarpe generando una superficie no circular en el programa SLIDE a lo largo de todo el contacto entre los dos materiales.

- Adicionalmente, para analizar los movimientos superficiales tipo flujo caracterizados por falla rotacional se modelaron superficies de falla tanto en el material heterogéneo localizado arriba del escarpe, como en el material suelto localizado en el cuerpo del deslizamiento. Debido a que el mecanismo de falla circular únicamente es posible en el material deslizado sin atravesar hasta el estrato de arenisca, para efectos de la modelación de este caso se asignó a la roca una resistencia infinita.

- Dado que la ladera del espino presenta un control estructural que obedece a los 3 sistemas de fallas que transcurren perpendicularmente a la dirección del movimiento, es necesario representar en la modelación estos sistemas de fallas. Para tal fin, se emplearon en la modelación grietas de tracción en los lugares donde se infiere la presencia de estas fallas. Vale la pena mencionar que dadas las limitaciones del Software SLIDE de incluir más de una grieta, se modeló como mecanismo principal el control estructural de la grieta del escarpe principal.

- Si bien, en la zona de presencia de estas fallas se esperan zonas de brecha, donde el material se encuentra bastante alterado y triturado, para la modelación se emplearon los mismos parámetros de resistencia, tanto en cercanías a los sistemas de fallas, como al interior del macizo potencial a deslizarse. Lo anterior en razón a que se desconoce el estado de la roca en cercanía a las fallas y la real presencia de material brechado, así como su extensión en profundidad.

- Las tendencias de movimiento principal en el sector de El Espino indican una dirección ladera abajo del deslizamiento y una segunda dirección que apunta hacia el sector del barrio San Rafael, y es la responsable del levantamiento del terreno en este sector. Lo anterior indica que si bien para la dirección ladera abajo del deslizamiento, se podría pensar en la posibilidad de permitir el desconfinamiento del terreno inestable, el levantamiento del barrio San Rafael sugiere la necesidad de mitigar el movimiento ya que si los empujes se siguen desarrollando la estabilidad de este barrio podría verse bastante comprometida.

- Para efectos de la modelación de niveles freáticos, es viable simular niveles mínimos en el contacto entre la arenisca y la arcillolita, esto es, siempre modelar la arcillolita en estado saturado, debido a que el drenaje de este depósito está prácticamente fuera del alcance de las

obras de drenaje convencionales en la práctica de la ingeniería. Para simular el efecto de reblandecimiento de la arcillolita, se adoptaron los parámetros residuales de este tipo de roca.

- Para la obtención de los parámetros de resistencia de la arcillolita y la arenisca se utilizó toda la información disponible de ensayos de corte directo ejecutados en la zona de estudio. Vale la pena aclarar que los parámetros de resistencia obtenidos para la arenisca son inferiores a los de la arcillolita, en razón al intenso grado de fracturamiento de la arenisca. Lo anterior implica que la superficie de falla se asumió en el contacto arenisca-arcillolita, lo cual no excluye la presencia de superficies de falla más superficiales. Sin embargo los análisis se realizaron para la condición más crítica.

En la **Figura 10-14** se presenta la sección típica de análisis en el Slide en donde entre otros aspectos se puede apreciar la grieta de tracción del control estructural y en el **Anexo 4** se presenta el cálculo de memorias.

10.3.6. Análisis de estabilidad condición actual

Los resultados obtenidos para la condición actual del terreno en términos de factores de seguridad ante deslizamiento para el sector de El Espino se presentan a continuación.

Las secciones a ser analizadas tal como se comentó corresponden a la E-E en el sentido del movimiento principal y a la K-K para analizar otros tipos de movimientos de carácter más locales hacia el sector de las quebradas, en la parte baja de la ladera. Finalmente la sección L-L corresponde a la evaluación del levantamiento en el barrio San Rafael. A continuación se exponen los resultados para cada una de estas secciones. Finalmente se presentarán las consideraciones expuestas para el levantamiento en el barrio San Rafael.

10.3.6.1. Sección E-E

El análisis de estabilidad para la condición actual del terreno en la sección E-E se presenta en la Figura 10-15. Esta figura representa la condición actual del terreno que corresponde a niveles freáticos bajos y sin la fuerza sísmica aplicada. Se han evaluado dos mecanismos de falla de tipo traslacional. El primero se encuentra en el contacto entre el material producto del deslizamiento y la arenisca fracturada. El segundo mecanismo corresponde al contacto entre la arenisca fracturada y la arcillolita. Tal como se observa en esta figura, la ladera actualmente se encuentra en un estado de equilibrio crítico, con factores de seguridad muy cercanos a la unidad, 1.32 en este caso para la condición más desfavorable, correspondiente al contacto entre la Arenisca Fracturada y el material deslizado.

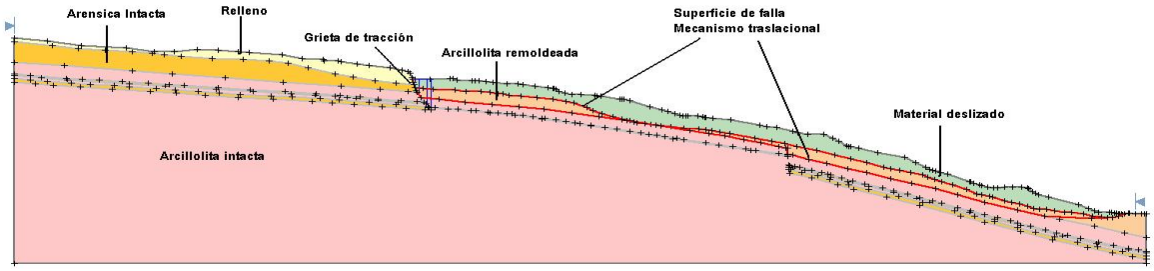


Figura 10-14. Sección típica de análisis Sector El Espino. Sección E-E

Al poner a actuar el detonante de sismo, se presenta una reducción considerable en el factor de seguridad obteniendo un valor crítico de 0.79 como se puede apreciar en la figura. Si por el contrario se activa el detonante correspondiente al agua infiltrada, se obtiene un factor de seguridad de 0.805, bastante similar al obtenido empleando únicamente el sismo. Si se analiza la condición más crítica en la que

actúan sismo y agua el mismo tiempo, se obtiene un factor de seguridad igual a 0.47, lo cual implica la falla del talud.

De los anteriores análisis se infiere que para la zona de estudio, la presencia de cualquiera de los dos detonantes, bien sea el sismo o el agua, repercutiría en la falla inminente del talud, por lo cual se hace indispensable el empleo de medidas de mitigación que garanticen por un lado un adecuado drenaje del talud, y por el otro, la implementación de estructuras de contención capaces de soportar las cargas generadas durante un evento sísmico.

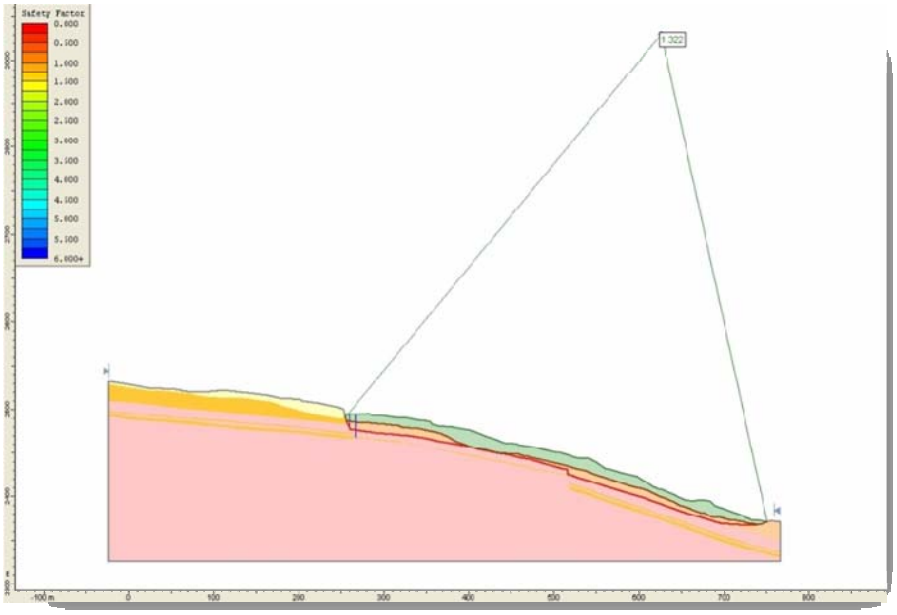


Figura 10-15. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual sin sismo y sin Agua

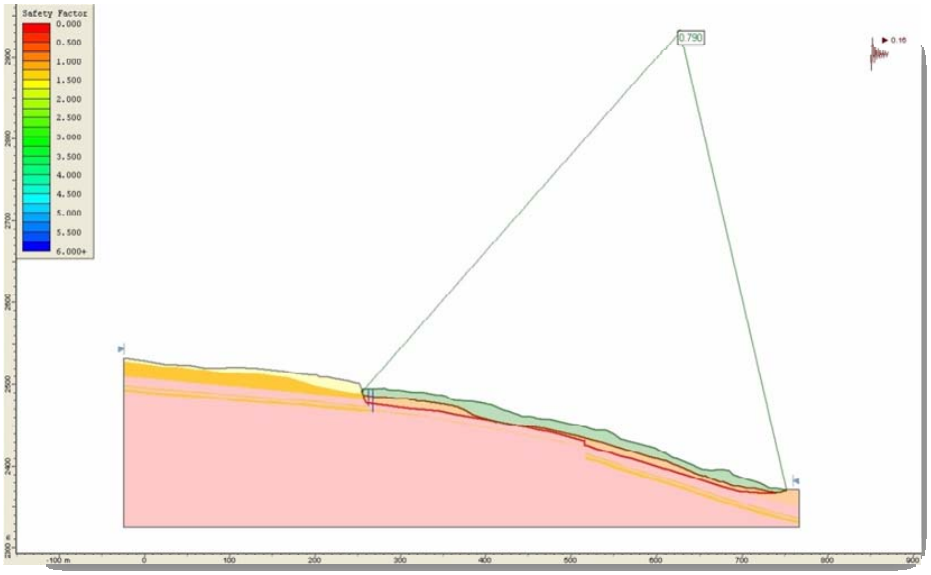


Figura 10-16. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua

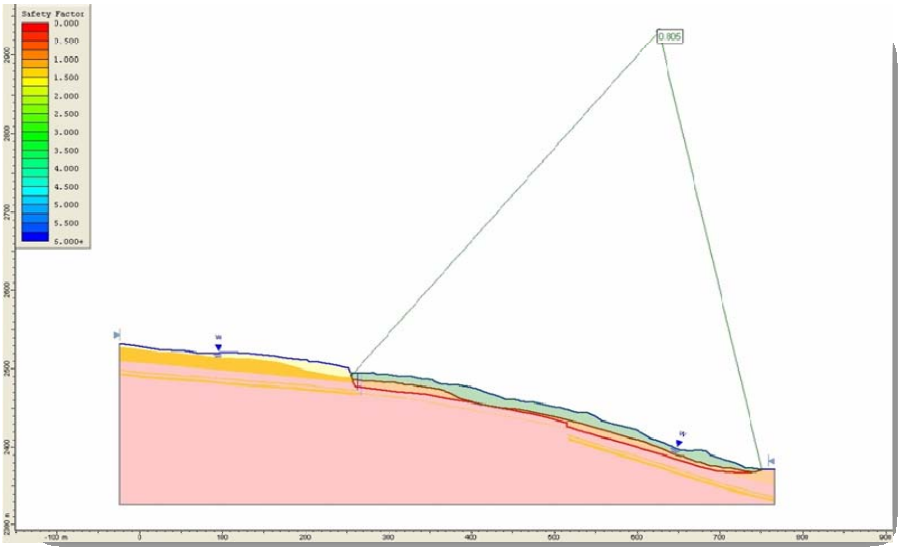


Figura 10-17. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua

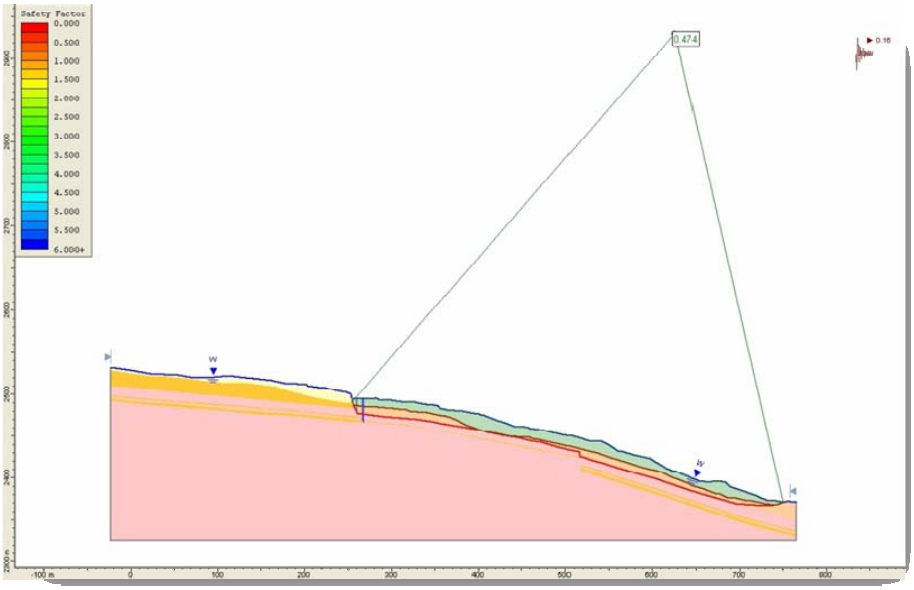


Figura 10-18. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua

Los anteriores análisis permiten validar los parámetros de resistencia adoptados para los diferentes materiales en el sector de El Espino. Si se analiza la Figura 10-17 se observa que la condición sin sismo y con talud seca obedece a las condiciones actuales del terreno, con factores de seguridad por encima de uno. En el momento en que ocurre la infiltración de agua al interior del talud, se observa que el talud pierde su estabilidad y se produce el movimiento. Esto corrobora la calibración hecha de los parámetros de resistencia obtenidos en el modelo geológico-geotécnico, es decir, los parámetros adoptados son representativos de la condición actual del terreno, y esto por supuesto, nos exime de la realización de retro-análisis.

Complementado los análisis de falla traslacional del deslizamiento principal, se realizaron análisis de falla rotacional sobre los materiales superficiales correspondientes al relleno heterogéneo y al material deslizado, ambos de carácter superficial.

Los resultados para la condición sin sismo y sin agua muestran una situación estable del talud pero de falla incipiente, lo cual está representado por un factor de seguridad igual a 1.1. Si aparece el detonante de Sismo o el de agua se observa la falla del talud, siendo más determinante el primer caso. Adicionalmente, si ambos factores actúan al tiempo se obtiene un factor de seguridad muy bajo correspondiente a 0.5.

De las figuras anteriores se puede observar que para todos los casos el material superficial localizado arriba del escarpe principal se encuentra estable tanto para condiciones sin sismo y sin agua como para las extremas. Por el contrario, el material deslizado actualmente se encuentra estable pero es susceptible a seguirse deslizando ante la ocurrencia de cualquier evento extremo de sismo o agua. Lo anterior implica que no solamente es posible el desplazamiento de la gran masa (falla traslacional), sino que se pueden presentar problemas locales de estabilidad que afectarán directamente al relleno y en el cual el mecanismo de falla es rotacional.

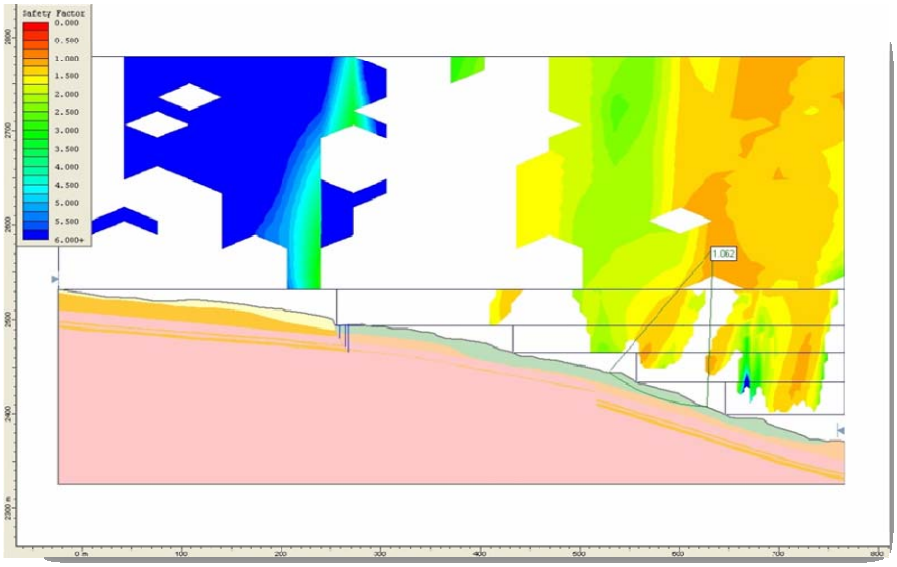


Figura 10-19. Sección E-E. El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

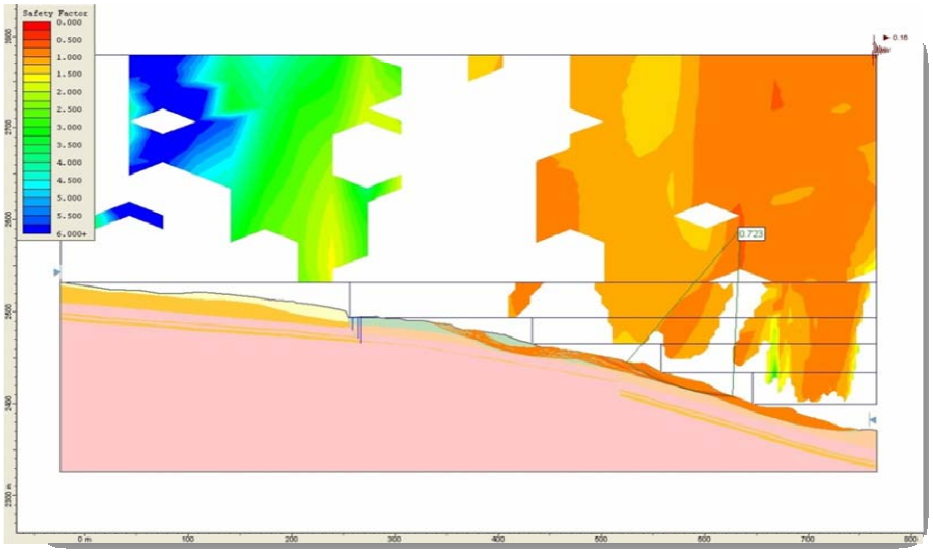


Figura 10-20. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Con Sismo y Sin Agua

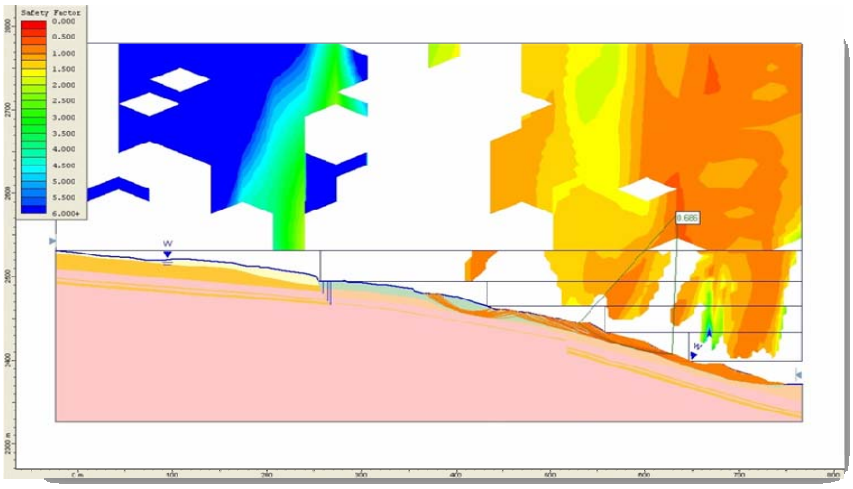


Figura 10-21. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Con Agua

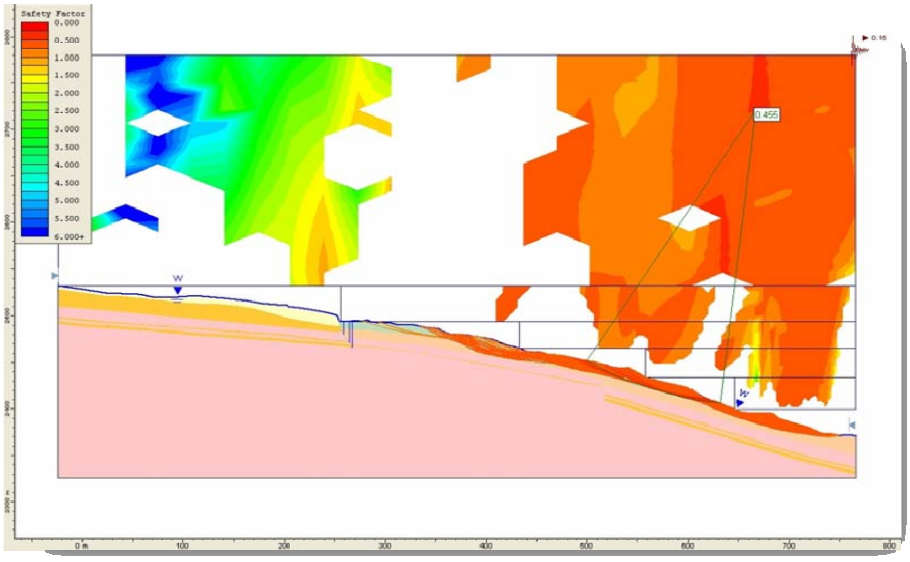


Figura 10-22. Sección E-E El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua

10.3.6.2. Sección K-K

Para la sección K-K no se analizó el mecanismo de falla traslacional, dado que ésta no corresponde a la dirección del movimiento principal. No obstante, se evaluó el mecanismo de falla rotacional en los materiales superficiales correspondientes a los flujos que tienden actualmente a moverse hacia las quebradas, en este caso en particular, hacia la quebrada Santa Rita.

Para la condición actual sin presencia de sismo y agua se observa en la Figura 10.23 que se obtienen características de estabilidad favorables lo que indicaría que actualmente este tipo de movimiento no se encuentra activo, salvo pequeños desplazamientos del terreno hacia la quebrada, los cuales se han detectado durante las últimas visitas.

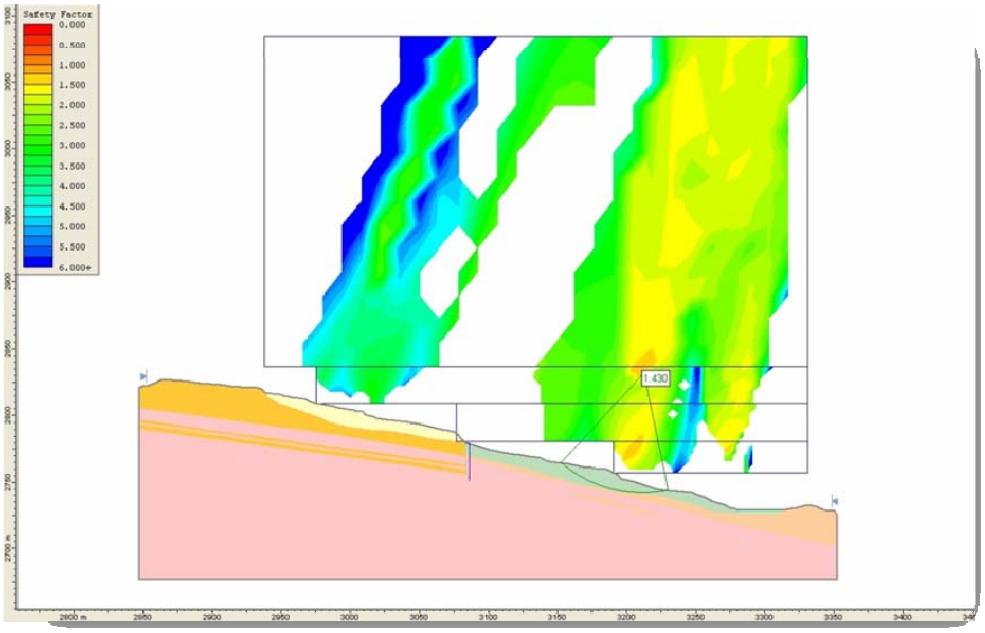


Figura 10-23. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

Sin embargo, al analizar esta sección con la presencia de agentes detonantes como sismo o agua por separado, o actuando conjuntamente se presenta la falla del talud.

Para el primer y segundo caso se obtiene una falla muy local hacia la parte media del deslizamiento, pero cuyo eventual movimiento podría acarrear un taponamiento de la quebrada Santa Rita, y para el tercero caso se obtendría una falla total del material, con consecuencias aún peores para el área de estudio. Lo anterior implica, la necesidad de medidas de mitigación para garantizar la funcionalidad de la canalización de la quebrada Santa Rita.

En cuanto al material localizado arriba del escarpe se muestra en general una situación estable tanto para la condición sin sismo y sin agua como para condiciones extremas de lluvia y sismo.

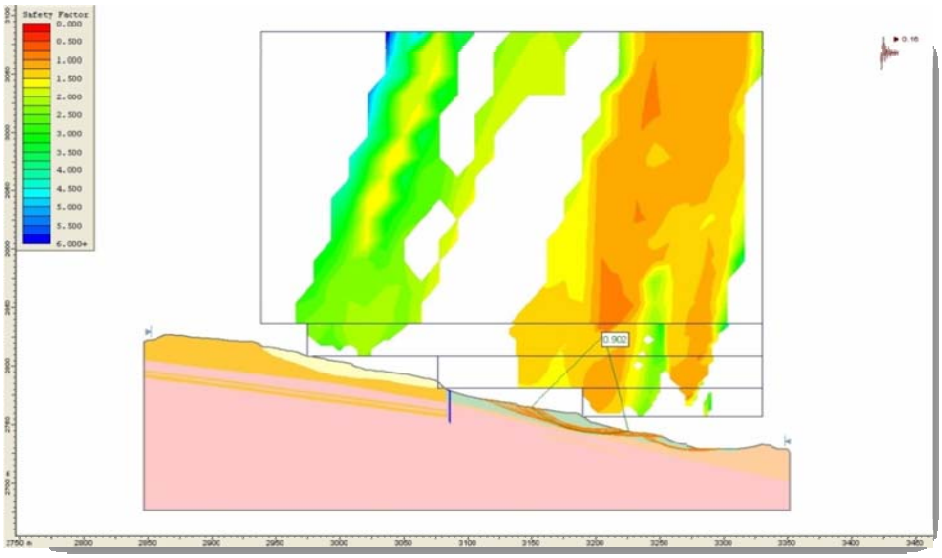


Figura 10-24. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

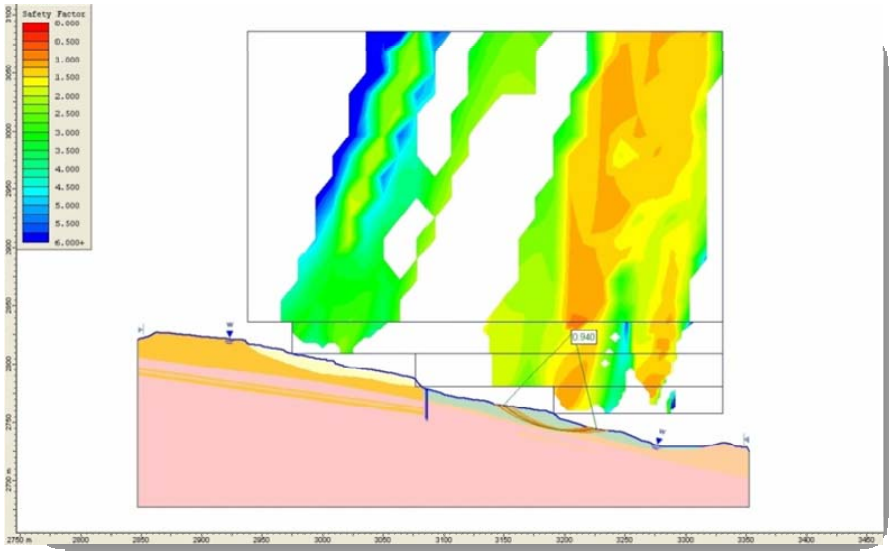


Figura 10-25. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

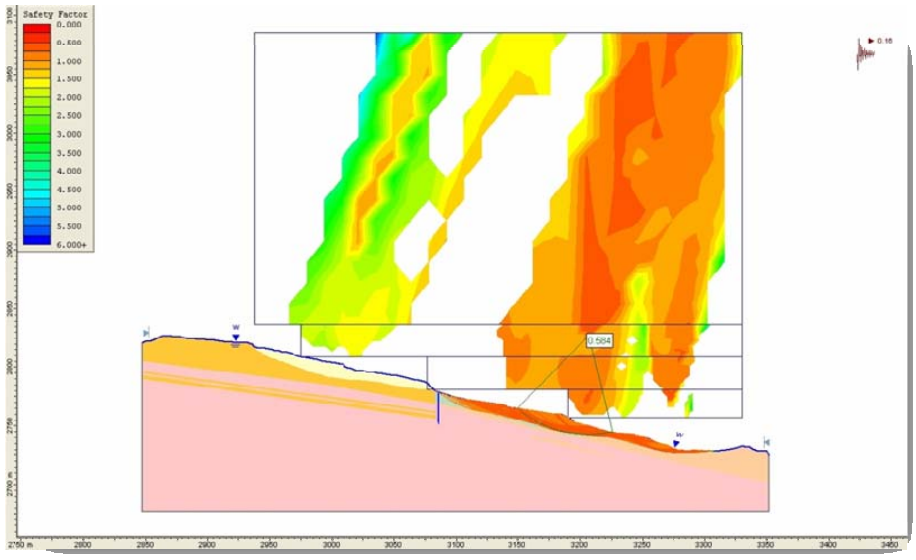


Figura 10-26. Sección K-K El Espino. Mecanismo de falla rotacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

10.3.6.3. Sección L-L

Para la sección L-L, correspondiente al análisis del empuje que levantó el barrio San Rafael se analizó el mecanismo de falla traslacional que pudo generar el levantamiento. Este mecanismo se encuentra en el contacto entre el entre la arenisca y la arcillolita finalizando con una componente de carácter circular localizada bajo el material levantado. La sección de análisis fue escogida de acuerdo a la dirección principal del movimiento que desestabilizó este sector. Los resultados para la condición actual sin sismo y sin agua donde se puede apreciar un FS igual a 1.7.

Lo anterior sugeriría que para la condición sin sismo y sin agua el empuje generado sobre el barrio San Rafael es mínimo y se tendría una condición estable. Sin embargo, al analizar la condición para la cual se presenta una saturación del terreno, se presentaría la falla y el empuje se activaría.

Lo anterior conlleva a relacionar este empuje sobre el barrio principalmente a la presencia de aguas infiltradas al interior del talud.

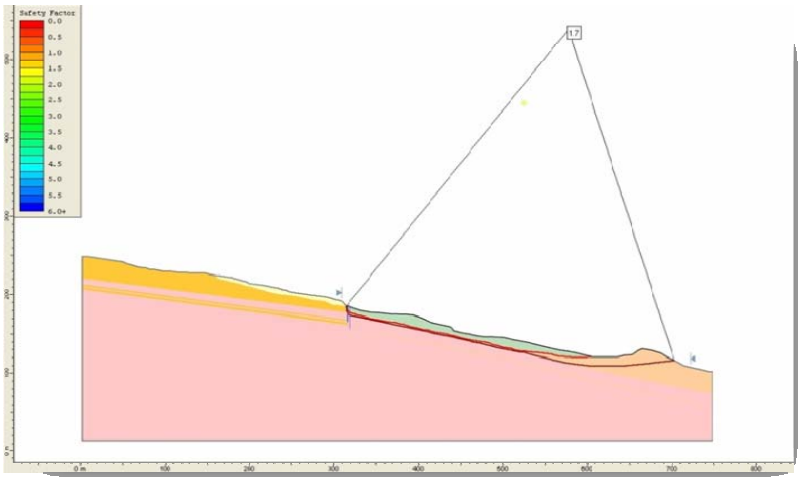


Figura 10-27. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Sin Sismo y Sin Agua

Si se analiza la condición más crítica, correspondiente a la presencia de acción sísmica y niveles freáticos elevados se tendría una situación aún más crítica con un factor de seguridad igual a 0.5.

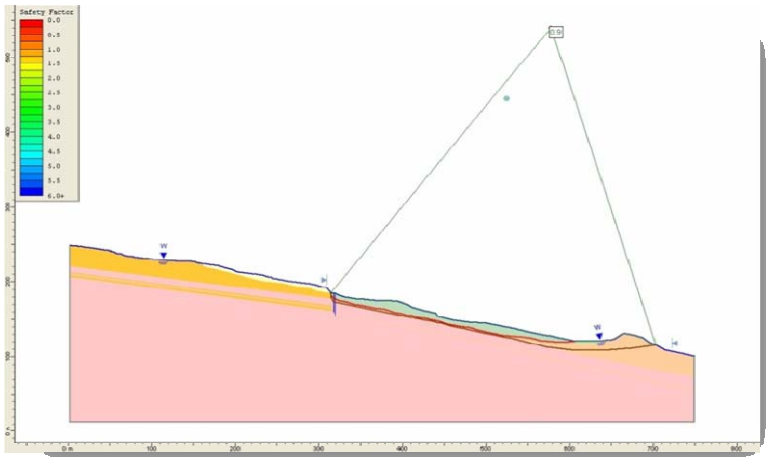


Figura 10-28. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Sin Sismo y Con Agua

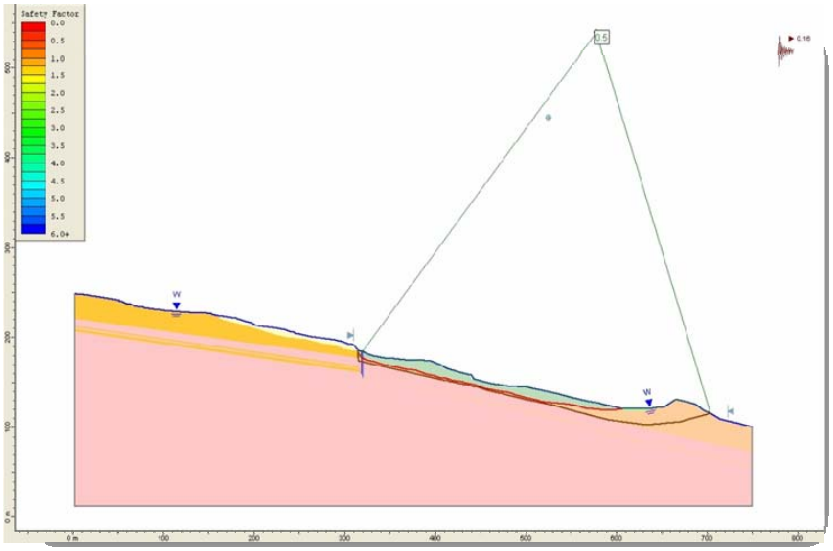


Figura 10-29. Sección L-L El Espino. Mecanismo de falla traslacional. Condición Actual Con Sismo y Con Agua

10.3.7. Análisis por caída de bloques Sector San Rafael

- **Análisis de estabilidad.** Para efectos de análisis de caída de bloques, se trabajó con los parámetros de resistencia residual.

El análisis se valió de la herramienta de software GeoRock V.4 Rev.48 (Geostru Software®), la cual utiliza el método CRSP (Colorado Rockfall Simulation Program) para el cálculo del alcance al que pueden llegar uno o varios bloques al desprenderse y caer.

La Firma Rocscience ha publicado (www.rocscience.com) una tabla para estimar los *Coeficientes de restitución (*restitución normal y tangencial, R_N y R_T), representan el rozamiento que puede desarrollarse entre los bloques y la superficie. Lo más conveniente en el momento de elegirlos sería basarse en observaciones previas de caída de bloques y, habiendo registrado datos de

trayectoria, energía, velocidad y alcance, calibrar los análisis para que se ajusten a las observaciones.

Caracterización cinemática de la caída de los bloques:

- Peso unitario de los bloques: 2.2 T/m^3
- Dimensiones de los bloques: GeoRock efectúa lanzamientos para tres formas de bloque: disco (definido por diámetro y espesor), esfera (caracterizada por un diámetro) y cilindro (definido por diámetro y altura).

Se clasifico los volúmenes de roca en cuatro categorías: 0.5 a 1.0m^3, 1.0m^3, 2.0m^3 y 3.0m^3, de modo que se pueden calcular las dimensiones de la **Tabla 10.5.** Por facilidad, disco y cilindro adquirieron las mismas dimensiones; la diferencia entre ellos está en la forma de caer por el talud.

Tabla 10-5. Dimensiones de los bloques para el análisis de caída de bloques

Volumen nominal del bloque (m^3)	Disco y cilindro		Esfera	Volumen real (m^3)	
	D (m)	***E = H*** (m)	***D*** (m)	Disco y cilindro	Esfera
0.5	1.0	0.7	1.0	0.55	0.52
1.0	1.3	0.8	1.3	1.06	1.15
2.0	1.6	1.0	1.6	2.01	2.14
3.0	1.8	1.2	1.8	3.05	3.05

D = diámetro
E = espesor
H = altura

- Velocidad inicial horizontal: 0.01m/s, necesaria para vencer la fricción estática.
- Velocidad de frenado horizontal: 0.01m/s.
- Velocidad inicial vertical: -0.01m/s (hacia arriba), la cual también contribuye a vencer la fricción estática.
- Intervalo de abscisas sobre el cual se efectúan lanzamientos: definido con base en la zonificación por tamaños de bloque.



- Número de lanzamientos a efectuar: gracias a que el software trabaja bajo un modelo de rebotes aleatorios, se hace necesario un número de lanzamientos lo suficientemente grande como para calcular frecuencias relativas de excedencia, se consideró que 100 lanzamientos es un número suficiente y fácilmente manejable para efectos estadísticos.

De los resultados que el programa entrega, se puede extraer, entre otra, la siguiente información:

1) Alcance máximo horizontal (m) dentro del grupo de bloques lanzados.
2) Alcance promedio (m).
3) Energía máxima de los bloques (kJ).

Las técnicas de evaluación de amenaza por caída de bloques suelen considerar a la energía promedio de impacto como la variable fundamental del problema (Isaza, 2002). Sin embargo, para efectos de definir perímetros potencialmente afectables, en el caso del Barrio San Rafael se consideró la **distancia de viaje** como la variable del modelo. La amenaza puede categorizarse en Niveles, denominados Bajo, Medio y Alto.

Sea *x* = alcance máximo, en metros, la variable aleatoria de análisis. Se define amenaza por caída de bloques, ***P(e)***, como la probabilidad de que *x* exceda una distancia *D* determinada, en el lanzamiento de un bloque cualquiera, y corresponde a la probabilidad total de excedencia de dicha abscisa *D*:

$$P(e) = P(x > D) = P(e|V_1)P(V_1) + P(e|V_2)P(V_2) + \ldots + P(e|V_n)P(V_n)$$

en donde:

$P(e)$ = amenaza por caída de bloques, calculada para cada sección

x = alcance máximo (m), variable aleatoria de análisis

D = abscisa correspondiente a un nivel de amenaza determinado

$P(e|V_1)$, $P(e|V_2)$, ..., $P(e|V_n)$ = probabilidad de excedencia de la abscisa *D* dado que se ha desprendido un bloque de volumen V_1, V_2, ..., V_n en un lanzamiento al azar

$P(V_1)$, $P(V_2)$, ..., $P(V_n)$ = probabilidad absoluta de que caiga un bloque de tamaño V_1, V_2, ..., V_n

Se considero un factor de seguridad de 1.3 para todas las distancias máximas de viaje que se estimaron, para condición con gaviones y condición actual. Ver Anexo 4 Calculo de memorias.

11. ANALISIS GEOTECNICO E HIDRAULICOS DE MEDIDAS CORRECTIVAS

Como resultado de los análisis efectuados en los capítulos anteriores es indispensable la construcción de obras de mitigación geotécnicas e hidráulicas que permitan el control de los movimientos probables sobre ambas laderas de la zona de estudio. A continuación se presenta la descripción de las obras para cada uno de los sitios en cuestión. Vale la pena anotar que las obras descritas en este capítulo corresponden a las alternativas requeridas para garantizar la estabilidad geotécnica de la ladera. Las obras correspondientes al control de socavación en los cauces de las quebradas, así como las obras complementarias de drenaje superficial están igualmente contempladas en el presente capítulo.

11.1. CRITERIOS APLICADOS A LOS DISEÑOS DE OBRA

Se analizaron alternativas de mitigación en general con elementos verticales profundos debido a que la superficie de falla se encontraba muy profunda, destacándose elementos tipo caissons, micropilotes, anclajes, pantallas en concreto reforzado sobre elementos verticales y/o ancladas, retículas de vigas en concreto reforzado con anclajes, etc. También se analizaron alternativas para mejorar la estabilidad realizando grandes movimientos de tierra con el objeto de descargar la masa inestable presente en el sitio y alternativas combinadas, es decir con elementos verticales profundos y moderados movimientos de tierra.

La selección de la alternativa más adecuada se realizó previo análisis numérico y evaluación económica de las diferentes propuestas de mitigación a los fenómenos manifestados en el sitio.

La opción escogida, diseñada y presentada en los planos constructivos corresponde a obras de contención, drenajes, subdrenajes y movimientos de tierra con el fin de minimizar los desplazamientos del terreno, siempre y cuando las obras se construyan como se han planteado en el estudio y en el menor tiempo posible. Es importante mencionar que este análisis fue expuesto, presentado, analizado y aprobado en el Comité Técnico junto con la Interventoría, la DPAE y el Consorcio.

11.2. MÉTODOLOGIA

La metodología de trabajo para el diseño detallado de las obras comprendió una serie de actividades desde la recopilación de la información de referencia, los resultados de los trabajos de campo y laboratorio hasta la definición de los mismos diseños de las obras. Para tal efecto se realizaron las siguientes actividades:

1. Una vez recopilada y analizada la información de referencia y de campo se definieron los diferentes materiales involucrados en el movimiento y se obtuvieron sus parámetros geomecánicos.

1. Con la información geológica de superficie, geomorfología y las exploraciones de campo se definió el modelo geológico - geotécnico el cual fue la base para los análisis de estabilidad. En esta actividad se definieron los perfiles más críticos desde el punto de vista de estabilidad los cuales fueron analizados bajo varios escenarios de condiciones extremas de agua y sismo para la condición actual.

2. Con los análisis anteriores se obtuvieron valores de Factores de Seguridad los cuales según la Resolución 227 no permite zonificar los sectores en los tres grados de amenaza por remoción en masa.

3. De igual forma se realizó el análisis para la condición con obras de mitigación en tres diferentes escenarios: Parte alta, media y baja del deslizamiento tanto en La Carbonera como en El Espino. Con lo anterior, también se obtuvieron o se zonificó para los grados de amenaza por remoción en masa.

4. De esta forma se propusieron diferentes alternativas de mitigación que fueron valoradas independientemente con el propósito de tener un abanico de posibles soluciones.

5. Para la definición de estas alternativas se tuvo un contacto permanente con discusiones dinámicas con la DPAE e Interventoría.

11.3. DISEÑOS HIDRAULICOS

En este numeral se presentan los cálculos para dimensionar la sección hidráulica de los principales cauces que atraviesan los deslizamientos del Espino y La Carbonera. Este dimensionamiento se realiza con el fin de proponer una estructura de revestimiento de las paredes del canal y la localización de diques transversales a los cauces, cuyo objetivo es reducir la velocidad en dichos cauces

Las obras hidráulicas planteadas consisten en canales, drenes de penetración, caissons drenantes y revestimiento de las quebradas existentes en el sector.

Metodología

- El procedimiento para la realización del estudio hidráulico de cada una de las quebradas, fue el siguiente:
- Realizar una caracterización hidroclimatológica de la zona de estudio y establecer un volumen de agua infiltrado en presencia de un evento de lluvia en la zona.

- Establecer los posibles volúmenes de agua infiltrados en la zona de estudio, por efecto del colapso de una red de acueducto o de alcantarillado.
- A partir de la topografía, se construyeron secciones transversales a lo largo del tramo en estudio, aproximadamente distanciadas a 50 metros.
- Con estas secciones transversales, se construyó el perfil del fondo del lecho de las quebradas, para determinar los sitios en los cuales el flujo, por efecto de la pendiente, puede presentar velocidades altas y por ende, procesos de arrastre de material sólido.
- De igual forma, a partir de las secciones transversales se definió la sección del canal con revestimiento en sus paredes con gaviones en ambas márgenes, como medida de protección.
- Se determinaron los parámetros hidráulicos de dichas secciones transversales, con base en la geometría obtenida de la topografía y de las observaciones en campo para obtener la rugosidad en el cauce.
- Se calculó el perfil del flujo en los cauces, empleando los caudales obtenidos en el capítulo de hidrología, asumiendo que el flujo se comporta como un flujo gradualmente variado, y para cada sección transversal se definió el nivel correspondiente.
- Del cálculo hidráulico, para cada sección transversal se estimó el área hidráulica, la velocidad del flujo, el ancho de la sección, el número de Froude, entre otros parámetros.

Todos los cálculos hidráulicos de cada sección se realizaron con ayuda del modelo hidráulico HEC-RAS (U. S. Army Corps Engineers, 2002), ampliamente usado en Estados Unidos y Latinoamérica. Los resultados del modelo hidráulico se presentan en los anexos correspondientes.

Escenarios para el diseño de los canales

Para la simulación del comportamiento hidráulico del cauce, se planteó un escenario de modelación empleando el software HEC-RAS. Este escenario se desarrolló de tal manera que se plantearon las alternativas de mitigación de la amenaza por inundación. Tal escenario analiza el cauce colocando muros en gaviones longitudinalmente y diques transversales para disminuir la energía del flujo.

Modelación matemática con HEC-RAS

El análisis hidráulico para el canal, se realizó empleando el software HEC-RAS del U.S. Army Corp., de los Estados Unidos. Este programa fue desarrollado para calcular perfiles de flujo gradualmente variado en un canal con secciones transversales regulares o irregulares. El programa calcula los perfiles de flujo empleando el método del paso estándar.

La modelación matemática se realizó tomando las secciones transversales de acuerdo con las características mencionadas anteriormente, y que mas adelante se exponen para cada quebrada.

Cálculo de los perfiles del flujo (flujo gradualmente variado)

Un flujo gradualmente variado constituye una clase del flujo permanente no uniforme en el cual, existe una variación continua a lo largo del canal, de la profundidad del flujo y de igual forma en el área, la velocidad, el perímetro mojado, el radio hidráulico, entre otros (Chaudhry, 1994).

La posible forma que pueda tener la superficie libre está en función de las profundidades real, normal y crítica.

Para el análisis de este tipo de flujos, el HEC-RAS, presenta las siguientes consideraciones:

- El flujo es permanente, es decir, constante en el tiempo.
- La distribución de presiones en cada sección transversal del canal es hidrostática (líneas de corriente paralelas).
- La pendiente del canal es pequeña y uniforme.
- Para el cálculo de la línea de energía, se permite el uso de las ecuaciones de flujo uniforme, que consideran que la pérdida de energía por fricción es la más importante.
- El flujo gradualmente variado, es calculado en el HEC-RAS, empleando el método del paso estándar el cuál es una de las metodologías más utilizados para el cálculo tanto de perfiles de flujo en canales prismáticos como en aquellos de geometría variada.

- El método consiste en estimar la profundidad del flujo en las diferentes secciones transversales, iniciando a partir de los datos de profundidad conocidos para una sección, que en la mayoría de los casos corresponde a la sección de control. Si el flujo es subcrítico los cálculos se inician desde aguas abajo y se desarrollan hacia aguas arriba y si es supercrítico se parte de aguas arriba continuándose hacia aguas abajo.
- Se determina, por algún método de convergencia, la profundidad del flujo en una sección transversal localizada en una determinada abscisa de forma que satisfaga las relaciones de energía en el cauce.

Existen varias formas de calcular el flujo gradualmente variado en un canal. El HEC-RAS, emplea el método del paso estándar, que a continuación se enuncia de forma breve:

11.3.1. Análisis Hidráulico De La Quebrada Santa Rita

A continuación se presentan los cálculos, resultados y análisis realizados para determinar las características hidráulicas de la quebrada Santa Rita que conforma uno de los límites del deslizamiento en el barrio El Espino. Para tal fin se presenta el orden de la información empleada.

Información empleada para el análisis

- **Topografía**

Para realizar los cálculos hidráulicos de la quebrada en el área del deslizamiento, se trabajó con el levantamiento topográfico de la zona, el cual cuenta con curvas de nivel cada metro.

- **Caudales**

En la tabla 11-1 Se presentan los caudales empleados para los análisis hidráulicos en el cauce de la quebrada Santa Rita; estos caudales fueron obtenidos a partir del análisis de información hidrológica de la zona de estudio.

Tabla 11-1. Caudales empleados para la quebrada Santa Rita

Periodo de retorno (años)	Caudal pico (m3/s)
2.33	0.50
3	0.64
5	0.92
10	1.31
25	1.86
50	2.31
100	2.78

- **Condición de frontera aguas abajo y aguas arriba**

Para la condición de frontera aguas abajo, que la profundidad del flujo corresponde a la profundidad en condiciones normales de flujo permanente y uniforme.

De igual forma, para la condición de frontera aguas arriba dadas las características de flujo torrencial con tendencia a ser supercrítico, se asumió también la profundidad normal para las diferentes quebradas.

- **Sección transversal propuesta para el canal**

La sección planteada para esta quebrada, corresponden a una sección en gaviones, cuyo ancho en la base de la misma corresponde aproximadamente a 10 m de longitud, que es el ancho promedio del cauce de la quebrada, según se desprende de las secciones topográficas. En la **Figura 11.1**, se presenta la sección transversal propuesta para dicha quebrada.

La sección transversal se diseñó para un caudal de 2.78 m^3/s a fin de evitar los desbordamientos, ya que estos podrían generar problemas de socavación en la zona estabilizada.

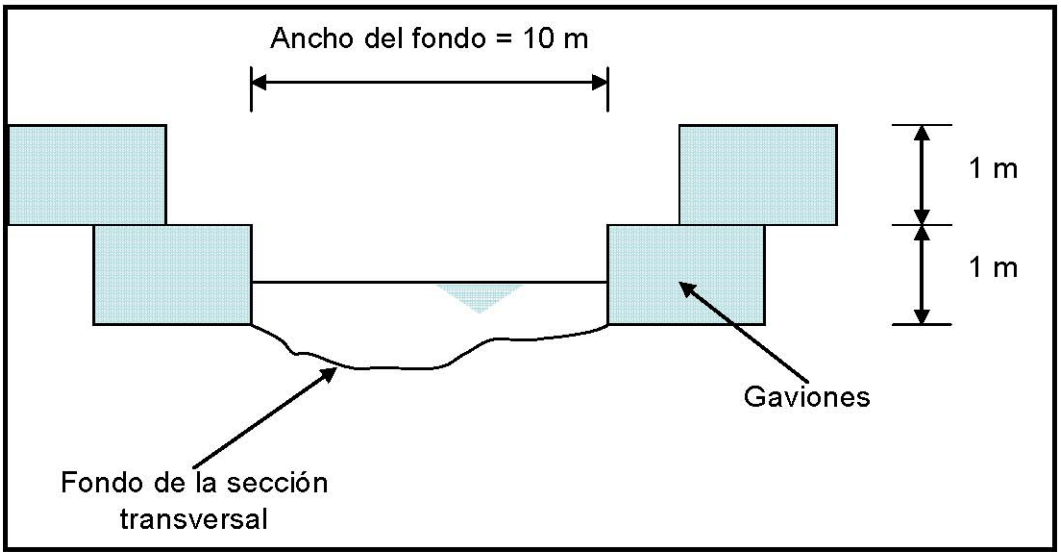


Figura 11-1. Sección transversal Quebrada Santa Rita

- **Coeficiente de rugosidad de Manning**

Para todos los cálculos hidráulicos y para todas las alternativas se asumió la rugosidad en el canal con un valor igual a 0.030, el cuál es un valor típico para este tipo de estructura.

- **Perfil longitudinal del cauce**

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la quebrada Santa Rita, dadas las altas pendientes, el régimen del flujo es de tipo supercrítico, con tendencias a velocidades altas del flujo. Como se puede apreciar en la **Figura 11.2**, está quebrada en la abscisa 300 m, presenta un aumento bastante fuerte en la pendiente, razón por la cual, entre las abscisas 150 y 300 se planteó la colocación de diques transversales al cauce.

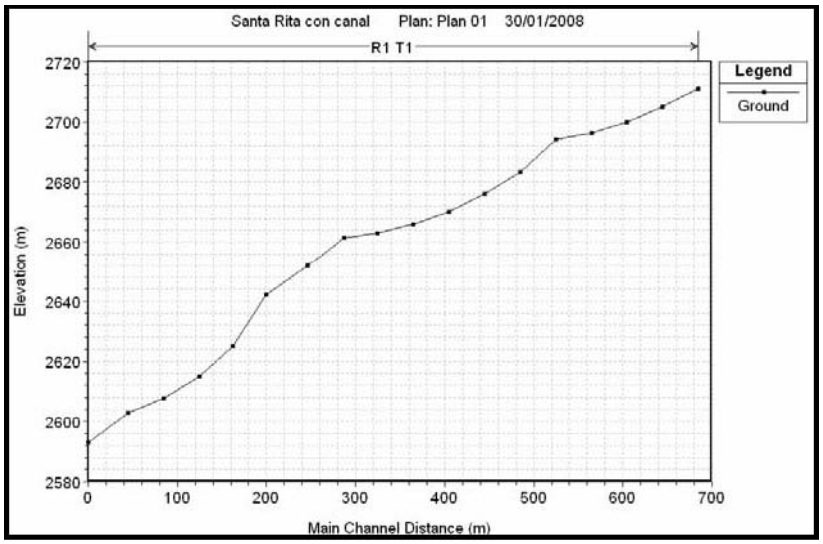


Figura 11-2. Perfil longitudinal Quebrada Santa Rita

Resultados de la simulación del flujo

Los análisis de esta simulación para la quebrada Santa Rita, incluyendo las obras propuestas junto con los niveles alcanzados por el flujo, se presentan en el **Anexo 4** (Memoria de Cálculo). En el **Tabla 11.2** se presentan los cálculos hidráulicos más importantes para dicha quebrada.

Desde el punto de vista hidráulico a lo largo de la corriente del cauce de la quebrada Santa Rita se presentan las siguientes características:

- El cauce de la quebrada Santa Rita en términos generales, en su paso por la zona de estudio, se encuentra en cercanías a zonas residenciales pobladas, situación que implica la entrada de flujo de aguas residuales hacia el cauce, por parte de los pobladores de la zona.
- La pendiente en el tramo analizado es bastante empinada, y particularmente entre las abscisas 150 y 300 m, el flujo tiende a aumentar ostensiblemente su velocidad, por el fuerte cambio en la pendiente.
- Debido a las altas pendientes, se desarrolla flujo supercrítico a lo largo del cauce de la quebrada, presentándose velocidades entre 2.0 m/s a 6.0 m/s. lo anterior implica que entre mayor sea la caída, mayor será la velocidad.

- Teniendo en cuenta que se presentan velocidades altas en el cauce, las profundidades del flujo, tienden a ser muy pequeñas, situación típica en un flujo supercrítico. Esto implica, que la altura de 2 metros considerada para la protección en gaviones, es bastante conservadora dado que se puede permitir el paso de caudales superiores al correspondiente a una creciente de 100 años de periodo de retorno.
- Dado que se presentan velocidades del flujo bastante altas, se debe tener cuidado en la cimentación de los gaviones, dado que velocidades altas, pueden ocasionar la socavación y/o el arrastre del material de base de la estructura, situación que conllevaría al colapso de los muros longitudinales.

Para reducir un poco el impacto que generan las altas velocidades, se recomienda la colocación de muros transversales al cauce, que reduzcan la energía del flujo, y permitan el reacomodo de la pendiente del fondo del cauce.

Análisis hidráulico de la alcantarilla circular en la quebrada Santa Rita

En la parte baja de la quebrada Santa Rita, se vio la necesidad de proyectar un conducto circular en un tramo de 50 m (desde la abscisa K0+680 hasta la abscisa K0+730), con el fin de pasar el flujo bajo un relleno que se tiene proyectado por efectos del terraceo del deslizamiento. A continuación se presentan los cálculos realizados para estimar las condiciones hidráulicas de dicho conducto.

Tabla 11-2. Resultados simulación Quebrada Santa Rita

Absc.	Min Elev. Canal	Elev. Superficie del agua	Elev. Superficie crítica	Elev. Línea energía	Pend. Línea energía	Vel.	Área del flujo	Ancho superior	Número de Froude
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
720	2711.08	2711.29	2711.29	2711.37	0.02	1.25	2.23	14.13	1.00
680	2705.04	2705.09	2705.25	2707.46	2.64	6.83	0.41	9.00	10.25
640	2700.00	2700.16	2700.21	2700.36	0.04	1.98	1.40	9.00	1.60
600	2696.44	2696.54	2696.65	2697.08	0.23	3.26	0.85	9.00	3.39
560	2694.19	2694.37	2694.40	2694.52	0.03	1.72	1.62	9.00	1.30

Absc.	Min Elev. Canal	Elev. Superficie del agua	Elev. Superficie crítica	Elev. Línea energía	Pend. Línea energía	Vel.	Área del flujo	Ancho superior	Número de Froude
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
520	2683.24	2683.45	2683.45	2683.56	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
480	2676.00	2676.21	2676.21	2676.32	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
440	2670.09	2670.11	2670.30	2683.50	46.77	16.21	0.17	9.00	37.50
400	2666.00	2666.10	2666.21	2666.63	0.22	3.22	0.86	9.00	3.32
360	2663.00	2663.16	2663.21	2663.35	0.04	1.94	1.43	9.00	1.55
322	2661.31	2661.46	2661.52	2661.67	0.05	2.04	1.36	9.00	1.67
281	2651.90	2651.92	2652.11	2666.66	54.88	17.01	0.16	9.00	40.30
235	2642.19	2642.40	2642.40	2642.51	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
197	2625.00	2625.21	2625.21	2625.32	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
160	2615.13	2615.34	2615.34	2615.45	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
120	2607.56	2607.77	2607.77	2607.88	0.02	1.45	1.92	9.00	1.00
80	2602.77	2602.82	2602.98	2604.81	1.97	6.25	0.44	9.00	8.98
35	2593.00	2593.25	2593.21	2593.33	0.01	1.26	2.20	9.00	0.81

Información empleada para el análisis

- **Sección transversal del tubo**

El conducto circular, se predimensionó con un diámetro de 2.0 m, de forma que se le pueda realizar el mantenimiento sin mayores traumatismos (es decir, en ningún momento se produciría el taponamiento del tubo). Al ser un conducto en concreto, su coeficiente de rugosidad para efectos de diseño, será de 0.013.

Pendiente longitudinal del tubo

Este elemento, se diseñará para una pendiente longitudinal de 2.0% tratando de seguir el alineamiento del terreno natural.

Metodologíade cálculo

Considerando que las obras operarán con control en la entrada, y suponiendo una pendiente longitudinal de 1.0%, se empleó la ecuación de energía entre la profundidad del agua en la entrada de la alcantarilla y la altura crítica que se forma en seguida, así:

$$H_w = d_c + (1+k)\frac{V_c^2}{2g}$$

donde:

Hw Nivel del agua en inmediaciones de la entrada del conducto (m)

dc Altura crítica (m)

Vc Velocidad del flujo correspondiente a la altura crítica (m/s)

K Coeficiente de pérdidas generadas en la entrada del conducto

Longitud de la alcantarilla en (m) Q

Caudal en (m^3/s)

A Area mojada en (m^2)

R Radio hidráulico en (m)

Los coeficientes de pérdida K se obtuvieron de los manuales del U.S. Department of Transportation de la Federal Highway Administration, del cual se adoptó un coeficiente igual a

0.5.

De la ecuación anterior, se obtiene el caudal máximo que pueden drenar un conducto con una sección transversal de 2.0 m, en concreto (n = 0.013) y con una pendiente de 0.02 m/m.

El caudal máximo se obtiene considerando que la profundidad del flujo de agua en la entrada no supera el diámetro o la altura de la estructura, es decir:

$$\frac{H_w}{D} \leq 1.0$$

Donde:

Hw Nivel del agua en inmediaciones de la entrada del conducto (m)

D Altura interna de la alcantarilla (m)

Resultados de los cálculos

Los resultados obtenidos, se presentan en la siguiente tabla. Aquí se puede apreciar, que para la pendiente dada para este conducto, el flujo se comporta en régimen supercrítico, con una profundidad aproximada de 0.62 m.

Tabla 11-3. Memoria alcantarilla Quebrada Santa Rita

Culvert Calculator Report
Santa Rita

Solve For: Headwater Elevation

Culvert Summary			
Allowable HW Elevation	0.000 m	Headwater Depth/ Height	0.62
Computed Headwater Elevation	2,614.938 m	Discharge	2.7800 m³/s
Inlet Control HW Elev	2,614.792 m	Tailwater Elevation	0.000 m
Outlet Control HW Elev	2,614.938 m	Control Type	Entrance Control

Grades			
Upstream Invert	2,613.700 m	Downstream Invert	2,612.500 m
Length	50.000 m	Constructed Slope	0.024000 m/m

Hydraulic Profile			
Profile	S2	Depth, Downstream	0.489 m
Slope Type	Steep	Normal Depth	0.465 m
Flow Regime	Supercritical	Critical Depth	0.793 m
Velocity Downstream	4.691 m/s	Critical Slope	0.003082 m/m

Section			
Section Shape	Circular	Mannings Coefficient	0.013
Section Material	Concrete	Span	1.981 m
Section Size	1950 mm	Rise	1.981 m
Number Sections	1		

Outlet Control Properties			
Outlet Control HW Elev	2,614.938 m	Upstream Velocity Head	0.297 m
Ke	0.50	Entrance Loss	0.148 m

Inlet Control Properties			
Inlet Control HW Elev	2,614.792 m	Flow Control	Unsubmerged
Inlet Type	Square edge w/headwall	Area Full	3.08 m²
K	0.00980	HDS 5 Chart	1
M	2.00000	HDS 5 Scale	1
C	0.03980	Equation Form	1
Y	0.67000		

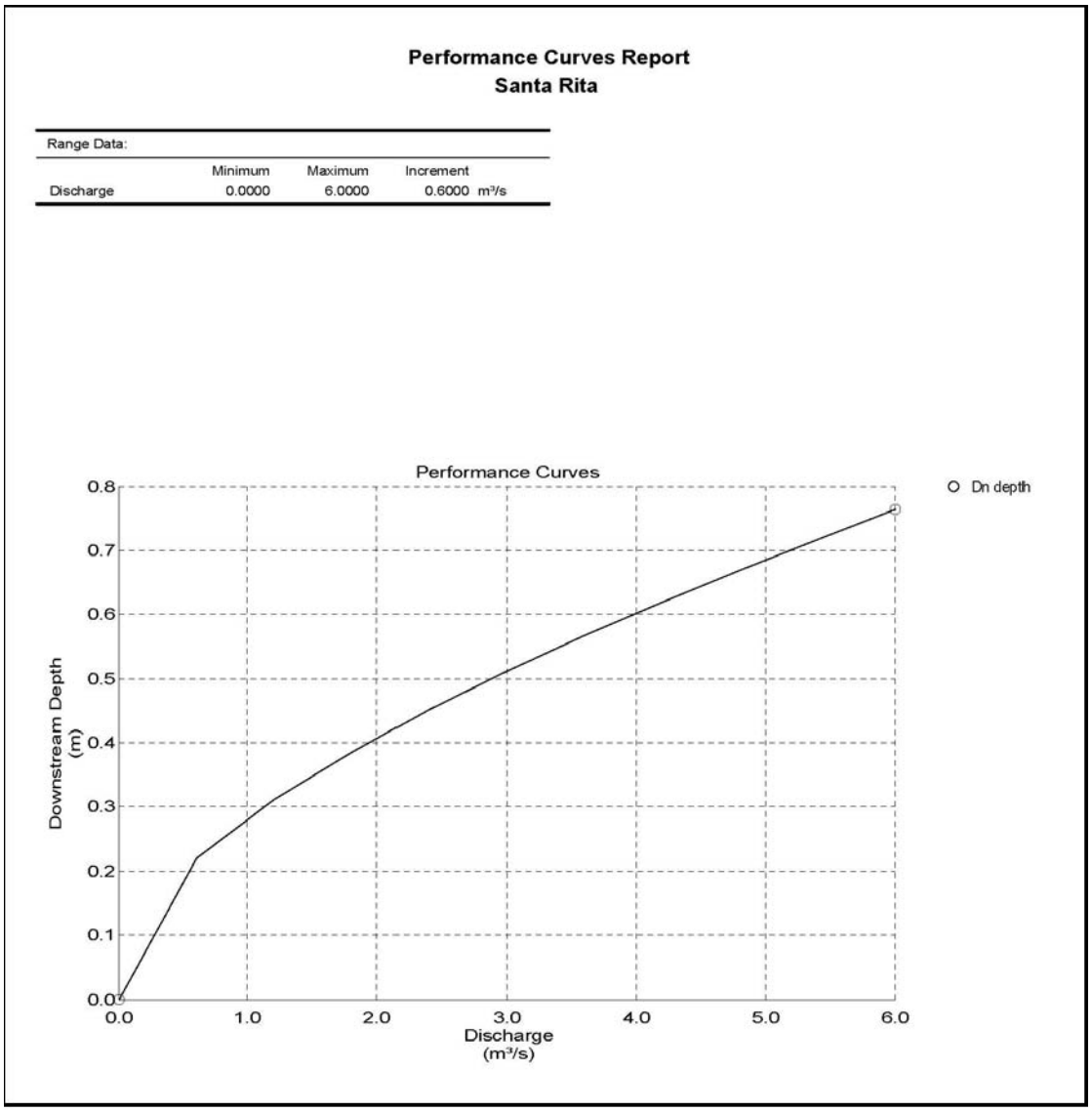


Figura 11-3. Alcantarilla Quebrada Santa Rita

Como se puede apreciar en la figura, la profundidad del flujo para el caudal dado (2.70 m^3/s), es cercana a los 0.60 m, valor muy inferior al diámetro del conducto, lo que indica que hidráulicamente hay capacidad para transportar dicho caudal.

Es importante resaltar, que el criterio de escogencia del diámetro de 2.0 m se hizo con el fin de facilitar el paso de elementos grandes que puedan potencialmente obstruir el paso, y generar problemas de represamiento, los cuales a su vez se podrían manifestar en deslizamientos en el área de influencia del canal.

11.3.2. ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LA QUEBRADA SANTO DOMINGO (ROSALES)

A continuación se presentan los análisis hidráulicos realizados para determinar las características de la quebrada Santo Domingo (Rosales), a su paso por la zona del deslizamiento. Para llevar a cabo el análisis hidráulico, se utilizó la información que a continuación se menciona.

Información empleada para el análisis

- **Topografía**

Al igual que en la quebrada Santa Rita, los cálculos hidráulicos de esta quebrada se realizaron empleando el levantamiento topográfico de la zona, que presenta curvas de nivel cada metro.

- **Caudales**

En la siguiente tabla, se presentan los caudales estimados en el informe de hidrología de la zona de estudio, y que se emplearon para analizar hidráulicamente el cauce de la quebrada Santo Domingo (Rosales).

- **Condición de frontera aguas abajo y aguas arriba**

Se asumió para la condición de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo, la profundidad correspondiente a flujo uniforme y permanente.

- **Perfil longitudinal del canal**

La quebrada Santo Domingo (Rosales), es un caso similar al de la quebrada Santa Rita, debido a que las fuertes pendientes hacen que el régimen del flujo sea supercrítico, con velocidades del flujo altas.

En la Tabla 11-4., se muestra el perfil longitudinal de la quebrada Santo Domingo (Rosales), donde se aprecia que en entre las abscisas 250 y 350 se presenta un aumento bastante fuerte en la pendiente, razón por la cual, se planteó la colocación de diques transversales al cauce en dicho tramo.

Tabla 11-4. Caudales empleados para la quebrada Santo Domingo (Rosales)

Periodo de retorno (años)	Caudal pico (m3/s)
2.33	0.44
3	0.57
5	0.81
10	1.17
25	1.65
50	2.05
100	2.47

- **Sección transversal propuesta para el cauce**

El perfil transversal recomendado para esta quebrada, corresponden a una sección en gaviones cuyo ancho en la base es de 10 m de longitud, similar a la de la quebrada Santa Rita, debido a que manejan un caudal similar.

- **Coeficiente de rugosidad de Manning**

Para esta quebrada, se supuso un coeficiente de rugosidad en el canal igual a 0.030, constante a lo largo del perfil de la quebrada.

Resultados de la Simulación del Flujo

Los análisis para esta quebrada, incluyendo las obras propuestas junto con los niveles alcanzados por el flujo, se presentan en el Anexo 4, memoria de cálculo.

A continuación, se presentan los análisis de los resultados obtenidos para esta quebrada:

- La quebrada Santo Domingo (Rosales) presenta una pendiente longitudinal constante a lo largo de su trayecto por la zona de estudio, así como se puede apreciar en la **Figura 11.4**. Esta pendiente es de aproximadamente 19.9%, valor relativamente alto, y que por supuesto implica un régimen de flujo supercrítico a lo largo del cauce.
- Al igual que en la quebrada anterior, el régimen de flujo supercrítico, implica que las velocidades en el canal son altas, para este caso oscilan entre 1 y 3 m/s, un poco inferiores a las velocidades en el cauce de la quebrada Santa Rita.

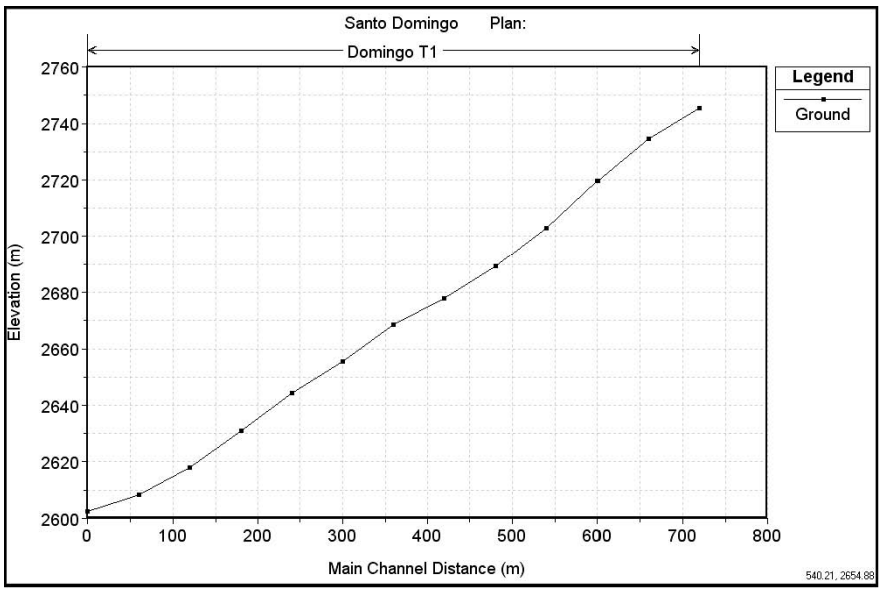


Figura 11-4. Perfil longitudinal Quebrada Santo Domingo (Rosales)

Análisis hidráulico quebrada la carbonera

En esta sección, se presentan los análisis hidráulicos para determinar las características de la quebrada La Carbonera.

Información empleada para el análisis

- **Topografía**

  Para este cauce, los cálculos hidráulicos se realizaron utilizando la información topográfica correspondiente al levantamiento de la zona con curvas de nivel cada metro.

- **Condición de frontera aguas abajo y aguas arriba**

  Tanto para la condición de frontera aguas arriba como aguas abajo, se asumió la profundidad normal del flujo dado el carácter torrencial en este cauce, evidenciado por las fuertes pendientes que éste presenta.

- **Perfil longitudinal del canal**

  Para esta quebrada la pendiente presenta un comportamiento similar al de los cauces anteriores, con altas pendientes y tendencias a un flujo en régimen supercrítico, con altas velocidades.

  En la Tabla 11-5., se muestra el perfil longitudinal de la quebrada, en el cual se puede apreciar la alta pendiente para esta quebrada, cuyo valor promedio es de 24%, ratificando que el flujo tiene tendencia a comportarse como un flujo en régimen supercrítico.

Tabla 11-5. Resultados simulación Quebrada Santo Domingo (Rosales)

Abscisa	Min Elev. Canal	Elev. Superficie del agua	Elev. Superficie Critica	Elev. Línea de energía	Pendiente línea de energía	Velocidad	Área del flujo	Ancho superior	Número de Froude
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
0	2745.32	2745.42	2745.52	2745.83	0.17	2.84	0.86	9.00	2.93
60	2734.69	2734.81	2734.89	2735.08	0.09	2.33	1.05	9.00	2.18
120	2719.57	2719.77	2719.77	2719.86	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
180	2703.03	2703.23	2703.23	2703.32	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
240	2689.24	2689.44	2689.44	2689.53	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
300	2677.96	2678.16	2678.16	2678.25	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
360	2668.56	2668.57	2668.76	2749.12	1096.93	39.76	0.06	9.00	153.40
420	2655.51	2655.71	2655.71	2655.80	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
480	2644.29	2644.49	2644.49	2644.58	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
540	2630.87	2631.07	2631.07	2631.17	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
600	2617.99	2618.19	2618.19	2618.28	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99
660	2608.43	2608.45	2608.63	2620.69	47.62	15.50	0.16	9.00	37.34
720	2602.36	2602.56	2602.56	2602.66	0.02	1.38	1.78	9.00	0.99

- **Caudales**

  Se presenta en el **Tabla 11.6**, los caudales para diferentes periodos de retorno en la quebrada La Carbonera, los cuales fueron estimados en el informe de hidrología.

Tabla 11-6. Caudales empleados para la quebrada La Carbonera

Periodo de retorno (años)	Caudal pico (m3/s)
2.33	0.17
3	0.22
5	0.32
10	0.45
25	0.64
50	0.80
100	0.96

- **Sección transversal propuesta para el cauce**

  Dado que los caudales para esta quebrada son inferiores a los obtenidos para las quebradas Santo Domingo (Rosales) y Santa Rita, la sección transversal, en gaviones presentará un ancho en la base de 5 m de longitud, nuevamente con dos filas de gaviones como se muestra en la Figura 11.6.

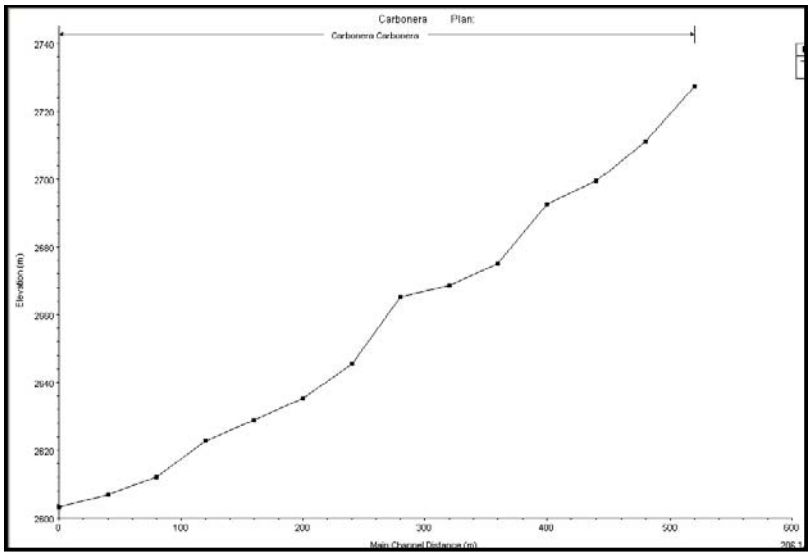


Figura 11-5. Perfil longitudinal Quebrada La Carbonera

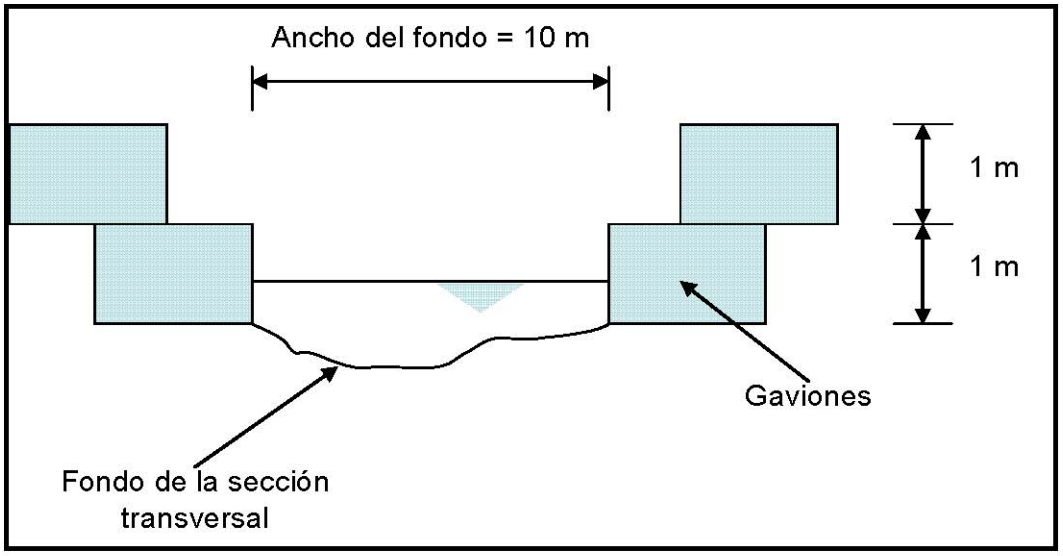


Figura 11-6. Sección transversal planteada para la Quebrada La Carbonera

Coeficiente de rugosidad de Manning

Se supuso para esta quebrada, un coeficiente de rugosidad en el canal igual a 0.030, al igual que en los casos anteriores.

Resultados de la simulación del flujo

Los análisis más importantes para esta quebrada, se presentan en el Anexo 3 Ensayos de Laboratorio.

A continuación, se presentan los análisis de los resultados obtenidos para esta quebrada:

Para este cauce, nuevamente se evidencia que el flujo en el canal es supercrítico, con algunos sitios donde se presentan velocidades altas, dada la fuerte pendiente del lecho, según se desprende del perfil longitudinal de la quebrada.

El rango de velocidades va desde 1.2 m/s, en los extremos aguas arriba y aguas abajo del cauce, hasta 6.2 m/s en la sección transversal localizada en la abscisa 120 m, y también con una velocidad de 4.8 m/s en la abscisa 380 m.

Tabla 11-7. Resultados simulación Quebrada La Carbonera

Abscisa	Min Elev. Canal	Elev. Superficie del agua	Elev. Superficie Critica	Elev. Línea de energía	Pendiente línea de energía	Velocidad	Área del flujo	Ancho superior	Número de Froude
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m2)	(m)	
0	2727.31	2727.38	2727.50	2728.02	0.400563	3.53	0.28	4.00	4.23
40	2711.00	2711.19	2711.19	2711.28	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
80	2699.57	2699.76	2699.76	2699.85	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
120	2692.48	2692.52	2692.67	2694.46	2.536559	6.18	0.16	4.00	9.80
160	2675.07	2675.26	2675.26	2675.35	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
200	2668.73	2668.79	2668.92	2669.62	0.624042	4.04	0.25	4.00	5.18
240	2665.24	2665.39	2665.43	2665.53	0.033023	1.64	0.61	4.00	1.35
280	2645.40	2645.59	2645.59	2645.68	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
320	2635.33	2635.52	2635.52	2635.61	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
360	2629.00	2629.05	2629.19	2630.24	1.123945	4.83	0.21	4.00	6.77
400	2622.75	2622.85	2622.94	2623.15	0.115278	2.41	0.41	4.00	2.39
440	2612.00	2612.19	2612.19	2612.28	0.017411	1.35	0.74	4.00	1.00
480	2607.00	2607.05	2607.19	2608.54	1.646412	5.42	0.18	4.00	8.05
520	2603.28	2603.43	2603.47	2603.58	0.037834	1.71	0.58	4.00	1.43

Teniendo en cuenta que este es el cauce con pendiente más empinada, se hace necesario plantear obras que reduzcan la velocidad del flujo, con el fin de reducir el impacto que tuviese el flujo sobre los muros longitudinales en gaviones. Estas estructuras, corresponden a diques transversales que modifiquen la pendiente del cauce y reduzcan la energía del flujo. Estas estructuras se recomiendan especialmente en el tramo entre las abscisas 400 y 200 m, sitios donde se evidencian caídas fuertes en el perfil longitudinal de la quebrada.

Finalmente, se debe prestar especial atención a la cimentación de los diques longitudinales en gaviones, dado que velocidades altas pueden generar el colapso de la estructura, por efecto de socavación.

11.3.3. DISEÑO DE CANALES PERIMETRALES

Para permitir que el drenaje superficial de la parte alta de la zona de estudio (y que abarca las viviendas que se localizan en el costado occidental), no afecte las obras de estabilización, es decir, el terraceo y pantallas ancladas, que se construirán hacia la parte media y baja del deslizamiento, se propone la colocación de canales perimetrales que canalicen el flujo hacia las quebradas Santa Rita, La Carbonera y Santo Domingo (Rosales), evitando la entrada de caudal de agua a la zona de terrazas. Estos canales serán diseñados suponiendo flujo uniforme (ver **Planos 14.4, 14.5 y 14.6** en el **Anexo 5**).

Información empleada para el análisis

- **Topografía**

Para estos canales, los cálculos hidráulicos se realizaron utilizando la información topográfica correspondiente al levantamiento de la zona con curvas de nivel cada metro. De igual forma, y para efectos de disminuir la pendiente de cada canal, se reacomodó el fondo del canal, con tramos cuya pendiente sea del 2.0%, los cuales se unen por medio de caídas o rápidas escalonadas que disipan la energía del flujo.

- **Caudales**

Para efectos de seguridad, la sección del canal se diseñó par soportar la creciente de 100 años. En total son tres canales perimetrales, y cada uno de ellos drena hacia los cauces principales: El canal perimetral 1, drena hacia la

quebrada Santa Rita; el canal perimetral 2 drena hacia la quebrada Santo Domingo (Rosales), y el canal perimetral 3, drena hacia La Carbonera. Los caudales de diseño de cada canal, se presentan en la Tabla 11-8.

Tabla 11-8. Caudales empleados para el diseño de canales perimetrales

Canal Perimetral	Caudal pico (m3/s)
1	2.78
2	2.47
3	0.96

- **Pendiente del canal**

Como se mencionó anteriormente, cada canal presenta tramos con pendiente variable de acuerdo con las condiciones del terreno, y se incluyen rápidas escalonadas que tiene como fin reducir la energía del flujo. Se opta por ajustarse a la forma del terreno natural dado que así se reduzcan los movimientos de tierra.

- **Coeficiente de rugosidad de Manning**

Se supuso para los canales un coeficiente de rugosidad igual a 0.015, correspondiente a una estructura en roca o material grueso (V. T. Chow, 1994).

- **Análisis para el cálculo de la sección transversal**

Los canales fueron dimensionados con una sección rectangular, con revestimiento en concreto. De esta manera para un coeficiente de rugosidad igual a 0,015 y una pendiente promedio de 2.0%, se obtuvieron las secciones de los canales que se presentan en la Tabla 11-9.

Tabla 11-9. Cálculos para las secciones de los canales perimetrales

Canal	TIPO DE CANAL	Q (m3/s)	n	So (m/m)	Q n/So(1/2)	B (m)
1	Canal Perimetral	2.78	0.015	0.02	0.295	1.5
2	Canal Perimetral	2.47	0.015	0.02	0.266	1.5
3	Canal Perimetral	0.96	0.015	0.02	0.102	1.5

Canal	Yn (m)	A (m2)	P (m)	R (m)	AR(2/3)	V (m/s)	Número de Froude
1	0.46	0.68	2.41	0.28	1.50	4.07	1.92
2	0.42	0.63	2.34	0.27	1.50	3.93	1.94
3	0.22	0.33	1.94	0.17	1.50	2.90	1.97

Formula de Maning: $nQ / (So)^{1/2} = AR^{2/3}$

A: b y

P: 2y + b

R: A / P

Si se deja un borde libre de 10 cm, las secciones de los diferentes canales serían los que se presentan en la **Tabla 11.10.**

Tabla 11-10. Secciones de los canales perimetrales

Canal	Ancho del canal (m)	Alto del canal (m)
1	1.5	0.60
2	1.5	0.60
3	0.5	0.50

Dado que la pendiente de 2.0% sigue siendo alta, el flujo que se presenta en los diferentes canales es supercrítico con velocidades altas por encima de 1.0 m/s. Esta situación ratifica entonces, el revestimiento del canal, el cual

deberá soportar el desgaste producido por las altas velocidades en estos canales.

Caídas escalonadas

Para las caídas escalonadas el tamaño de los escalones (longitudes de huella y contrahuella) viene condicionado por el proceso constructivo. Esto es, dependiendo del tipo de material, la altura del gavión, de acuerdo con las especificaciones constructivas.

Habitualmente, la altura entre escalones es del orden de 0.90 m a 1.20 m. Para el caso de las estructuras a colocar en los canales perimetrales, la contrahuella tendrá una altura de 1.0 m, con una contrahuella de 2.0 m.

Como recomendación, dado que estas estructuras disipan la energía por impacto, el material de construcción de estas caídas, debe ser lo suficientemente rígido como para soportar las cargas que se presenten por el impacto del agua. En la **Figura 11.7**, se presenta el detalle de la caída escalonada planteada como elemento disipador de energía.

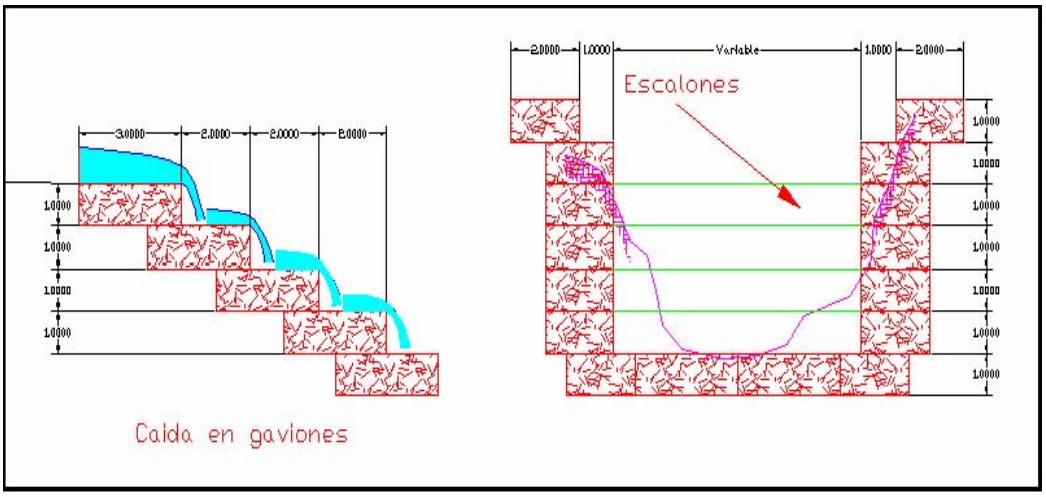


Figura 11-7. Detalle caída escalonada

11.3.4. Recomendaciones para manejo de aguas de escorrentía

Los canales perimetrales encauzarán el agua hacia las quebradas, y dado que estas obras serán primero que la restauración de los cauces, se deben construir estructuras de entrega provisionales en gaviones, que reduzcan la energía del flujo en estos puntos, y eviten la socavación en los lechos de las quebradas.

Después de la construcción de los canales perimetrales, existirá una concentración de flujo a grandes velocidades hacia los cauces naturales de las quebradas, razón por la cual se hace necesario disminuir la energía del flujo en estos cauces con el fin de disminuir la velocidad y evitar la socavación del lecho del mismo. Esta reducción de la velocidad, se puede realizar, colocando rocas de dimensión uniforme en los lechos de las quebradas, de forma intercalada. Estos elementos provisionales actuarán como elementos reductores o disipadores de energía.

11.4. DISEÑOS DE OBRAS GEOTECNICAS

Las obras de mitigación proyectadas para los deslizamientos de La Carbonera y El Espino se analizaron, plantearon y diseñaron dividiendo cada zona en tres sectores: sector superior, intermedio e inferior. Esta división permitirá posteriormente combinar las medidas de mitigación, para de esta manera ampliar el abanico de opciones, que permitan a la DPAE, escoger la más adecuada.

En este orden de ideas, se realizaron los análisis de estabilidad para la condición actual, obteniéndose los resultados ilustrados en el **Plano 9**, donde se identifican claramente las zonas de amenaza baja, media y alta. Identificadas las zonas de amenaza alta y media, se procedió a realizar los

análisis de estabilidad con obras de mitigación (ver **capítulo 10**), con el fin de disminuir el nivel de amenaza de las diferentes zonas, es decir, las zonas de amenaza alta descenderla a amenaza media o baja y las zonas de amenaza media, disminuirlas a amenaza baja. Esto por supuesto tendrá implicaciones económicas como lo veremos más adelante.

Teniendo presente lo anterior, se definieron tres alternativas principales, las cuales es posible combinarlas, como se demuestra en el capítulo siguiente. Las alternativas que se obtuvieron de los análisis se presentan a continuación:

Alternativa 1

Esta alternativa corresponde a una eventual inclusión de los habitantes de la Fase III que comprende parte de los barrios del Espino I Sector, Santa Viviana y Santo Domingo en el programa de reasentamiento de Familias localizadas en alto riesgo no mitigable que adelanta el Distrito Capital. Esta alternativa no es la más conveniente por las siguientes razones:

- La denominada Fase III, paso de ser una zona de tratamiento especial " Zonas prioritarias sujetas a análisis de riesgo" a predios en amenaza media y riesgo medio por fenómenos de remoción en masa, de acuerdo con el Concepto Técnico 4225 de 2005 emitido por la DPAE, y de acuerdo con las políticas del programa de reasentamiento solo se incluyen en el proceso los predios localizados en amenaza alta y riesgo alto no mitigable.

- En el año 2003 la DPAE, realizó el censo técnico para este Fase con el fin de tener un estimativo de las posibles familias a reubicar, en el evento dado que las conclusiones del estudio de Georiesgos (año

2004), recomendará la inclusión de estas familias. De acuerdo con el censo técnico levantado por la DPAE, se identificaron alrededor de 1029 predios construidos los cuales aplicarían al programa de reasentamiento de familias en alto riesgo no mitigable.

Lo que se traduce que a la fecha, si la alternativa fuera está, se tendría que realizar un nuevo censo técnico con el fin de actualizar el estado de ocupación de los predios a ser objeto del programa de reasentamiento.

Finalmente, el hecho de reubicar las familias de esta Fase III, no significa que no se deban adelantar obras de estabilización del fenómeno de remoción en masa que afecta el sector.

Alternativa 2. Implementación de obras en las partes superior e inferior de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino (FS > 1.3)

Esta alternativa comprende la ejecución de las obras de mitigación planteadas en la parte superior e inferior de los sectores de La Carbonera y El Espino, la conformación de la parte intermedia de los movimientos, la implementación de la instrumentación de dichas obras y la construcción de las obras hidráulicas. Para la parte superior e inferior se tendrá un nivel de amenaza bajo con un FS superior a 1.3.

Alternativa 3.

Esta primera alternativa permite disminuir el nivel de amenaza alta de la fase I, a un nivel de amenaza media, y a su vez, disminuir el nivel de amenaza media de las fases II y III a amenaza baja. Para alcanzar estos niveles de amenaza se requieren las siguientes medidas de mitigación (**Plano 10)**:

- Muro en tierra reforzada de 20 metros de altura en la base del deslizamiento.
- Pantalla anclada, cimentadas sobre pilotes inclinadas en la corona del deslizamiento (con esto se garantiza que el fenómeno de remoción en masa no continúe hacia la parte alta).
- Ampliación del polígono de Fase II a la altura del barrio San Rafael del Alto de la Estancia, Espino I sector y Santa Viviana Sector Vista Hermosa, con el fin de garantizar la viabilidad en la ejecución las obras.
- Canalización de las quebradas y manejo del agua superficial mediante canales de coronación.
- Sistema de subdrenajes mediantes trincheras y drenes horizontales, y finalmente
- El terraceo de los taludes, desde la parte inferior (tierra armada), hasta la parte superior (pantalla anclada). Es importante aclarar que estos taludes presentan un factor de seguridad entre 1.1 y 1.3, de manera que es muy probable que se presentes pequeños desprendimientos y fallas locales, lo que obliga a un periódico mantenimiento de los mismos. De no realizarse, estas fallas locales, podrán degenerar en deslizamientos de gran magnitud en la parte media del deslizamiento. Finalmente, es importante destacar que este sector corresponde básicamente a las zona de amenaza media en el **Plano 10** (es decir, fase I y parte de fase II).

Alternativa 4

Con esta alternativa se pretende garantizar un nivel de amenaza baja en toda la zona de estudio, es decir, la amenaza alta existente en Fase I, disminuirla a amenaza baja (ver **Plano 11**). Esta alternativa, es por supuesto

la que demanda mayores inversiones económicas, requiriéndose llevar a cabo las siguientes medidas de mitigación:

- Muro en tierra reforzada de 20 metros de altura en la base del deslizamiento.
- Pantalla anclada, cimentadas sobre pilotes inclinadas en ls corona del deslizamiento (con esto se garantiza que el fenómeno de remoción en masa no continúe hacia la parte alta).
- Dos pantallas ancladas en la zona intermedia del deslizamiento de 10.75 metros de altura (Fase I), cimentadas sobre micropilotes inclinados. Estas pantallas intermedias son de vital importancia, porque garantizarán la estabilidad de la parte central del deslizamiento.
- Construcción de caissons hacia la parte media de la Carbonera.
- Ampliación del polígono de Fase II a la altura del barrio San Rafael del Alto de la Estancia, Espino I sector y Santa Viviana Sector Vista Hermosa, con el fin de garantizar la viabilidad en la ejecución las obras.
- Canalización de las quebradas y manejo del agua superficial mediante canales de coronación.
- Sistema de subdrenajes mediantes trincheras y drenes horizontales en el sector de la Carbonera, y finalmente
- El terraceo de los taludes, para los sectores ubicados entre las pantallas ancladas en el deslizamiento del Espino (FaseI). Es importante aclarar que es probable que se presentes pequeños desprendimientos y fallas locales, lo que obliga a un periódico mantenimiento de los mismos.

11.4.1. Inestabilidad la Carbonera

A continuación describiremos las principales medidas de mitigación obtenidas de los análisis de estabilidad, para garantizar el adecuado comportamiento del sector de la Carbonera. Los detalles de los diseños, así como planos de detalle, especificaciones y Análisis de Precios Unitarios se presentarán en el capítulo siguiente. Los análisis realizados, muestran que la alternativa más adecuada, corresponde a la Alternativa 2, por presentar la mejor relación costo beneficio. Debido a esto, los diseños se orientaron hacia esta alternativa. Las principales obras requeridas para garantizar la estabilidad del deslizamiento la carbonera se ilustra en el **plano 1C,** destacándose los siguientes aspectos:

Sector Superior- Inestabilidad la Carbonera

Para el nivel de amenaza baja se proyecta como obras de mitigación una pantalla anclada e inclinada en concreto reforzado de aproximadamente 5.7m de altura, cimentada sobre una fila de caissons de 1.2m de diámetro, separados cada 4m, una fila de anclajes de 50ton, separados cada 4m y una fila de anclajes de 40ton, separados cada 3m.

Estas obras ubicadas en la parte superior tienen como objeto evitar la propagación del deslizamiento hacia la divisoria, es decir garantizar la estabilidad de la fase III.

Sector Intermedio - Inestabilidad la Carbonera

Se proyecta hacer un terraceo de gran parte del material deslizado y en cada una de las bermas se deberá construir cunetas articuladas, las cuales conducirán el agua hacia las quebradas existentes. Adicionalmente, se implementará una fila de micropilotes en par e inclinados 15°, separados cada 1m, en tres bolillos, amarrados mediante una viga cabezal en

concreto reforzado localizada en la terraza superior y empradización. Por otro lado se propone la instalación de cuatro filas de caissons de 1.2m de diámetro, separados cada 4m, localizados en las diferentes terrazas (**Plano 1C**).

El sector de la carbonera se caracteriza por su alta humedad y niveles freáticos altos, que obligan a un abatimiento del nivel freático; este problema fue resuelto mediante la instalación de una red de baterías de drenes horizontales, interconectados mediantes pozos drenantes tal como se ilustra en el **plano 1C**.

Sector Inferior - Inestabilidad la Carbonera

Para el sector inferior de la Carbonera se propones la construcción de dos muros en tierra armada, complementados con dos filas de soil nail. Con estas medidas se busca básicamente contrarrestar los empujes generados por la masa inestable. Hacia los flancos se propone la construcción de dos hileras de micropilotes de 10 metros de longitud. La ubicación de estas medidas de mitigación se ilustra en el **plano 1C.**

11.4.2. Inestabilidad El Espino

Para el sector de El Espino, es necesario mitigar con algún tipo de obra de contención geotécnica, el movimiento principal de carácter traslacional retrogresivo y los movimientos de carácter rotacional tipo flujo que ocurren sobre los materiales más superficiales presentando un movimiento desordenado y caótico hacia la parte baja de la ladera y hacia las quebradas Santa Rita y Santo Domingo (Rosales) principalmente. Para garantizar la estabilidad de la ladera se proyecta un terraceo de la ladera, partir del escarpe principal, en terrazas con bermas de 5 m y taludes como máximo 2H:1V. Para alcanzar un nivel de amenaza baja en el sector del espino, se requiere de 3 niveles de pantallas. La primera estaría ubicada justo en el escarpe principal, la segunda (intermedia) estaría localizada

hacia la parte media del deslizamiento y la tercera (inferior) estaría localizada en la parte baja de la ladera. Las obras de Mitigación para el Espino se muestran en el **Plano 1.E**.

Con el fin de complementar las obras de contención geotécnica, se propone como medida final la construcción de un muro en tierra armada en la parte baja de la ladera cuya implantación tiene dos objetivos. En primer lugar contribuir como un soporte adicional a la pata del deslizamiento y de esta manera incrementar la estabilidad del sector considerando que la pérdida de soporte en la base del talud fue uno de los principales detonantes del movimiento. El segundo objetivo es la remoción de todo el material localizado en la parte baja del deslizamiento que en su mayoría corresponde a depósitos inconsolidados de bajas especificaciones geotécnicas.

Sector Superior El Espino – Inestabilidad El Espino

Las obras de mitigación proyectadas para el nivel de amenaza bajo son una pantalla anclada e inclinada en concreto reforzado de aproximadamente 10m de altura, cimentada sobre dos filas de micropilotes, en par e inclinados 15°, separados cada 0.75m en tres bolillos, dos filas de anclajes de 40ton, separados cada 3m.

En el sector noroccidental del Espino (Barrio Cerro El Diamante) se proyecta dos filas de tres micropilotes separados cada 1m, en tres bolillos, con vigas de amarre, entre filas con separación aproximada de 20m y en la fila inferior una fila de anclajes de 50ton, separados cada 3m.

En el sector sur del cerro San Rafael se requiere de un relleno común compactado con el objeto de dar estabilidad al pie de la ladera.

Sector Intermedio El Espino – Inestabilidad El Espino

Se proyecta hacer un terraceo de gran parte del material deslizado y empradización para el nivel de amenaza medio. En las bermas conformadas se recomienda la construcción de cunetas articuladas, con bombeo a dos aguas para conducir las aguas de escorrentía a los cauces de las quebradas existentes.

Adicional a la obras proyectadas para nivel de amenaza media y obras hidráulicas, se requiere para el nivel de amenaza baja, una pantalla intermedia anclada e inclinada en concreto reforzado de aproximadamente 10m de altura, cimentada sobre una fila de caissons de 1.5m, separados cada 3.0m, tres filas de anclajes de 60ton, separados cada 3m, una pantalla inferior anclada e inclinada en concreto reforzado de aproximadamente 10m de altura, cimentada sobre dos filas de micropilotes, en par e inclinados 15°, separados cada 0.75m en tres bolillos, dos filas de anclajes de 50ton, separados cada 3m. Como se mencionó anteriormente nos hemos inclinado por la alternativa 3, cuyas obras se ilustran en el **plano 1E.**

Sector Inferior El Espino – Inestabilidad El Espino

Se proyecta un muro reforzado con geomallas de altura variable, y el cruce o canalización de la quebrada para el cruce con el muro reforzado como obras de mitigación para nivel de amenaza baja. Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Plano 4.E**, Obras de Mitigación – Sector Inferior y en los **Anexos 4** y **6** se muestran las memorias de cálculos y las cantidades de obra con presupuesto y APU respectivamente.

Para mitigar el riesgo que existe sobre las viviendas en la zona del levantamiento San Rafael se plantearon soluciones que intervendrían el talud hasta el punto de contemplar la modificación de la morfología y/o el diseño de obras de protección. Las alternativas propuestas son las siguientes:

- **Modificación morfológica del terreno**. Esta medida contempla le reconformación del terreno, para lo cual el material levantado de San Rafael, será dispuesto de tal manera que ocupará un área que cubrirá la Quebrada Santa Rita en un tramo de aproximadamente 180 metros. Posteriormente, la quebrada atravesará el muro en tierra armada en un tramo de 25 metros. Con esta reconformación del terreno se busca básicamente que el mismo material levantado en el sector de San Rafael sirva de contrapeso a los empujes generados por la parte superior del deslizamiento. Este material deberá ser compactado para aumentar la densidad y por tanto el efecto del contrapeso.
- Esta medida implica un descargue parcial del talud, reemplazando el material excavado con una serie de muros en gaviones, cuyo peso será equivalente al material extraído.

12. DISEÑO OBRAS DE MITIGACIÓN

12.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen las obras planteadas como obras de mitigación y de manejo de aguas superficiales y subsuperficiales, para los diferentes sectores analizados en cada una de las inestabilidades de La Carbonera y el Espino, como también las diferentes alternativas para el manejo y/o intervención del sector, desde la instrumentación, pasando por la estabilización y terminando por reubicación.

Sector superior corresponde a la parte alta de la corona de los deslizamientos, para el cual se plantean obras para que el nivel de amenaza sea baja, el sector intermedio corresponde al cuerpo del actual deslizamiento para el cual se analizaron y cuantificaron obras de mitigación para que el nivel de amenaza pase a media y a baja y el sector inferior corresponde al pie de los deslizamientos, para el cual se plantean obras para que el nivel de amenaza sea baja.

Antes de acometer las obras de mitigación se requiere la implementación de la totalidad de las obras preliminares y/u obras hidráulicas, para el manejo de aguas superficiales y subsuperficiales las cuales consisten en canales perimetrales a las coronas de los deslizamientos y a las obras de mitigación, canalización de las quebradas, Caissons drenantes y drenes de penetración.

También se plantea la instrumentación del sector, generalidades de los procesos constructivos, mantenimiento a las obras planteadas y recomendaciones políticas para el manejo de la construcción de las obras.

A continuación se presenta la relación de planos, que hacen parte del presente estudio:

Tabla 12-1. Relación de planos temáticos y de diseño de obras.

PLANOS TEMATICOS GENERALES		
#	**DESCRIPCIÓN**	**ESCALA**
1	PLANTA TOPOGRAFICA GENERAL	1:2000
2	PLANTA EXPLORACIONES GEOTECNICAS	1:2000
3	MAPA GEOLOGICO GENERAL DEL CERRO ALTOS DE LA ESTANCIA	1:5000
4	MAPA GEOLOGICO DETALLADO DE SUPERFICIE	1:2000
4.1	MAPA GEOLOGICO DE UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	1:2500
4.2	MAPA DE PENDIENTES	1:2000
4.3	MAPA DE RELIEVE CON ILUMINACION DE SOMBRAS	1:2500
5	MODELO GEOLOGICO GEOTECNICO CARBONERA – PERFILES	1:2000
6	MODELO GEOLOGICO GEOTECNICO ESPINO – PERFILES	1:1250
7	MAPA GEOMORFOLOGICO Y PROCESOS GEOMORFODINAMICOS	1:2000
8	MAPA DE USO Y COBERTURA	1:2000
9	ANALISIS DE AMENAZA SITUACION ACTUAL – PLANTA Y PERFILES	1:2500
10	OBRAS MITIGACION – AMENAZA MEDIA – PLANTA Y PERFILES	1:2500
11	OBRAS MITIGACION – AMENAZA BAJA – PLANTA Y PERFILES	1:2500
12	REUBICACION VIVIENDAS FASE III	1:2000
13	PLANTA GENERAL - INSTRUMENTACION Y MONITOREO	1:2000

14	OBRAS HIDRAULICAS Y CANALES	1:2000
14.1	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA SANTA RITA	1:1250
14.2	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA SANTO DOMINGO	1:1250
14.3	OBRAS HIDRAULICAS QUEBRADA LA CARBONERA	1:1250
14.4	OBRAS HIDRAULICAS CANALES – CANAL PERIMETRAL 3	1:1250
14.5	OBRAS HIDRAULICAS CANALES – CANAL PERIMETRAL 1 Y 2	1:1250
14.6	DETALLES OBRAS HIDRAULICAS Y CANALES	1:100
15	VIAVILIDAD DE OBRAS	1:2000

OBRAS MITIGACION -INESTABILIDAD LA CARBONERA		
#	**DESCRIPCION**	**ESCALA**
1.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – PLANTA GENERAL	1:2500
2.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR SUPERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:2000
2.1.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES, CANTIDADES Y NOTAS - CAISSON	1:200
2.2.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES, CANTIDADES Y NOTAS - PANTALLA	1:200
3.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PLANTA Y PERFILES	1:1000
3.1.C	POZO DE ABATIMIENTO Y DETALLES CARBONERA	INDICAD
3.2.C	REFUERZO POZO DE ABATIMIENTO CARBONERA	INDICAD
3.3.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION, SECTOR INTERMEDIO, PERFILES DETALLES Y CANTIDADES	INDICAD
4.C	CARBONERA OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INFERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:500
4.1.C	DETALLES CONSTRUCTIVOS MURO TIERRA REFORZADA SECTOR CARBONERA	1:200
OBRAS MITIGACION – INESTABILIDAD EL ESPINO		
#	**DESCRIPCION**	**ESCALA**

1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – PLANTA GENERAL	1:1000
2.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR SUPERIOR, PLANTA Y PERFILES	1:1000
2.1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR PERFILES	INDICAD
2.2.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION SECTOR SUPERIOR DETALLES	INDICAD
3.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PLANTA	1:1000
3.1.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INTERMEDIO, PERFILES	1:1000
4.E	ESPINO OBRAS DE MITIGACION – SECTOR INFERIOR, PLANTA Y PERFILES Y DETALLES	INDICAD

12.2. VIABILIDAD DE LAS OBRAS DE MITIGACION

La viabilidad de las obras a ejecutar en el sector de Altos de la Estancia, de acuerdo con el alcance del estudio y los diseños propuestos hace referencia a la viabilidad predial que corresponde a la localización de las obras y viabilidad de redes y servicios, es decir, se identifica la posibilidad de interferencia con las redes de servicios públicos e infraestructura existentes en el sector.

No obstante, es importante mencionar que el Distrito deberá conocer, identificar y definir el estado actual jurídico y legal de los predios que se necesitan para la ejecución de la obras de mitigación en el sector de Altos de la Estancia y llevar a cabo las acciones del caso para obtener la titularidad de los mismos previo a la iniciación de las obras.

Viabilidad predial: Para la construcción de las obras de mitigación que se plantea en el estudio se identifico que en su mayoría se encuentran localizadas sobre el polígono de la Fase I y II, las cuales se detallan a continuación y se ilustran en el **Plano 15** – Viabilidad de Obras:

- Muro en tierra reforzada de 20 metros de altura en la base del deslizamiento, el cual se encuentra localizado sobre el polígono de Fase I en los sectores del Espino III y Espino sector e Rodeo.
- Pantalla anclada, cimentadas sobre pilotes inclinadas en la corona del deslizamiento, localizada en el polígono de Fase II en el sector del Espino I sector y Cerro del Diamante.
- Canal Perimetral 1 ubicado en el límite de la Fase II y Fase III, sobre la vía vehicular colindante con las manzanas 93, 90, 11, 08, 02, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66 del barrio Espino I sector de la denominada Fase III.

  Para el adecuado funcionamiento del Canal Perimetral 1 y en el evento de mantener los predios que limitan con el mismo, se deben implementar medidas no estructurales como campañas educativas y jornadas de limpieza. Así mismo, se debe tener en cuenta la norma Ambiental del Distrito correspondiente a los cursos de aguas, delimitación de ronda y zonas de preservación ambiental.

  Es importante mencionar que la construcción del canal va afectar el acceso a las viviendas colindantes al mismo.

- Canalización de las quebradas y manejo del agua de superficial mediante cunetas instaladas en las bermas de los taludes del terraceo. Las quebradas a canalizar son la Santa Rita, Santo Domingo y Carbonera las cuales atraviesan el deslizamiento en sentido occidente oriente dentro del los polígonos de la Fase I y II.
- Sistema de subdrenajes mediantes trincheras y drenes horizontales localizados en la parte alta del deslizamiento de la Carbonera a la

altura de los barrios Santo Domingo y Santa Viviana del polígono del a Fase II.

- El terraceo de los taludes, desde la parte inferior (tierra armada), hasta la parte superior (pantalla anclada), el cual cobijará los sectores del Cerro el Diamante, San Antonio del Mirador, los cuales se encuentran localizados en la Fase I.
- Perfilado de los taludes adyacentes a la quebrada Santa Rita a la altura de las manzanas 18 y 17 del barrio San Rafael del Alto de la Estancia, con el fin de garantizar la operatividad del canal.
- Muro en gaviones en el sector del levantamiento de San Rafael sobre el polígono de la Fase II.

Por lo anterior, si es viable predialmente construir las obras de mitigación propuestas en el presente estudio, dado que están ubicadas dentro del cuerpo del deslizamiento en los polígonos de la Fase I y Fase II declarados en alto riesgo no mitigable.

Viabilidad de Redes: Dado que los diseños propuestos para la ejecución de las obras de mitigación se encuentran sobre el polígono de Fase I, II declarados en zonas de alto riesgo alto no mitigable, en la actualidad no existen redes de servicios públicos oficiales que puedan ser interferidas por las obras de mitigación, debido a que este sector fue declarado en zona de alto riesgo no mitigable y por ende incluidos los predios ocupados en el programa de reasentamiento de familias. Las redes existentes son provisionales, algunas de las cuales instaladas por la comunidad, han sido retiradas periódicamente por las Empresas de servicios públicos a medida que las familias son evacuadas y culminan el proceso de reasentamiento.

Socialización: Es importante mencionar que el Consorcio participo en diferentes reuniones, visitas de campo y mesas de trabajo en conjunto con las Entidades Distritales con el objeto de presentar e informar a las mismas, el inicio de la fase de diseños de las obras del sector de Altos de la estancia, alcance del proyecto y los avances de los diseños propuestos para la estabilización del sector. Este trabajo se realizó con el fin de articular los diseños para la implementación y ejecución de las obras de mitigación con las obras de acueducto y alcantarillado que adelanta la Empresa – EAAB- para la denominada Fase III, a fin de tener una intervención integral y coordinada en el sector por parte de las entidades competentes.

12.3. PRIORIZACIÓN DE LAS OBRAS

Dada la dinámica del deslizamiento, su carácter retrogresivo y la magnitud de los grandes volúmenes de suelo y roca involucrados, es necesario iniciar el proceso constructivo de las medidas de mitigación en el menor tiempo posible, con el fin de disminuir el nivel de amenaza sobre los sectores aledaños. Por lo que se recomienda priorizar por etapas el proceso constructivo de las obras de mitigación como se relaciona a continuación:

- Construcción de las pantallas ancladas ubicados en los escarpes principales del Espino y la Carbonera, micropilotes del escarpe principal, los canales perimetrales (1, 2, 3) y construcción del muro en gaviones en el sector de San Rafael, tal como se ilustra en el Plano 15.
- Construcción del muro en tierra armada en la parte inferior del Espino y reconformación del terreno para el control del Levantamiento de San Rafael.
- Iniciación de las obras de subdrenaje y drenaje superficial del deslizamiento la Carbonera.

- Reconformación de los taludes tanto de la Carbonera como del Espino, para esto se recomienda una zona de acopio a la altura del barrio Espino III sector, de tal manera que este material pueda ser utilizado para la construcción del muro en tierra armada y para la comercialización del volumen restante.

- **LINEAMIENTOS EN LA REALIZACION DE OBRAS DE MITIGACION**

Los lineamentos para la viabilidad de las obras de mitigación propuestas en el estudio, parten del diseño de cada obra, siguiendo las directrices que cada diseño contemple de acuerdo con la normatividad de construcción, las cuales deben estar coordinados con el Plan de Acción propuesto por la DPAE, para atender la vulnerabilidad del sector, así como los criterios para hacer seguimiento y evaluación a dichas obras. Para que favorezcan el desarrollo urbano regional con alta calidad y el mejoramiento de las condiciones de vida de la comunidad.

Visión Regional. Responder a las necesidades priorizadas en el plan de Acción y desarrollo local, atendiendo las necesidades de la población objeto y mejorar un cambio ambiental y la calidad de vida de los habitantes del sector.

Necesidades de las poblaciones vulnerables. El proyecto deberá responder a las brechas y problemas identificados en el sector vulnerable, por estar ubicados en una zona de alto riesgo por presentar problemas de remoción en masa.

Los impactos ambientales generados a la población vulnerable con respecto a las obras de mitigación propuestas son positivos las cuales tienen como objetivo ambiental generar cambios en cuanto al saneamiento

básico (Salud y Calidad de vida), que es una prioridad para los residentes del sector, teniendo en cuenta que una de las deficiencias en los barrios de Ciudad Bolívar que conforman el sector Altos de la Estancia, es la falta de zonas verdes, la ausencia de parques y de áreas de recreación como también antejardín, caracterizándola como un paisaje saturado por las construcciones.

Indicadores. Establecer para el proyecto una batería de indicadores con una línea base definida y su porcentaje de variación positiva como resultado del desarrollo del proyecto y su impacto en el sector vulnerable. Estos indicadores se podrán medir de acuerdo a lo indicado en el numeral 12.3.3 de instrumentación y su aplicación de acuerdo a las diferentes obras diseñadas y rangos establecidos.

Generación de Empleo. Generación de empleo, resultante de la viabilidad, desarrollo y ejecución del proyecto.

Los espacios (zona de las inestabilidades) a recuperar ambientalmente se conciben como oportunidades de trabajo, de fortalecimiento de grupos con intereses comunes y como espacios de apropiación colectiva e individual, bien sea a través de acciones concretas en escenarios de participación que faciliten establecer nuevas interpretaciones y relaciones entre los actores sociales, tanto los institucionales como los locales ente los que se destacan las comunidades.

12.4. INSTRUMENTACIÓN

12.4.1. Antecedentes De Instrumentación

A continuación se mencionan los estudios y monitoreos realizados para el seguimiento de la evolución de los procesos por remoción en masa inducidos por los deslizamientos La Carbonera y El Espino, en el sector denominado Altos de la Estancia de la ciudad de Bogotá D.C., por empresas de consultaría contratadas por el FOPAE, desde el año 1999 a 2005.

Tabla 12-2. Estudios y Monitoreos

AÑO	EMPRESA	ESTUDIO	MONITOREO	CARBONERA	ESPINO
1998	INGEOCIM LTDA	X		X	X
	NATIVAL LTDA	X			X
1999	IGL LTDA	X		X	
	C. C. H. LTDA	X			X
2000	INGEMETRICA LTDA		X	X	
	G &C S. A.		X		X
2001	UNIVER. ANDES		X	X	
2002	G & C S. A.		X	X	
	INGEOMINAS	X	X		X
	MOYA Y GARCIA L		X	X	
2003	ING Y GEORIESG		X	X	X
2004	ING Y GEORIESG	X		X	
2005	G & C S. A.		X	X	X

Para los monitoreos de la inestabilidades se han utilizado mojones topográficos, inclinómetros, piezómetros y extensómetros, a continuación se presenta la instrumentación instalada de los estudios anteriores:

Tabla 12-3. Instrumentación

MOJONES TOPOG	INCLINOMETROS	PIEZOMETROS	EXTENSOMETROS
INESTABILIDAD LA CARBONERA			
220	19	19	43
INESTABILIDAD EL ESPINO			
395	25	10	60

Conclusiones Universidad de Los Andes. Diciembre 2000 – Diciembre 2001.
Por la dirección poco probable de los desplazamientos (hacia la parte alta de la ladera), los resultados de los mojones ubicados en esta zona, no se consideraron para un análisis de información. Las posibles causas para este comportamiento se deben a las grandes distancias con las cuales se miden estos puntos de control.

Se puede observar que la masa deslizante del barrio San Antonio del Mirador seguía presentando desplazamientos hacia la ladera. De acuerdo a los registros se observa un incremento de la velocidad de los desplazamientos entre los meses de Febrero y Marzo. Este comportamiento se puede observar en los registros obtenidos para el mojón D3.

POSIBLES FACTORES DETONANTES DEL PROCESO DE INESTABILIDAD
Carencia de redes de alcantarillado

Conclusiones Ingemétrica Ltda. Febrero – Agosto 2000.
La zona donde se presentaron movimientos considerables, fueron los lugares donde se encontraban el piezómetro 1 e inclinómetro 1, donde se registraron desplazamientos verticales de 2,35m y desplazamientos verticales de 1m aproximadamente.

Se observa que de 21 mojones instalados en la ladera, los desplazamientos verticales registraron hundimientos hasta 1,89m aproximadamente en las diferentes campañas de monitoreo y se observa este comportamiento en los mojones M1, M3 y M-18.

Posibles factores detonantes del proceso de inestabilidad
Manejo de aguas servidas y domesticas
No existencia de redes de alcantarillado

Conclusiones Geotecnia & Cimentaciones S. A. Julio 2000 – Febrero 2001

De acuerdo a la información de monitoreo recopilada, se puede observar un comportamiento oscilatorio en los movimientos de todas las estaciones y puntos de control. Esta magnitud de desplazamientos en los movimientos totales presenta dos tendencias, una en dirección a la cantera Santa Rita y otra en la dirección de la cantera Sur. En cuanto a altimetría se revisaron los mojones M5, M10, M14, puntos de control que reportaron movimientos de los cuales no existen evidencias en campo. Con respecto a la planimetría los movimientos relativos que se presentan en todas las campañas son de carácter muy errático, tanto en su dirección como en sus magnitudes, mojones M11 y M12

Como un caso especial se observa que el comportamiento de los mojones M31, M32 y M33 no presentaron cambios en las magnitudes de desplazamientos, ni velocidades durante la realización de las campañas de control topográfico. Podemos observar como en la zona SW del Espino III Sector, presenta levantamientos aproximadamente de 2,5cm día y desplazamientos horizontales de aproximadamente 1cm. Este comportamiento se observa en los mojones MJ22 y MJ23.

Posibles factores detonantes del proceso de inestabilidad

No existencia de redes de alcantarillado

Conclusiones Ingeominas. Mayo 2002 – Mayo 2003.

El mojón A1 registra los máximos desplazamientos horizontales como verticales. Es así como presenta desplazamientos horizontales acumulados aproximadamente de 20,37m y desplazamientos verticales de 3,52m (hundimientos). El máximo desplazamiento vertical lo presenta el mojón B2.

Ingeominas concluyo que los máximos desplazamientos en la horizontal se presentan en el eje 1, mientras que el eje 2 presentan desplazamientos promedio. El eje 3 presenta desplazamientos promedio de manera similar al eje 2, sin embargo el valor de sus desplazamientos es muy influenciado por los mojones D3 y E3. Los ejes 4 y 5 presentan desplazamientos en la horizontal y la vertical para la ultima campaña de menos de 10mm.

Conclusiones Moya y García. Diciembre 2002 – Julio 2003

De acuerdo a los registros obtenidos Moya y García determina que los máximos desplazamientos se presentaron en los mojones M15A, C4 y M6. El mojón MG-1 presenta desplazamientos horizontales y verticales muy altos, ya que la ubicación del mojón es muy cercana a la ronda de la Quebrada Rosales.

12.4.2. Estado De La Instrumentación Existente

En el **Anexo 4** memorias de cálculo se presenta una tabla con la instrumentación instalada en diferentes fechas y por diferentes firmas consultoras.

Sin embargo cabe destacar que en la actualidad no existe ninguna de esta instrumentación en funcionamiento y/o apta para la toma de campañas de instrumentación.

12.4.3. Instrumentación Proyectada

Como alternativa para la medición y control de los desplazamientos de los deslizamientos en La Carbonera y en El Espino, se plantea la instalación de nuevos inclinómetros, piezómetros, mojones en concreto, Ver **plano 13**.

Teniendo en cuenta que los deslizamientos se mueve en forma retrogresiva, se plantea su monitoreo por medio de inclinómetros y piezómetros con una profundidad tal que alcance la roca o suelo firme. En general, se estima que estos elementos deberá tener 30m de longitud cada uno. Con el fin de identificar la tasa de movimiento, la dirección y el plano de falla. Adicionalmente, durante la construcción de los aparatos se podrá identificar los materiales existentes, realizar ensayos en el sitio de resistencia y obtener muestras para su análisis en laboratorio.

Lo anterior, deberá ser complementado por un sistema de topográfico con una serie de puntos de control en mojones de concreto.

Con base en los datos obtenidos mediante la instrumentación y su previo análisis de estabilidad y en los resultados del estudio detallado de la inestabilidad, se tomará la decisión para definir si se continúa con el mantenimiento rutinario o se implementan las alternativas de estabilización.

12.4.4. Importancia y alcance del Proceso de instrumentación

Los instrumentos serán utilizados para caracterizar las condiciones actuales y futuras de las inestabilidades, cubriendo los principales parámetros de interés como son las presiones de poros, permeabilidad del suelo y estabilidad de las laderas.

Una vez instalados y monitoreados adecuadamente, se podrán preveer diferentes alertas de movimientos, dando tiempo para la implementación de acciones preventivas y correctivas por parte de la DPAE.

Además permiten definir los posibles movimientos que se puedan generar y la afectación de acuerdo con las obras proyectadas y establecer áreas o sitios más susceptibles de ser afectados por los movimientos del terreno.

Posteriormente se realizará la toma de la lectura inicial o de referencia, y durante el período definido para la toma de lecturas, se compararán todos y cada uno de los resultados obtenidos en el tiempo con las deformaciones proyectadas, y se emitirán los conceptos y recomendaciones a que haya lugar.

12.4.5. Proceso de Instalación

Inclinómetros: Utilizados para medir la deformación a lo largo de una línea vertical u horizontal. Están compuestos por tuberías ranuradas equipadas con guías especiales que permiten el adecuado paso de una sonda especial para la toma de las lecturas.

Piezómetros: Utilizados con el propósito de medir la presión de poros y el nivel del agua en las inestabilidades, con el fin de monitorear el comportamiento de los esfuerzos cortantes, predecir la estabilidad de taludes, e implementar

la construcción de las estructuras diseñadas para el control y/o abatimiento del nivel freático.

Los piezómetros tipo "Casagrande" están compuestos por tuberías perforadas, arena, bentonita, un filtro en geotextil y accesorios indispensables para su adecuado funcionamiento.

Se instalarán varios piezómetros mediante perforaciones realizadas a una profundidad de 30.0 metros cada uno.

12.4.6. Campañas de Lectura y Reportes de Resultados

El seguimiento y monitoreo geotécnico se debe realizar de carácter quincenal, a partir de las cuales se podrá escoger la combinación que se estime más conveniente de acuerdo con el margen de seguridad deseable para adelantar las diferentes fases de intervención de las inestabilidades.

Se deben realizar reportes quincenales de datos de lecturas, comunicación y acompañamiento permanente durante el desarrollo de la totalidad de las actividades asociadas a la instrumentación. Se recomienda la presentación de un informe consolidado final con aspectos generales y específicos inherentes a la campaña de lecturas, y apoyo constante en obra, reuniones y/o comités.

Cuando se evidencien deformaciones no previstas en las estructuras o movimientos de masa significativos se deberá dar aviso inmediato y oportuno al DPAE y realizar una visita de campo con un especialista en Geotecnia quien dará las recomendaciones acerca de las medidas que se deberán adoptar inmediatamente, a corto y mediano plazo.

El seguimiento y monitoreo geotécnico se debe realizar, durante un período de doce (12) meses, acompañamiento permanente durante el desarrollo de la totalidad de las actividades asociadas a la instrumentación.

Las actividades deberán ser desarrolladas por un Especialista en Geotecnia, un Ingeniero Civil residente encargado de la toma de lecturas y un Ayudante para la medición de puntos de control.

El cuidado de los instrumentos estará a cargo del Contratante.

El planteamiento de la instrumentación se muestra en el **Anexo 5**, **Plano 13**, instrumentación y monitoreo.

12.4.7. Instrumentación Proyectada

Como seguimiento y monitoreo de las diferentes obras de mitigación proyectadas es necesario la implementación de la siguiente instrumentación, ubicada en los diferentes sitios de obras. En el **plano 13** se muestra la ubicación de la instrumentación. Y en la tabla se relacionan los diferentes instrumentos a instalar.

Tabla 12-4. Instrumentación Proyectada

INSTRUMENTO	DESLIZAMIENTO		TOTAL
	ESPINO	CARBONERA	
INCLINOMETRO	8	9	17
PIEZOMETRO	2	8	10
MOJON	8	6	14
TOTAL	18	23	**41**

12.4.8. Sistemas de Alarma y Protocolos de Aviso

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las corridas del análisis de estabilidad de los sectores críticos, presentamos a continuación un el diseño del sistema de alerta y aviso, enfocado para cada zona de amenaza y específicamente en los cortes propuestos controlados por inclinómetros y/o niveletas.

12.5. MOJONES Y NIVELETAS

GRADO DE ALERTA	DESPLAZAMIENTO RELATIVO	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO
Amarilla	>5 mm/quincena	40 mm
Naranja	5 - 10 mm/quincena	40 - 70 mm
Roja	> 10 mm/quincena	> 70 mm

12.6. INCLINOMETROS

a. En zonas pobladas

GRADO DE ALERTA	DESPLAZAMIENTO RELATIVO	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO
Amarilla	> 5 mm/semana	< 40 mm
Naranja	5 - 10 mm/semana	40 - 70 mm
Roja	> 10 mm/semana	> 70 mm

b. En zonas no pobladas con afectación futura a casas.

GRADO DE ALERTA	DESPLAZAMIENTO RELATIVO	DESPLAZAMIENTO ACUMULADO
Amarilla	> 5 mm/semana	< 100 mm
Naranja	5 - 10 mm/semana	100 - 200 mm
Roja	> 10 mm/semana	> 200 mm

12.7. PIEZÓMETROS

GRADO DE ALERTA	INCREMENTO PRESION DE POROS (SEMANA)	INCREMENTO PRESION DE POROS (MES)
Amarilla	1 m/semana	2 m/mes
Naranja	2 m/semana	3 m/mes
Roja	>2 m/semana	>3 m/mes

De acuerdo con la información de referencia consultada, un Sistema de Alarma se define como el conjunto de acciones a desarrollar que permitan predecir con cierta certeza la evolución de la magnitud de los desplazamientos con el tiempo y el momento de falla catastrófica.

En esta información se presentan una serie de modelos empíricos de predicción dentro de los cuales se seleccionó el Modelo 1, el cual consiste en un ajuste polinomial de las lecturas realizadas de los desplazamientos. Para este modelo se debe tomar las lecturas de uno o varios Mojones de mayor afectación o desplazamiento por el fenómeno de inestabilidad, localizado dentro de la masa inestable.

Con base en la información anterior, la cual corresponde al comportamiento de uno o varios puntos, se determina un valor de referencia tanto de la magnitud (40cm) como de la velocidad de desplazamiento (20cm/mes) y a partir de estos, se propone la serie de intervalos de magnitud de desplazamiento (cm) y velocidad de movimiento (cm/día) con los cuales se pueden definir unos niveles de alarma de la siguiente manera:

MAGNITUD DE DESPLAZAMIENTO

M1: < 20cm M2 : 20 – 40cm M3: > 40cm

V1: < 10cm/mes V2: 10.1 – 20cm/mes V3: > 20cm/mes

La combinación de estos niveles de velocidad y magnitud de desplazamiento permitieron definir grados de alerta así: **AMARILLA, NARANJA Y ROJA.**

M1 – V1: Alerta AMARILLA con inspecciones continuas.

M1 – V2: Alerta NARANJA con inspecciones continuas.

M1 – V3: Alerta ROJA con inspecciones continuas.

M2 – V1: Alerta NARANJA con inspecciones continuas.
M2 – V2: Alerta NARANJA con aviso de prevención.
M2 – V3: Alerta ROJA con aviso de alto riesgo.
M3 – V1: Alerta NARANJA con aviso de prevención.
M3 – V2: Alerta ROJA con aviso de alto riesgo.
M3 – V3: Alerta ROJA con aviso de evacuación.

Los rangos anteriores, se determinan con base en el comportamiento varios mojones, localizados en el sector de la inestabilidad. A continuación se realiza un resumen del comportamiento de estos puntos de control entre los diferentes meses de análisis. Se determina promedios de la magnitud y velocidad de desplazamiento, respectivamente para el periodo de estudio.

Se presenta en un plano de localización en planta los grados de alarmas: AMARILLA, NARANJA Y ROJA.

12.8. OBRAS HIDRÁULICAS

Como obras de mitigación se plantea el manejo de agua, mediante un sistema de control superficial y subsuperficiales, (canales, drenes de penetración, caissons drenantes y revestimiento de las quebradas) tanto de las laderas como en las quebradas existentes en el sector.

Los canales se proyectan revestidos en concreto reforzado, ubicados perimetrales a las coronas de los deslizamientos La Carbonera y el Espino, con entregas en las quebradas del sector, con el objeto de recoger las aguas y evitar la concentración y/o saturación de las inestabilidades.

Un sistema de varias filas de drenes de penetración con el objeto de abatir los niveles freáticos en el sector superior e intermedio de la inestabilidad La Carbonera. Un sistema de una fila de caissons drenantes intercomunicados entre sí por conducciones a gravedad, con tres niveles de drenes de penetración cada uno y con entrega final a un canal revestido en gaviones que a la vez entrega en la quebrada del sector.

Canalización de todas las quebradas del sector, mediante gaviones, con el objeto de definir, proteger y establecer el cauce de dichas quebradas y evitar la dispersión del agua en las inestabilidades, con algunas estructuras escalonadas de disipación.

La localización planteada de los caissons drenantes se pueden modificar, durante construcción, de acuerdo a los sitos donde aparezca mayor concentración de niveles freáticos, igualmente las conducciones o descargas se pueden hacer a otros caissosn drenantes, mediante perforaciones dirigidas y/o a la ladera con conducciones a los sistemas de drenajes establecidos en los diseños y/o construidos en su momento.

Los drenes de penetración. Requeridos en la zona alta de la inestabilidad de la carbonera, se deben construir en tres etapas, de acuerdo a la aparición de los niveles de agua. Construir en primera etapa, únicamente los drenes impares de la fila inferior, en la segunda etapa, si se requiere los drenes pares de la fila superior y finalmente si se requiere los drenes faltantes. Los drenes localizados en el sector intermedio si se den construir en su totalidad.

Drenaje superficial. Esta sería una de las primeras obras a acometer dado que la infiltración de las aguas superficiales es actualmente la fuente principal de inestabilidad. Para ello se propone un canal a manera de zanja

de coronación que recoja todas las aguas provenientes de la zona arriba del escarpe principal y las conduzca a las quebradas Santo Domingo (Rosales) y La Carbonera.

Esta obra deberá necesariamente complementarse con un adecuado manejo del drenaje superficial a lo largo de todas las vías, además de las reparaciones y adecuaciones necesarias del sistema de acueducto y alcantarillado para controlar las fugas de agua de estas fuentes. Adicionalmente, se tendría una serie de canales o zanjones a lo largo del cuerpo del deslizamiento que recogerían las aguas lluvias superficiales y las entregarían a las mismas dos quebradas. Previo al inicio de cualquier actividad de obras hidráulicas se requiere construir zanjas abiertas en tierra para evacuar los empozamientos existentes en varios sectores de la inestabilidad la carbonera.

Para los sectores intermedios de los deslizamientos se propone la implementación de cunetas de concreto articuladas con pendiente en dos aguas, las cuales conducirán las aguas de escorrentía hacia los cauces de las quebradas existentes.

Drenaje de aguas subterráneas. Para bajar el nivel freático lo más posible en la zona del deslizamiento, se proponen las siguientes alternativas: 1) Drenes de penetración en el sector superior y en el cuerpo del deslizamiento, 2) caissons drenantes, a lo largo del eje del cuerpo DZ2 y siguiendo la pendiente del terreno. Estas obras se muestran en el **Anexo 5, Planos 14, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5 y 14.6** obras hidráulicas, quebradas, canales, caissons drenantes y drenes de penetración.

Se hace necesario abatir el nivel freático hasta el contacto entre los materiales permeables y el acuífero, o en términos geológicos hasta el contacto entre los depósitos superficiales y la roca fracturada.

Este nivel freático será abatido mediante la instalación de drenes horizontales los cuales deberán ser instalados sobre toda el área del talud. Además, considerando que estos materiales drenados al interior deberán ser conducidos afuera de la zona potencial a deslizamiento, y aprovechando la configuración de terrazas, se propone la instalación de cunetas para el drenaje del agua hacia afuera de la zona de estudio.

Es importante destacar sin embargo, que con el abatimiento del nivel freático se han incrementado los esfuerzos efectivos, pero para efectos de los análisis se han mantenido los parámetros de resistencia residuales para los materiales abajo del escarpe principal, con el fin de tener en cuenta el reblandecimiento de la arcillolita al entrar en contacto con el agua.
Sin embargo para el mecanismo de falla traslacional, principal problema de la zona de estudio existe la necesidad de incorporar obras de contención geotécnica para la completa estabilización del talud. Este tipo de obras consisten en la construcción de pantallas ancladas y un muro en tierra armada sobre la base del deslizamiento, los cuales se describen a continuación.

12.9. GENERALIDADES OBRAS DE MITIGACION

Los análisis de estabilidad muestran que para garantizar la estabilidad de la ladera es necesario se requieren obras que garanticen el abatimiento del nivel freático, e incrementar la resistencia interna mediante la instalación de



estructuras externas, que garanticen un adecuado comportamiento del talud ante una eventual carga sísmica (0.16g).

De acuerdo con lo obtenido en los capítulos anteriores, no se considera viable la estabilización de los fenómenos por medio de sistemas ligeros, ya que las medidas de mitigación deben involucrar el estrato de roca, suelo competente, terrazas y/o movimientos de material de grandes volúmenes y contrapesos.

Se considera que las alternativas de solución conllevarían la implementación de un sistema de contención tipo anclajes, elementos verticales anclados, pantallas en concreto reforzado, pernos, con el fin proteger los diferentes sectores de las inestabilidades. Como se comentó con anterioridad, nos hemos inclinado por la alternativa I, aunque la DPAE, podrá entrar a escoger algunas de las variantes propuestas en el estudio.

12.10. INESTABILIDAD LA CARBONERA.

Para efectos de mitigar la amenaza de las inestabilidades, particularmente en el caso de sismo, se han evaluado varias alternativas en el **Anexo 4** se presentan las memorias de cálculo.

Como primera medida para garantizar la estabilidad de la ladera, se ha propuesto:

El perfilado del talud. Esta obra se ha requerido con varios fines. El primero, remover mucho material superficial que actualmente ya se ha deslizado y en segundo lugar disminuir las sobrecargas del terreno dado que se estaría removiendo un volumen considerable de material. El terraceo de la ladera

se tiene proyectado a partir del escarpe principal, en terrazas con bermas amplias y taludes como máximo 2H:1V. **Plano 1.C** Obras de Mitigación.

Muro de contención en tierra armada Con el objeto de mejorar la estabilidad de la parte baja del deslizamiento y ayudar a la estabilidad general del mismo, se propone, localizado a lo largo de la pata del movimiento, especialmente del llamado DZ2. La sección de este muro sería variable, disminuyendo aguas arriba de la Quebrada Santo Domingo (Rosales) y se extendería hasta el pie del movimiento DZ-1.

Anclajes de corona se analizaron como alternativas de obras de mitigación. Estos anclajes se encontrarían principalmente en lo que correspondería al antiguo escarpe de deslizamiento arriba del actual. Su objetivo sería el de lograr un Factor de Seguridad mayor a 1.3 para la zona que corresponde a las Fases II y Fase III de la DPAE en la eventualidad de la ocurrencia del sismo máximo.

Los pilotes de corona fue otra alternativa analizada para estabilizar la corona del deslizamiento y evitar el avance retrogresivo del movimiento, en el **Anexo 4** se presenta los análisis en las memoria de calculo, se propone una serie de pilotes a lo largo de la corona del actual deslizamiento, estos pilotes se amarrarían en superficie con una placa en concreto.

Los pilotes de cuerpo también se analizaron. Los análisis de estabilidad indican que la zona más inestable corresponde a toda la zona del deslizamiento, aún en el caso de disminuir el nivel del agua subterránea y esta situación se vuelve crítica en el caso de sismo. Para ello, se han evaluado distintas disposiciones de pilotes para analizar su efecto sobre la estabilidad de la ladera en la condición con sismo. Como se puede

apreciar, aún con un número significativo de pilotes, difícilmente se logra alcanzar un factor de seguridad de uno para la condición con sismo. Pantallas ancladas. Alternativamente a los pilotes, se ha evaluado el efecto sobre la estabilidad de una serie de pantallas ancladas.

De lo anterior se observa que el efecto de las series aisladas de pilotes tienen un efecto semejante a la de las series de pantallas ancladas. Así mismo se encuentra que el efecto del muro de pie es muy efectivo para controlar la estabilidad de este sector. En cuanto a la zona por encima de la corona, se encontró tanto en estos análisis con obras como en la condición actual que, que su estabilidad es aceptable en caso de sismo siempre y cuando se mantenga drenada.

De manera general, sin embargo, se observa que en todo caso tratar de controlar la zona del deslizamiento para el caso de un sismo con el nivel de aceleración propuesta requiere obras de una magnitud considerable. Por ello, vale la pena considerar la posibilidad de aceptar algún nivel de riesgo para este caso, reduciendo el factor de seguridad a algún valor que represente ese nivel aceptable. Por lo tanto este factor de seguridad se debe establecer por consenso entre la Interventoría, DPAE y esta consultaría.

Reforzamiento de macizos rocosos. Con el objeto de aumentar la resistencia al corte de los macizos rocosos al pie del movimiento, se propone la creación de una cortina mediante inyecciones de cemento reforzadas con varillas de acero a manera de un claveteado.

Reconformación morfológica. Algunos sectores requieren una reconformación de la superficie del terreno para mejorar puntualmente su estabilidad y para adecuar las obras de drenaje. Estas zonas corresponden a

la zona del escarpe principal, algunas zonas en la cabeza y pata del movimiento y cauces de las quebradas.

12.10.1. Alternativa para el Sector Superior – Inestabilidad La Carbonera

Obras de mitigación para nivel de amenaza baja. Se proyecta una pantalla anclada e inclinada en concreto reforzado cimentada sobre una fila de caissons los análisis se presentan en el **Anexo 4** cálculo de memorias y las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Planos 2.C - 2.1.C – 2.2.C.** Obras de Mitigación – Sector Superior.

12.10.2. Alternativa para el Sector Intermedio – Inestabilidad La Carbonera

Obras de mitigación para nivel de amenaza media. Se proyecta hacer un perfilado del talud removiendo gran parte del material deslizado mediante terrazas y en cada una de las bermas se deberá construir cunetas articuladas. Además se debe implementará filas de micropilotes las especificaciones se describen en el texto en el numeral 11.2 diseño de obras de mitigación. Los diseños se presentan en los planos **2.C**, **2.C.1** y **2.C.2**.

Obras de mitigación para nivel de amenaza baja. Adicional a las obras proyectadas para nivel de amenaza media y obras hidráulicas, se requiere, cuatro filas de caissons, localizados en las diferentes terrazas.

Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Plano 3.C**, Obras de Mitigación – Sector Intermedio y **Planos 3.1.C – 3.2.C – 3.3.C** y en el **Anexo 4** se muestran las memorias de cálculos.

12.10.3. Alternativa para el Sector Inferior – Inestabilidad La Carbonera

Obras de mitigación para nivel de amenaza baja. Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Planos 4.C** y **4.1C** Obras de Mitigación – Sector Inferior y en **Anexos 4** y **6** se muestran las memorias de cálculos y las cantidades de obra con presupuesto y APU respectivamente.

12.11. INESTABILIDAD EL ESPINO

Considerando que el agua constituye un factor detonante importante es necesario proponer las obras para abatir el nivel freático. El análisis de estabilidad de para cada las obras propuestas se presenta en los siguientes numerales.

Como primera medida para garantizar la estabilidad de la ladera, se ha propuesto el perfilado del talud. Esta obra se ha requerido con varios fines. El primero, remover mucho material superficial que actualmente ya se ha deslizado y en segundo lugar disminuir las sobrecargas del terreno dado que se estaría removiendo un volumen considerable de material. El terraceo de la ladera se tiene proyectado a partir del escarpe principal.

12.11.1. Alternativa para el Sector Superior El Espino – Inestabilidad El Espino

Obras de mitigación para nivel de amenaza baja. Se proyecta una pantalla anclada e inclinada en concreto reforzado. En el sector noroccidental del Espino (Barrio Cerro El Diamante) se proyecta dos filas de tres micropilotes. Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Plano 2.E**, Obras de Mitigación – Sector Superior y **Planos 2.1.E - 2.2.E** y en los **Anexos 4** y **6** se muestran las memorias de cálculos y las cantidades de obra con presupuesto y APU respectivamente.

12.11.2. Alternativa para el Sector Intermedio El Espino – Inestabilidad El Espino

Como se menciono en el texto en diseño de obras se proyecta hacer un terraceo, obras hidráulicas, una pantalla intermedia anclada e inclinadas Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Plano 3.E**, Obras de Mitigación – Sector Intermedio y **Plano 3.1.E** y en los **Anexos 4** y **6** se muestran las memorias de cálculos y las cantidades de obra con presupuesto y APU respectivamente.

12.11.3. Alternativa para el Sector Inferior El Espino – Inestabilidad El Espino

Las obras proyectadas de mitigación se muestran en el **Anexo 5, Plano 4.E**, Obras de Mitigación – Sector Inferior y en los **Anexos 4** y **6** se muestran las memorias de cálculos y las cantidades de obra con presupuesto y APU respectivamente.

12.11.4. Alternativa para el Sector San Rafael

Como alternativa de solución para el Sector San Rafael se analizó la estabilidad para el levantamiento de San Rafael. Este se originó debido a los fuertes empujes ejercidos por la masa inestable de la parte superior de El Espino. Este fenómeno fue simulado por INGEOMINAS, para lo cual los autores realizan el análisis utilizando una formulación acoplada de elementos finitos, en la que variando la posición del nivel freático se observa cómo se inician los desplazamientos del terreno, hasta llegar a una configuración muy parecida a la que tenía el terreno en ese momento. De igual manera los análisis muestran que remover todo el material levantado es contraproducente, ya que esto implicaría quitarle pata al deslizamiento

acelerándose el fenómeno y generándose de nuevo taponamientos de la quebrada Santa Rita y levantamientos del terreno.

Teniendo presente los anterior se optó por remover parte del material levantado, pero reemplazando esta carga eliminada por una carga equivalente en gaviones. Por otro lado, se recomienda recompactar el material levantado, con el fin de incrementar la densidad del mismo, lo cual favorecerá la estabilidad del sector.

12.12. PROCESO CONSTRUCTIVO OBRAS

A continuación se presentan unas generalidades constructivas de las diferentes obras de mitigación planteadas, sin embargo en el Anexo 7 cronograma y especificaciones, se muestran detalladas y complementadas.

12.12.1. Etapas Generales de Construcción

Etapa 1: Actividades Generales

Construcción de obras hidráulicas, se recomienda realizar en época de verano o secas, estas obras de deberán ejecutar en el siguiente orden:

Manejo de quebradas: se deben intervenir de abajo hacia arriba para permitir el drenaje por gravedad, y se debe iniciar primero las obras en la quebrada Santa Rita, luego la quebrada Santo Domingo y por ultimo la quebrada La Carbonera.

Manejo de agua superficial mediante canales y cunetas: interviniendo primero el Canal perimetral y cunetas propuestos en el sector del Espino y luego La Carbonera y/o simultáneamente

Manejo de agua subsuperficial mediante drenes de penetración y pozos de abatimiento: iniciando la intervención en el sector de La Carbonera de los pozos de abatimiento de abajo hacia arriba para permitir el drenaje por

gravedad de cada uno de los pozos con sus respectivos niveles de drenes de penetración, previo la construcción del canal de descole de los pozos, el orden de construcción de los pozos es el siguiente 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 7, 8 y 9. Una vez construidos los pozos de abatimiento y niveles de drenes de penetración se deben construir la cuneta para la descarga de las dos filas de drenes de penetración del sector superior, iniciando con los drenes impares de la fila inferior, seguido de los drenes pares de las fila superior y finalmente los demás.

Implementación de la Instrumentación: se recomienda realizar la instrumentación de la siguiente manera:

1. Instalación de inclinómetros de acuerdo a las indicaciones mostradas en el **Anexo 5**, **Plano 13**, instrumentación y monitoreo con campañas de lecturas cada 15 días.
2. Instalación de piezómetros y campañas de lecturas cada 15 días.
3. Construcción de mojones y campañas de control topográfico.

Con la toma de datos periódica se controla la ubicación de la instrumentación y que estos no se pierdan con el movimiento de tierra, la implementación de la instrumentación específicamente es para verificar el comportamiento del terreno y la estabilidad de las obras, la distribución de la instrumentación contempla ubicación en terreno firme donde hay obras proyectadas y ubicación posterior en las obras puntuales realizadas.

Evacuación de viviendas faltantes de la Fase II las cuales ya están incluidas en el programa de reasentamiento de familias en alto riesgo no mitigable por la DPAE e incluir en el programa de reasentamientos las viviendas de Fase III que interfieran para la implementación de las obras proyectadas y/o riesgo que estén sometidas.

Etapa 2: Obras de mitigación de los **sectores superiores** de La Carbonera y El Espino.

Estas obras de deberán ejecutar en el siguiente orden:

1. Obras sector superior La Carbonera. Las cuales se deben iniciar con la construcción de los módulos impares y posteriormente los módulos impares, el inicio de los módulos impares se debe realizar siempre y cuando se hayan completado la totalidad de las actividades de los módulos pares.

   En cada módulo se debe construir primero los caissons, los anclajes, seguido por los muros, anclajes y tensionamiento de todos los anclajes.

2. Obras sector superior El Espino. Se debe construir primero la obra de la pantalla anclada y con micropilotes y posteriormente las filas de micropilotes del costado oriental. Las obras se deben iniciar con la construcción de los módulos impares y posteriormente los módulos impares, el inicio de los módulos impares se debe realizar siempre y cuando se hayan completado la totalidad de las actividades de los módulos pares.

   En cada módulo se debe construir primero los micropilotes en pares, seguido por los muros, anclajes y tensionamiento de todos los anclajes.

Etapa 3: Obras de mitigación de los **sectores inferiores** de La Carbonera y El Espino.

Estas obras de deberán ejecutar en el siguiente orden:

1. Obras sector inferior La Carbonera. Los muros en suelo reforzado se deben iniciar en el sitio de mayor depresión del terreno es decir donde el muro presenta la máxima altura.

   Se debe construir primero el muro cercano a la margen derecha de la quebrada Santo Domingo (muro de tierra armada superior) y las dos filas de soil nail y finalmente el muro próximo a la intercepción de las quebradas La Carbonera y Santo Domingo (muro de tierra armada inferior).

Previo al inicio de la construcción de los muros reforzados se debe realizar las actividades para el manejo de aguas superficial general y subsuperficial del muro, como también el almacenamiento y selección del material a utilizar.

2. Obras sector inferior del Espino. Los muros en suelo reforzado se deben iniciar en el sitio de mayor depresión del terreno es decir donde el muro presenta la máxima altura.

   Inicialmente se debe realizar el relleno común compactado del sector norte del Espino, involucra la parte intermedia de la quebrada Santa Rita y posteriormente el muro de tierra reforzada en la parte inferior del deslizamiento el Espino.

   Previo al inicio de la construcción de los muros reforzados se debe realizar las actividades para el manejo de aguas superficial general y subsuperficial del muro, como también el almacenamiento y selección del material a utilizar.

   El muro en gavión se construirá en el sector norte al frente de las construcciones del barrio.

Etapa 4: Obras de mitigación de los **sectores intermedios** de La Carbonera y El Espino.

Estas obras de deberán ejecutar en el siguiente orden:

1. Obras sector intermedio de La Carbonera. Construcción de terrazas según se indica en los planos de diseño. Las terrazas de deben construir de arriba para abajo, y una vez terminada la primera terraza se debe construir las filas de micropilotes proyectada.

   Previo al inicio de las terrazas se deben construir las filas de micropilotes proyectados en la margen derecha de la quebrada La Carbonera.

2. Obras sector intermedio del Espino. Construcción de terrazas según se indica en los planos de diseño. Las terrazas de deben construir de arriba para abajo, y una vez terminada la primera terraza se debe construir las filas de micropilotes proyectada.

Previo al inicio de las terrazas se deben construir las filas de micropilotes proyectados en la margen derecha de la quebrada La Carbonera..

12.12.2. Pantallas Ancladas y Vigas de Amarre con Elementos Verticales

Construir terrazas por módulos, según se indica en los planos para el nivel superior de los micropilotes y zarpa de cada módulo de muro reforzado, mediante el movimiento de tierra en corte y algo de relleno con material granular compactado para reemplazo (donde exista) del relleno y en el sitio de la cimentación del muro, eventualmente se puede requerir de la voladura de bloques para la localización de las obras.

Construir los elementos verticales tipo micropilotes y/o caissons de las filas en toda la longitud de cada módulo, construcción de los anclajes por módulo, colocación del concreto pobre, armado y fundida de la zarpa del muro, colocación de tubería de lloraderos y fundida del concreto del muro y finalmente el tensionamiento de los anclajes.
Se sugiere construir en la época de verano de manera que los flujos de agua tanto superficial como subsuperficial sean mínimos y no interfieran de forma directa con las excavaciones y demás procedimientos, también se sugiere utilizar formaleta en las caras del muro.

La construcción de los módulos se recomienda se realicen primero los módulos impares y luego los módulos pares, con el objeto de separar las excavaciones y evitar acelerar el movimiento actual del talud.

Se debe realizar el vaciado del concreto de tal manera que no se presente segregación del mismo y se pueda vibrar en todas partes a la vez que se funde.

Los anclajes se pueden construir en conjunto con la construcción de los elementos verticales tipo micropilotes, caissons y/o zarpa. El tensionamiento de los anclajes se recomienda hacerlo al 100% de la carga diseñada, cuando el concreto cumpla mínimo el 75% de la resistencia de diseño, cumpliendo el ciclo de curado del concreto de la zarpa, previo la verificación de la resistencia a la compresión con cilindros normales.

Para las excavaciones, se debe tener en cuenta que se requiere excavar en roca y/o demoler concretos existentes, para lo cual se debe utilizar equipos mecánicos destructivos para fracturamiento de la misma y/o la utilización de explosivos.

Se deberán efectuar ensayos de calidad del concreto del muro, en todos y cada uno de los módulos.
Es importante aclarar que la implementación de esta solución inicialmente permitirá unos movimientos para comenzar a funcionar adecuadamente, que puedan generar pequeñas deformaciones, por lo cual se deberán programar obras básicas de mantenimiento.

12.12.3. Caissons Drenantes

Para la construcción de los caissons drenantes y/o pozos de abatimiento a continuación se describe la secuencia necesaria a realizar:

1. Preparación de la zona del pozo, para lo cual se requiere realizar un descapote de aproximadamente 0.30m con un diámetro de 10m, colocar una capa de recebo compactado de aproximadamente 0.50m de espesor, en forma que el relleno sobresalga del nivel del terreno para evitar que las aguas superficiales entren al pozo.

2. Excavación del primer metro de profundidad, colocación del concreto de limpieza en el área donde se colocará el anillo, colocación del refuerzo y formaleta del primer anillo, colocar los pasos de la escalera, fundida del

primer anillo completo (concreto de 3000psi con acelerante), remover formaleta a las 12horas.

3. Remover con cuidado la formaleta para evitar daños en el concreto y se procederá a hacer el siguiente metro de excavación. Se limpiarán los hierros verticales de los anillos que deben traslaparse. Se limpiará y escarificará con cuidado la superficie interior del anillo que quedo en contacto con el terreno removiendo todo el concreto de limpieza que pueda quedar adherido, para que el concreto del siguiente anillo se adhiera perfectamente a esta superficie. Se colocará el refuerzo y la formaleta para fundir el siguiente anillo. Se repetirá este proceso con los siguientes anillos hasta llegar a la profundidad donde empiece a filtrar agua. Es indispensable que todos los hierros verticales se prolonguen hacia abajo los 0.30m necesarios para hacer los traslapos con hierros verticales del siguiente anillo.

4. Si las paredes de la excavación no pueden mantenerse estables durante el tiempo de excavación y colocación del refuerzo, de la formaleta y de fundida del concreto, tendrá que emplearse un sistema de entibado que luego quedará embebido en el concreto.

5. Cuando llegue al nivel de filtración de agua hacia la excavación, se empezará a colocar en todos los anillos los manguitos metálicos de φ6" con pendiente de acuerdo al estrato que lleva el agua. Los drenes cortos de φ4" se dejaran con una pendiente de 0.1H:1V. Posteriormente a través de los manguitos se construirán los drenes horizontales. Se dejarán tapados los manguitos y los drenes a medida que se construyan para evitar que el agua penetre en el pozo durante la construcción. Cuando se pasen los estratos por donde se infiltra el agua, se construirán dos anillos más sin dejar ninguna abertura ni colocar drenes para que este extremo del pozo sirva de cámara donde se acumule el agua que cae de los drenes. Una vez construido el último anillo y la base del pozo, se bajará el equipo de perforación para construir la conducción.

6. Los drenes horizontales se empezaran a construir de abajo hacia arriba colocando andamios. Para la construcción de los drenes horizontales en tubería PVC φ2 1/2", cubiertos con geotextil, es necesario revestir temporalmente con tubería metálica de φ4". Una vez colocado el dren se retirará la tubería de revestimiento. A todos los drenes largos y cortos se les colocará en su extremo el adaptador roscado para permitir hacerles la limpieza periódica con aire y agua a presión.

7. Si desde un principio se requiere drenar la excavación, se debería mantener permanentemente un sistema de bombeo de agua.

12.12.4. Rellenos Reforzado

Para la construcción del relleno reforzado a continuación se describe la secuencia necesaria a realizar:

1. Conformación y verificación del nivel de cimentación de las terrazas de cimentación según se indica en el plano de perfiles, construcción del colchón drenante con su sistema de drenaje.
2. Formaletear sobre una capa ejecutada.
3. Desenrollar la geomalla a la longitud indicada y dejando los sacos con suelo orgánico y semillas de pasto para conformar la cara exterior.
4. Colocación del suelo de relleno ya sea a la mitad o al total de su espesor.
5. Formación del montículo para anclar la geomalla.
6. Colocación del traslapo de las geomallas sobre el montículo y anclaje del mismo con el relleno.
7. Relleno adicional para nivelar y formar el espesor de la respectiva capa.
8. Colocación de una nueva formaleta para repetir el proceso.
9. Conformar la superficie final con pendiente mínima del 5% hacia el talud inferior y empradizar.





13. OBSERVACIONES PARTICULARES

La magnitud del fenómeno en estudio requiere de intervenciones de grandes volúmenes de obra, lo cual conlleva a la exigencia de altos costos para su implementación, por lo consiguiente se debe establecer el origen de los recursos. Como alternativa para obtener parte de los recursos para la construcción de las obras proponemos que el material proveniente de los terraceos especialmente del sector El Espino se comercialice como materiales de rellenos seleccionados y/o recebos.

13.1. CUMPLIMIENTO CON LA RESOLUCIÓN

Las obras proyectadas corresponden al cumplimiento de los requerimientos de la Resolución No. 227 del 13 de Julio de 2006 de la Secretaria de Gobierno y la DPAE, para lo cual se realizaron los análisis para diferentes situaciones: Actual y con obras normales y en condiciones extremas, con niveles freáticos altos y/o factores ru y para coeficientes de aceleración máxima equivalente a 2/3 (67%) del valor del estudio de microzonificación sísmica.

Para obtener los siguientes valores de factores de seguridad:

TIPO DE AMENZA	COND. NORMALES	COND. EXTREMA
BAJA	> 1.90	> 1.30
MEDIA	1.20 – 1.90	1.00 – 1.30
ALTA	< 1.20	< 1.00





13.2. FACTOR DE SEGURIDAD EN FUNCIÓN DE LAS OBRAS

A continuación se describe la variación de los valores de factor de seguridad que se pueden alcanzar de acuerdo a las obras que se implementen:

Alternativa 1. Reubicación de viviendas Fase III

En esta alternativa se mantiene los valores de factor de seguridad menores a 1 y por consiguiente el nivel de amenaza sigue siendo alto.

Alternativa 2. Obras Sectores Superiores e Inferiores

En esta alternativa se proyectan obras de mitigación para los deslizamientos La Carbonera y El Espino con el objeto de alcanzar valores de factor de seguridad superiores a 1.3 y obtener un nivel de amenaza bajo, instrumentación y monitoreo. Para el sector intermedio el factor de seguridad sigue siendo menor de 1 con nivel de amenaza alto.

En esta alternativa es muy importante aclarar que el nivel de amenaza del sector superior con las obras proyectadas es bajo (factores de seguridad mayores a 1.3), siempre y cuando se construyan las obras proyectadas para los sectores intermedio e inferior, de lo contrario se disminuye el nivel de estabilidad del sector superior.

Alternativa 3. Obras Sectores Superior, Medio (obras parciales) e Inferior

En esta alternativa comprende la construcción de las obra de mitigación en la parte superior e inferior de los sectores de La Carbonera y El Espino, **Anexo 5**, **Planos 2.C, 3.C, 4.C**, **2.E, 3E, 4.E** para la Carbonera y el Espino respectivamente donde se especifican las obras, los cuales quedarán en un nivel de amenaza bajo para factores de seguridad mayores a 1.3 en tanto que en la parte intermedia las obras estarán enfocadas para obtener un

factor de seguridad menor de 1.3 que corresponde a un nivel de amenaza medio a alto.

En esta alternativa es muy importante aclarar que el nivel de amenaza del sector superior con las obras proyectadas es bajo (factores de seguridad mayores a 1.3), siempre y cuando se construyan las obras proyectadas para los sectores intermedio e inferior, de lo contrario se disminuye el nivel de estabilidad del sector superior. Alternativa recomendada, seleccionada y plasmada en planos de construcción.

Alternativa 4. Obras Sectores Superior, Medio (obras totales) e Inferior

Comprende la implementación de obras de mitigación en los sectores superior, medio e inferior de La Carbonera y El Espino, para alcanzar factores de seguridad mayores a 1.3, y un nivel de amenaza bajo.

13.3. TIEMPO DE EJECUCIÓN

La localización en planta y perfil de estas obras se deben ajustar en campo en el momento de la construcción debido a que la dinámica del fenómeno cambia constantemente la morfología del sitio. La localización de las terrazas mostradas en este plano corresponde a una guía constructiva y puede variar sustancialmente y se debe ajustar durante el replanteo o en el momento de la construcción.

Estos diseños tienen una validez de un año debido a los continuos cambios del fenómeno. Esta validez esta definida en la póliza conforme se indico en el CR – 4383 del 23 de Julio de 2008. Pasado este tiempo, se deben realizar los respectivos ajustes a los diseños.

13.4. DISEÑOS HIDRÁULICOS

Los diseños de obras hidráulicas, específicamente lo referente a la intervención de las quebradas, presentados en el estudio son planteados a nivel de la etapa 1, debido a que se requiere el concepto y aprobación del Acueducto y demás entidades pertinentes. Tampoco tienen en cuenta la parte paisajística que eventualmente podría aplicar al sitio.

Una vez revisado y aprobado los diseños para la intervención de las quebradas por parte de las entidades pertinentes se procederá a el replanteo de los ejes de las mismas, la conformación de los cauces deberán iniciarse de abajo hacia arriba, con el objeto de minimizar los aportes de sedimentos y basuras al cauce y permitir el drenaje natural de la misma, previo a la construcción de accesos provisionales de equipos para el retiro de materiales provenientes de dicha actividad. La intervención se recomienda hacerla por tramos menores a 50m para facilitar el manejo de las aguas para tener buenas condiciones y rendimientos de trabajo como también para minimizar fenómenos de erosión y remoción.

13.5. MOVIMIENTOS DE TIERRA Y EXCAVACIONES

Esta actividad es uno de los ítem de mayor consideración económica en el proyecto y debe cumplir con las normalizaciones vigentes del INVIAS, modificadas para aplicarlas a este proyecto en particular por las condiciones morfodinámicas que en esta zona se presentan, debido a que se plantea la conformación de grandes terrazas y excavaciones de volúmenes importantes, de forma mecánica y manuales en roca y material común, en el **Anexo 6** se presenta las cantidades de obra y presupuesto.





Comprende la excavación de masas de roca fuertemente litificadas y bloques que debido a su buena cementación o alta consolidación requieren el empleo sistemático de explosivos.

Durante la etapa de excavación se deberá seleccionar los materiales que pueden ser aprovechables y/o comercializados; teniendo en cuenta que era zona de explotación minera, además se debe seleccionar el material de descapote para posterior utilización en la actividad de revegetalización, como también la selección de materiales requeridos para la construcción de los muros en tierra reforzada requeridos en el sector inferior de las inestabilidades.

El constructor deberá considerar el empleo de explosivos y actividades derivadas de su uso como adquisición, almacenamiento, manejo, control y el uso programado para evitar mayores inestabilidades en el sector. De acuerdo al material por excavar se requiere de la utilización de maquinaria tipo minería pesada, para garantizar el avance físico de ejecución según el programa de trabajo y que permita el desarrollo de las etapas constructivas, especialmente para el terraceo y conformación de cauces. Para los caissons drenantes y/o mitigación se podrán ejecutar en forma manual pero se deben considerar el empleo de equipos mecánicos.

La localización en planimetría y altimetría de las terrazas se deben ajustar en campo en el momento de la construcción debido a que la dinámica del fenómeno cambia constantemente la morfología del sitio, por lo tanto en los planos de diseños la localización de las terrazas corresponden a una guía constructiva y puede variar sustancialmente y por lo tanto se deben ajustar durante el replanteo y/o en el momento de la construcción, y se debe realizar según se indica en las etapas generales de construcción y/o planos del proyecto.

Las vías de accesos para la ejecución de las obras deberán definirse previo al inicio de las actividades una vez adjudicado el contrato y de acuerdo a los equipos disponibles para le ejecución de las actividades. La construcción de las vías de acceso hacen parte del ítem de excavación mecánica y no se reconoce costo alguno por la construcción de vías de acceso.

13.6. MANTENIMIENTO DE OBRAS

Una vez construidas las obras de mitigación se debe realizar monitoreo quincenal con inclinómetros, piezómetros y/o levantamiento topográfico de varios puntos (mojones en concreto) seleccionados sobre la corona de los muros y/o sectores intervenidos. Este control podrá realizarse hasta al menos seis (6) meses después de terminadas las actividades de construcción. Es muy importante que las referencias utilizadas estén colocadas sobre el estrato rocoso.

Debido a que los deslizamientos son de tipo retrogresivo y de gran magnitud, se deben considerar posibles movimientos debajo de las obras, y como consecuencia probablemente se destape la zarpa del muro de contención proyectado y parte de la cabeza de los elementos verticales tipo micropilotes y/o caissons de la fila exterior, como medida correctiva se recomienda conformar el talud, revegetalizarlo y colocar un pañete (tipo mortero lanzado) en el espacio entre micropilotes, en el momento en que esto ocurra.

Para los anclajes se recomienda como obras de control y seguimiento colocar pintura anticorrosiva cada año a los tramos de torones que quedan

por fuera de la pantalla (libre) para poder realizar re-tensionamiento de los anclajes cada 2 años.

Para los drenes de penetración se recomienda hacerles limpieza con aire a compresión por lo menos 1 vez cada dos meses, como también el seguimiento a las obras de entrega del agua de los mismos.

Seguimiento a las entregas proyectadas de aguas servidas de las viviendas y/u obras hidráulicas, para evitar la concentración y/o socavación en los taludes.

Después de construidos las empradizaciones eventualmente pueden ocurrir algunos desprendimientos de material del talud, para lo cual se requiere como actividad de mantenimiento limpiar y mantener la revegetalización del talud.

Revegetalización de las áreas afectadas por los deslizamientos, cárcavas de erosión presente en los taludes y/o afectadas durante la construcción.

Realizar mantenimiento y/o limpieza a la tubería de las **alcantarillas** existente y/o proyectadas para el cruce de las quebradas en los rellenos reforzados, para garantizar el paso a través de la misma hacia el talud inferior. **Ver anexo 4** cálculo de memorias Manual **de Mantenimiento de Obras**.

Los sistemas de conducción de aguas lluvias del sitio, como son alcantarilla, cunetas, canales, se deben realizar mantenimiento correspondiente de limpieza, resane en concreto en los sitios donde se presentan las fisuras, por lo menos una vez al mes, para evitar la filtración del agua de escorrentía en el talud.

Para los sub-drenes horizontales y lloraderos se recomienda limpiar cada seis meses para evitar la colmatación por arrastre de materiales finos del talud.

13.7. OTRAS CONSIDERACIONES

El constructor deberá tener en cuenta el levantamiento de actas de vecindad previo al inicio de las obras, como también del tiempo requerido para realizar esta actividad, la obtención de permisos ambientales, de construcción, replanteo de obras, adecuaciones de sitios de trabajos, accesos, etc..

13.8. PRIORIZACION DE OBRAS

Dada la dinámica del deslizamiento, su carácter retrogresivo y la magnitud de los grandes volúmenes de suelo y roca involucrados, es necesario iniciar el proceso constructivo de las medidas de mitigación en el menor tiempo posible, con el fin de disminuir el nivel de amenaza sobre los sectores aledaños. Por lo que se recomienda priorizar por fases el proceso constructivo de las obras de mitigación como se relaciona a continuación:

- Construcción de las pantallas ancladas, micropilotes del escarpe principal y los canales perimetrales 1, 2, 3 que se ubican en el deslizamiento la Carbonera y Espino.
- Construcción del muro en tierra armada en la parte inferior del Espino, reconformación del terreno para el control del Levantamiento de San Rafael y construcción del muro en gaviones en este sector.
- Iniciación de las obras de subdrenaje y drenaje superficial del deslizamiento la Carbonera (Santa Viviana Sector Vista Hermosa).
- Reconformación de los taludes tanto de la Carbonera como del Espino, para esto se recomienda una zona de acopio a la altura del

barrio Espino III sector, de tal manera que este material pueda ser utilizado para la construcción del muro en tierra armada y para la comercialización del volumen restante.

14. PRESUPUESTOS

Las cantidades, presupuestos y análisis de precios unitarios se presentan en el Anexo 6. Sin embargo a continuación presentamos las alternativas de la manera que se podrían acometer las obras de mitigación para las inestabilidades de La Carbonera y El Espino:

Alternativa 1. Reubicación de viviendas Fase III (FS < 1.0)

Esta alternativa consiste principalmente en la reubicación de las viviendas que conforman la Fase III, la construcción de las obras hidráulicas y la implementación de la instrumentación geotécnica para el seguimiento del deslizamiento. Para los sectores de El Espino y La Carbonera se tendrá un nivel de amenaza alto.

ALTERNATIVA 1 - FS < 1.0	
REUBICACION DE VIVIENDAS FASE III	$ 76,882,770,000
OBRAS HIDRAULICAS	$ 7,729,276,777
INSTRUMENTACION	$ 3,318,761,448
TOTAL ALTERNATIVA 1	**$ 87,930,808,225**

Alternativa 2. Implementación de obras en las partes superior e inferior de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino (FS > 1.3)

Esta alternativa comprende la ejecución de las obras de mitigación planteadas en la parte superior e inferior de los sectores de La Carbonera y El Espino, la conformación de la parte intermedia de los movimientos, la

implementación de la instrumentación de dichas obras y la construcción de las obras hidráulicas. Para la parte superior e inferior se tendrá un nivel de amenaza bajo con un FS superior a 1.3.

ALTERNATIVA 2 - FS > 1.3 (SECTOR SUPERIOR E INFERIOR)	
INSTRUMENTACION	$ 3,318,761,448
OBRAS HIDRAULICAS	$ 7,729,276,777
SECTOR SUPERIOR - CARBONERA	$ 12,798,489,109
SECTOR SUPERIOR - ESPINO	$ 7,833,669,477
SECTOR INFERIOR - CARBONERA	$ 3,511,831,612
SECTOR INFERIOR - ESPINO	$ 15,937,284,401
CONFORMACION SECTOR INTERMEDIO	$ 1,889,335,680
TOTAL ALTERNATIVA 2	**$ 53,018,648,504**

Alternativa 3. Implementación de la obras para un FS entre 1.0 y 1.3

En esta alternativa comprende la construcción de las obra de mitigación en la parte superior e inferior de los sectores de La Carbonera y El Espino, los cuales quedarán en un nivel de amenaza bajo en tanto que en la parte intermedia de La Carbonera y El Espino las obras estarán enfocadas para obtener un factor de seguridad menor de 1.3 que corresponde a un nivel de amenaza medio a alto.

Adicionalmente, se aprovechará el material de excavación proveniente de la conformación de los taludes especialmente en el sector de El Espino, para la obtención de recursos para el mismo proyecto.

ALTERNATIVA 3 - FS 1 - 1.3	
INSTRUMENTACION	$ 3,318,761,448
OBRAS HIDRAULICAS	$ 7,729,276,777
SECTOR SUPERIOR - CARBONERA	$ 12,798,489,109
SECTOR INTERMEDIA - CARBONERA	$ 23,284,822,358
SECTOR INFERIOR - CARBONERA	$ 3,511,831,612
SECTOR SUPERIOR - ESPINO	$ 7,833,669,477
SECTOR INTERMEDIA - ESPINO	$ 10,255,551,220
SECTOR INFERIOR - ESPINO	$ 15,937,284,401
TOTAL ALTERNATIVA 3	**$ 84,669,686,402**
TOTAL - MENOS MATERIAL DE EXPLOTACION	**$65,776,329,602**

Alternativa 4. Implementación total de obras de mitigación para un FS > 1.3

Comprende la implementación de obras de mitigación en los sectores superior, medio y superior e La Carbonera y El Espino, la construcción de las obras hidráulicas y la instrumentación de dichas obras para tener un nivel de amenaza bajo. Esta alternativa contempla, como en la anterior, el aprovechamiento de los materiales provenientes de la conformación del talud especialmente en el sector de El Espino, para la obtención de recursos para el mismo proyecto.

ALTERNATIVA 4 - FS >1.3	
INSTRUMENTACION	$3,318,761,448
OBRAS HIDRAULICAS	$7,729,276,777
SECTOR SUPERIOR - CARBONERA	$12,798,489,109
SECTOR INTERMEDIA - CARBONERA	$47,012,898,540
SECTOR INFERIOR - CARBONERA	$3,511,831,612
SECTOR SUPERIOR - ESPINO	$7,833,669,477
SECTOR INTERMEDIA - ESPINO	$20,776,668,825
SECTOR INFERIOR - ESPINO	$15,937,284,401
TOTAL ALTERNATIVA 4	**$118,918,880,189**
TOTAL - MENOS MATERIAL DE EXPLOTACION	**$100,025,523,389**

Material de Excavación

En el siguiente cuadro se indican los recursos que se podrán obtener de los materiales provenientes de las excavaciones para la conformación del los taludes en los sectores de La Carbonera y El Espino.

MATERIAL DE EXPLOTACION	
SECTOR EL ESPINO	$ 6,696,864,000
SECTOR LA CARBONERA	$ 2,749,814,400
TOTAL MATERIAL DE EXPLOTACION	**$ 9,446,678,400**

Es de aclarar que en el calculo de cantidades de obra de las alternativas 3 y 4 se determino este material como un gasto de excavación, pero al comercializarlo se convirtió en material de explotación, por lo tanto se debe descontar como un costo de obra y adicionalmente se debe adicionar como un ingreso.

15. CONCLUSIONES

15.1. CONCLUSIONES

- Los deslizamientos de La Carbonera y El Espino se observan bien delimitados en su escarpe principal. El cuerpo de estos movimientos presenta numerosas grietas y escarpes secundarios, que son especialmente notables en el sector de El Espino. En ambos casos, se reconocen sectores con movimientos más activos que otros. En cuanto a las dimensiones de las zonas evidentemente inestables, en el sector de La Carbonera se tiene un área de aproximadamente 132.000 m^2 (13.2 Ha) y en El Espino de 160.000 m2 (16 Ha). En general se encuentran algunos afloramientos desprovistos de vegetación en donde se pueden apreciar las pobres características geomecánicas de los materiales involucrados en el proceso. Por otro lado, existen también algunas zonas que se encuentran bien cubiertas por vegetación herbácea con una fuerte pigmentación verde indicando que son sectores de alta concentración de humedad.
- Desde el punto de vista Geológico, la cartografía muestra una secuencia de unidades litoestratigráficas del cretáceo al terciario cubierta parcial y discordantemente por materiales y depósitos cuaternarios de diferente origen. Esta secuencia se presenta en franjas orientadas en dirección NW-SE. Desde la base en la parte Sur del área afloran rocas del cretáceo de la formación Guadalupe y sus miembros Plaeners (Ksgp), Labor (Ksgl) y Arenisca Tierna (Ksgt) en contactos normales. Encima de esta secuencia se presentan las rocas de la formación Guaduas de edad terciario - cretáceo subdividida en

tres unidades inferior (Tkgi), medio (Tkgm) y superior (Tkgs). Los materiales semiconsolidados que se presentan en la planicie de la Sabana de Bogotá corresponden a la Formación Tilatá de edad Terciario, superior. (Ver **Plano 3**).

- Los depósitos cuaternarios más importantes en el Cerro Altos de la Estancia corresponden a depósitos de ladera como coluviones y derrubios (Qd), depósitos fluviolacustres asociados a la zona de depresión morfológica del embalse de Terreros (Qfl), un depósito remanente de origen fluvioglaciar (Qfg), localizado en la ladera nororiental del cerro en inmediaciones de Sierra Morena y materiales depositados por corrientes aluviales superficiales y humedales (Qah). Localmente se identifican materiales de rellenos y botaderos de escombros antrópicos (Qb). Igualmente la dinámica de las laderas por procesos de remoción en masa ha originado depósitos de deslizamientos en los que se encuentran El Espino y La Carbonera.
- El área en estudio se encuentra afectada por dos grandes movimientos de ladera conocidos como La Carbonera y El Espino, de tipo retrogresivo, es decir su avance se realiza ladera arriba generando daños a numerosas viviendas que han sido incluidas al programa de reasentamiento. Debido a la dinámica y la evolución del proceso de inestabilidad y de acuerdo con las recomendaciones del estudio de Ingeominas de 2003, la DPAE dividió el área en tres fases denominadas Fase I, en la parte inferior y media de la ladera, la Fase II en la parte intermedia superior y la Fase III localizada en la parte superior de la ladera. A la fecha se han reubicado todas las viviendas de la Fase I, se encuentran en proceso de reasentamiento las de la Fase II y la Fase III paso de su categorización de zonas sujetas a análisis de riesgo por fenómenos de remoción en masa a amenaza media y riesgo medio.

- Desde el punto de vista hidrológico, el régimen de precipitación alrededor de la zona de estudio, es bimodal. En la estación El Sierra Morena, al igual que en la estación Casablanca, los valores altos se presentan entre los meses de marzo, abril, mayo y junio, como el primer periodo de lluvias en el año, y octubre y noviembre como el segundo periodo lluvioso del año. El valor promedio más alto se presenta en el mes de octubre para la estación Sierra Morena (88 mm), en tanto que para la estación Casablanca, éste se presenta en el mes de mayo (81 mm). Por otro lado, Los valores más bajos se presentan para las dos estaciones entre los meses de diciembre a febrero y julio a septiembre, siendo los promedios mínimos de 20 mm y 23 mm para las estaciones Sierra Morena y Casablanca respectivamente.
- Para el planteamiento de las obras de mitigación tanto geotécnicas como hidráulicas, se realizaron análisis para la condición actual del terreno y para varios escenarios de nivel de agua y sismo. Con base en estos análisis de estabilidad, se evaluaron distintas alternativas teniendo como criterios generales los escenarios y factores de seguridad establecidos en la Resolución 227 de 2006 del DPAE.
- Teniendo en cuenta la magnitud del movimiento, las obras de mitigación proyectadas se analizaron en los deslizamientos de La Carbonera y El Espino, para lo cual se dividió la zona en tres sectores denominados superior, medio e inferior. El sector superior corresponde a la parte alta o corona del movimiento y para éste se analizaron obras de mitigación para que el nivel de amenaza sea bajo, el sector intermedio corresponde al cuerpo de cada deslizamiento para el cual se analizaron y cuantificaron obras de mitigación para que el nivel de amenaza pase a medio y bajo y finalmente, el sector inferior





corresponde al pie del deslizamiento en donde se plantearon obras para que el nivel de amenaza sea bajo.

Con el fin de estabilizar los deslizamientos se propones cuatro alternativas que son:

ALTERNATIVA 1: FS < 1.0

Reubicación de las viviendas de la Fase III y la implementación de obras hidráulica e instalación de la instrumentación geotécnica, con la cual se tendría un Factor de Seguridad menor a 1.0.

El presupuesto para esta alternativa es de **$ 87,930,808,225.**

ALTERNATIVA 2: FS > 1.3 (SECTOR SUPERIOR E INFERIOR)

Comprende la construcción de obras geotécnica de mitigación en la parte superior e inferior de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino y la implementación de obras hidráulicas e instalación de instrumentación geotécnica para tener un nivel de amenaza bajo. En la parte intermedia se realizará una conformación del terreno continuando en un nivel de amenaza alto.

El presupuesto para esta alternativa es de **$ 53,018,648,504.**

ALTERNATIVA 3: FS 1 - 1.3

Esta alternativa comprende la implementación de las obras en la parte superior e inferior de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino para un nivel de amenaza bajo y en la parte intermedia de los deslizamientos de La Carbonera y El Espino, las obras proyectadas permiten un nivel de amenaza medio a alto.

Adicionalmente y con el objeto de obtener recursos adicionales para el proyecto, se propone el aprovechamiento de los materiales provenientes de las excavaciones para la conformación de taludes especialmente del deslizamiento de El Espino.

El presupuesto para esta alternativa es de **$ 65,776,329,602** teniendo en cuenta el aprovechamiento de los materiales de excavación.

ALTERNATIVA 4: FS >1.3

Esta alternativa contempla la implementación de obras de mitigación tanto geotécnicas como hidráulicas, la instalación de la instrumentación geotécnica y el aprovechamiento de los materiales excavados para la obtención de otros recursos para el desarrollo del proyecto.

El presupuesto para esta alternativa es de **$ 100,025,523,389** teniendo en cuenta el aprovechamiento de los materiales de excavación.

- De acuerdo a lo anteriormente expuesto se recomienda la implementación de la **Alternativa 3** ya que presenta los costos más favorables al implementarse las obras de mitigación proyectadas y para los niveles de amenaza bajo que se obtienen tanto para los sectores superior como inferior en donde se encuentran viviendas habitadas.

  Los impactos ambientales generados a la población vulnerable con respecto a las obras de mitigación propuestas son positivos las cuales tienen como objetivo ambiental generar cambios en cuanto al saneamiento básico (Salud y Calidad de vida), que es una prioridad para los residentes del sector, teniendo en cuenta que una de las

deficiencias en los barrios de Ciudad Bolívar que conforman el sector Altos de la Estancia, es la falta de zonas verdes, la ausencia de parques y de áreas de recreación como también antejardín, caracterizándola como un paisaje saturado por las construcciones.

Los espacios (zona de las inestabilidades) a recuperar ambientalmente se conciben como oportunidades de trabajo, de fortalecimiento de grupos con intereses comunes y como espacios de apropiación colectiva e individual, bien sea a través de acciones concretas en escenarios de participación que faciliten establecer nuevas interpretaciones y relaciones entre los actores sociales, tanto los institucionales como los locales ente los que se destacan las comunidades.

- Las obras diseñadas se encuentran ubicadas en los polígonos de la Fase I y II, los cuales están declarados en amenaza alta y riesgo alto no mitigable.

15.2. RECOMENDACIONES

- Es importante que este estudio se articule al Plan de Acción para la Mitigación del Riesgos y Rehabilitación del sector Altos de La Estancia formulado por la DPAE, para que la intervención en el sector se realice de manera integral y coordinada por parte de las entidades Distritales que tengan competencia, con el fin adelantar la mitigación y rehabilitación del sector.
- Las obras hidraúlicas se realizarán por etapas, siendo la reconformación de los cauces de la zona la primera etapa. Para

garantizar el adecuado comportamiento de las estructuras hidráulicas, se recomiendan las siguientes acciones:

- Los cauces de las quebradas, funcionan como cauces naturales no confinados. Para mejorar las condiciones hidráulicas de las mismas, se debe realizar un manejo inicial, con el fin de evacuar las aguas generadas por la escorrentía superficial producto de las lluvias y sub-superficiales, e infiltraciones, etc. Esto implica una reconformación de los cauces, excavando el lecho del mismo con el fin de obtener una mayor sección transversal con capacidad suficiente para dicho fin, adicionalmente haciendo una limpieza, retiro de basuras y escombros y remoción de especies vegetales, con el fin de despejar el cauce original de estos cuerpos de agua. De igual manera se debe drenar los sitios de acumulación de agua existentes en el cuerpo del deslizamiento, mediante canales abiertos en tierra con el objeto de aliviar presiones y mejorar la escorrentía superficial.
- Para evitar la filtración de agua de los cauces naturales hacia la zona de intervención se proyecta realizar previos manejos durante la etapa de construcción, mediante la colocación de geodrenes o geomembranas en las paredes laterales de los canales provisionales construidos para la conducción del agua de escorrentía, de forma que se evite el paso del flujo de este canal (provisional o de manejo) hacia afuera del mismo.
- Las aguas lluvias provenientes de los barrios que se encuentran en la parte superior de las cuencas drenantes a los cauces naturales, deberá ser recogida por medio de canaletas revestidas en tierra y/o revestidas con alguna malla geosintética o geotextil no tejido impregnado con emulsión

asfáltica. Dichas aguas deberán ser conducidas hacia los cauces principales (quebradas La Carbonera, Santa Rita y Santo Domingo).

- Durante la construcción de la canalización de quebradas. Hacer una verificación detallada de las tuberías de aguas domésticas que actualmente quedan y vierten las aguas al cuerpo del deslizamiento y definir su ubicación. Una vez localizadas se realizara manualmente una cuneta en tierra dirigida a la quebrada más cercana. Esta cuneta deberá ser revestida con tela impermeable o geotextil no tejido impregnado con emulsión asfáltica.
- Posterior a la obra. Una vez construido las obras de canalización y definido el cauce se realizarán campañas de limpieza y reconocimiento quincenales con el fin de verificar el flujo libre del agua y retirar los posibles desprendimientos de suelo que puedan ocurrir a lo largo de las márgenes o acumulaciones de basuras.
- Coordinar con la EAAB para que se realice el mantenimiento y limpieza de los sistemas de alcantarillado y desarenadores existentes tanto en la parte alta como en la parte baja de la ladera.

- Se recomienda, previo a la iniciación de la construcción de las obras, adelantar por parte del Distrito el Estudio Predial con el fin de identificar y definir el estado actual jurídico y legal de los predios que se necesitan para la ejecución de las mismas.
- Se recomienda, priorizar la construcción de las obras, por fases, lo cual dependerá de la asignación presupuestal del Distrito para la construcción de las mismas. En el evento de contar con la totalidad de la asignación presupuestal de una de las alternativas, se

recomienda seguir con los lineamientos de "Etapas Generales de Construcción", presentadas en el capítulo 12.

- En el evento dado de no cantar con la totalidad del presupuesto para la ejecución de las obras de mitigación, es necesario iniciar el proceso constructivo de las medidas de mitigación en el menor tiempo posible y priorizar la intervención por fases el proceso constructivo de las obras de mitigación como se relaciona a continuación:
    - Construcción de las pantallas ancladas, micropilotes del escarpe principal y los canales perimetrales 1, 2, 3 que se ubican en el deslizamiento la Carbonera y Espino como se ilustra en el Plano 15.
    - Construcción del muro en tierra armada en la parte inferior del Espino y reconformación del terreno para el control del Levantamiento de San Rafael.
    - Iniciación de las obras de subdrenaje y drenaje superficial del deslizamiento la Carbonera.
    - Reconformación de los taludes tanto de la Carbonera como del Espino, para esto se recomienda una zona de acopio a la altura del barrio Espino III sector, de tal manera que este material pueda ser utilizado para la construcción del muro en tierra armada y para la comercialización del volumen restante. En el evento de que la zona asignada como centro de acopio y trabajos para el procesamiento del material sea insuficiente, será necesario entrar a adquirir predios de la Fase III.

- Es importante, que la DPAE continúe con el proceso de evacuación de las familias que se encuentran localizadas en el polígono de la

Fase II donde se va a construir las obras, con el fin de tener la zona despejada para la construcción de las mismas.

- De acuerdo con la visita técnica realizada el 31 de Julio de 2008 al sector de Santa Viviana sector Vista Hermosa, se pudo verificar la activación del movimiento durante el último invierno. Debido a lo anterior, se recomienda ampliar el polígono de la Fase II e incluir en el programa de reasentamiento las viviendas ubicadas de las manzanas 41, U9 y 56. Finalmente, es importante resaltar, que dado la dinámica del movimiento y el tiempo de ejecución de las obras de mitigación El sector de Santa Viviana Sector Vista Hermosa puede verse afectado por desplazamientos del terreno, lo que conllevaría aumentar el polígono de Fase II para este sector, tal como se informó a la DPAE en la visita técnica y se comunico en el oficio Numero talxxxx.
- Las obras que actualmente desarrolla la EAAB (Sector de Santa Viviana sector Vista Hermosa), se verán afectadas por el progreso del deslizamiento, el cual ocasionará desajustes en los empates de las tuberías y pozos de inspección, generando posteriormente infiltraciones en la masa inestable con el consecuente incremento en la tasa de movimiento.

16. ESPECIFICACIONES TECNICAS

Con el objeto de definir las especificaciones para la construcción y el control de las obras a realizar en este sitio, para todos sus efectos se destacará lo dispuesto en el manual de *ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS* del Instituto Nacional de Vías INV.

Algunos de los ítems más relevantes que se deberán considerar son:

- Desmonte y Limpieza INV 200-96.
- Demolición y remoción INV 201-96.
- Excavaciones de la explanación canales y prestamos INV 210-96.
- Terraplén INV 220-96.
- Excavaciones Varias INV 600-96.
- Rellenos para Estructuras INV 610-96.
- Concreto INV 630-96.
- Acero de refuerzo INV 640-96.
- Tubería de concreto reforzado INV 661-96
- Cunetas revestidas en concreto INV 671-96
- Filtros INV 673-96
- Tierra armada INV 680-96
- Muros de contención de suelo reforzado con geotextiles INV 682-96
- Cercas de alambre INV 800-96
- Empradización Taludes INV 810-96.
- Geotextiles INV 820-04
- Transporte de Materiales Provenientes de Excavaciones y Derrumbes INV 900-96.

Para la señalización durante la etapa de construcción se recomienda seguir las indicaciones del MANUAL SOBRE DISPOSITIVOS PARA LA REGULACIÓN DEL TRÁNSITO EN CALLES Y CARRETERAS del Instituto Nacional de Vías INV.

En el Anexo 7 se describen las especificaciones particulares de gaviones, subdrenajes, inclinómetros, piezómetros, mojones, pernos de anclajes, geomallas, cunetas en concreto, caissons drenantes, concreto, ejecución de terrazas, tubería flexible, anclajes, canales perimetrales, drenes de penetración, micropilotes, caissons de contención.





17. ANEXOS

Como complemento a este informe, se incluyen los siguientes anexos:

Anexo 1 : Topografía
Anexo 2 : Exploración del Subsuelo
Anexo 3 : Ensayos de Laboratorio
Anexo 4 : Memorias de cálculo
Anexo 5 : Planos
Anexo 6 : Cantidades de Obra, Presupuestos y APU
Anexo 7 : Cronograma y Especificaciones Técnicas
Anexo 8 : Registro Fotográfico

18. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

A. K. (1984). Predicting ground-water response to precipitation. Journal of Geotechnical Engineering, 110(7):957—975.

Bates, R.L, Jackson J. A., 1980, Glossary of Geology, 2nd de. American Geological Institute, Falls church, Va., 751 pp.

Babuska, 1971 Babuska, I. (1971). Error bounds for finite element methods. Num. Math., pages 322—333.

Biot, 1941 Biot, M. A. (1941). General theory of three dimensional consolidation. J. Appl. Physics. 12, pages 155—164.

Biot, 1955 Biot, M. A. (1955). Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid.J. Appl. Physics. 26, pages 182—185.

Biot, 1956 Biot, M. A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. part i: Low frequency range. part ii: higher frequency range. J. Acoust. Soc. Am. 28, pages 168—191.

Bishop, A.W. (1955) The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique. Vol 5. London.

Brezzi, 1990 Brezzi, F., B. K. J. (1990). A discourse on the stability condition for mixed finite elements formulations. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 82, pages 27—57.

Broms, B. (1975) "Landslides" Cap 11. Foundation Eng. Handbook. Eds Winterkorn and Fang. Wiley, N.Y., 1975.

Caro P. y García J., 1988, Zonificación Geotécnica de Bogotá, Ingeominas, Bogotá.

Consorcio Civiles Ltda & Hidroconsulta Ltda, 1999, Estudio geotécnico, evaluación de alternativas de medidas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas paraestabilizar la zona comprendida entre las quebradas Santo Domingo y Santa Rita, Barrio El Espino, Localidad Ciudad Bolívar, Fondo de Prevención y Atención de Emergencias FOPAE, Alcladía Mayor de Santafé de Bogotá, Santafé de Bogotá.

Clements T.S.F., La falla de Bogotá, Colombia, Suramerica. Servicio GeológicoNacional. Informe No69, Santafé de Bogotá.

Convenio Interadministrativo Corpes-Ingeominas-Gobernación de Cundinamarca,1998, Informe de Geología del Mapa de Amenazas Geológicas por Erosión y Remoción en Masa del Departamento de Cundinamarca - Fase II, Bogotá.

Cimoc (Centro de Investigación en materiales y obras civiles, UNIANDES), 2001. Monitoreo y seguimiento de fenómenos de remoción en masa de los barrios San Antonio del mirador, Santa Helena y Santa Viviana de la ciudad de Bogotá, DC, Informe Final presentado a la DPAE, Dirección de prevención

y Atención de Emergencias. Contrato CCS-273/2000. Universidad de Los Andes, Bogotá.

Chan, 1988 Chan, A. (1988). A unified finite element solution to static and dynamic problems in Geomechanics. PhD thesis, University College of Swansea, UK.

Chow, Ven Te (1962), "Hydrologic Determination of Waterway Areas for the Design of Drainage Structures in Small Drainage Basins",.

Durán R. y Mójica P., 1981, Evaluación de reservas de carbón en siete zonas de Colombia, Ingeominas, Santafé de Bogotá.

Dunniclif., J. And Green, G (1993) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Jhon Wiley & Sons.

Dwight et al., 1984 Dwight, A., Sangrey, Kingsley, O., Harrop-Williams, and Je.rey,

EAAB, 2002 EAAB, E. (2002). Información hidrometereorológica. estaciones con referencia a la cuenca del río tunjuelo. Technical report, Empresa de Acueducto Alcantarillado de Bogotá.

García, M. (1992). Métodos para el Tratamiento de Zonas Inestables. En Curso de Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1992.

Goldschmidt, 1960 Goldschmidt (1960). Hydrometeorological methods of quantitative estimation of annual underground water replenishment. Internacional Associate of Science Hydrology, (52):272—278.

Geotecnia & Cimentaciones (2001) . Diseño, Instalación y Monitoreo de Instrumentación para zonas inestables en el Espino — Ciudad Bolívar, DPAE.

Green, 1969 Green, A. E. (1969). On basic equations for mixtures. Q. J. Mech. Appl. Math. 22, pages 428—438. 12

Hoek and Bray, 1977 Hoek, E. and Bray, J. (1977). Rock slope engineering. Technical report, Institutions of Mining and Matellurgy, London.

Horton, 1940 Horton, R. (1940). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil science society of America proceedings, (5):399—417.

Hettner A, 1892. Die Kordillere von Bogotá. Peterm. Mitt., Erg.-Bd. 22, Heft No104, 131 pp., 9 fig., 2 Taf. (Kart., Prof.).

Hubach E, 1931b. - Geología Petrolífera del Dpto de Norte de Santander. Serv. Geol. Nal., Informe No 176 (inédito), parte A, pp. 1-218; parte B, pp. 219-416; parte C (láminas)), 26 lám., Bogotá.

Hubach E, 1945c (escrito en 1933). - La región de Panga Panga, al noreste de Choachí (Cundinamarca). Ibid., t. 6, pp. 27-37, 1 foto, lám VII-IX, Bogotá.

Hubach E, 1957a (escrito en 1951). - Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bol. Geol., Inst. Geol. Nal., Vol.5, No 2, pp. 93-112, 2 lám., Bogotá.

Hubach E. y Alvarado B., 1932a. - Estudios geológicos en la ruta Popayán-Bogotá. Serv. Geol. Nal., informe No 213 (inédito), 132 pp., 1 mapa. f. t., Bogotá.

INGEOMINAS, 1955, Evaluación de Susceptibilidad y Amenaza Preliminar en las localidades de Ciudad Bolívar, Rafael Uribe Uribe, Usme y San Cristóbal, Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1997, Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá (Mapa geológico1:50.000).

Ingeocim, (1997). Zonificación de riesgo por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santafé de Bogotá. Technical report, FOPAE. Bogota D.C.

INVIAS, 1998. Manual de Estabilidad de Taludes. Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, 1998.

Jonson, 1977 Jonson, K. H. (1977). A predictive method for groundwater levels. Master's thesis, University Ithaca, N.Y.

Julivert M., 1965. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. Ibid., No 13-14, 1 vol. texto, pp. 1-104. 31 fig., 2 lám.; 1 vol. mapas, 4 mapas, 2 lám., Bucaramanga.

Julivert M., 1968, Léxico Estratigráfico Internacional, Volumen V, Unión Internacional de Ciencias Geológicas.





Montero, J. (1992). Procesos, Factores y Causas de Inestabilidad de Taludes y Laderas. En Curso de Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1992.

Muñoz, F. (2001). "Perspectivas para la evaluación de Amenazas y Riesgos Geológicos en INGEOMINAS – Colombia." III Simposio Panamericano de Deslizamientos, Cartagena, Colombia. Julio de 2001.

NATIVA LTDA.(1998). Estudio de Zonificación Geotécnica del Barrio San Rafael. UPES, 1998.

Newmark, 1959 Newmark, N. M. (1959). A method of computation for structural dynamics. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. 8, pages 67—94.

Priest, 1993] Priest, S. (1993). Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman Hall.

Skempton, A.W; Petley, D.J. (1967). The Strength Along Structural Discontinuities in Stiff Clays. Reprinted from Proc. Geotech. Conf. Oslo. in Selected Papers on soil mechanics. Thomas Telford Ld. London, 1984.

[Thornthwaite, 1948] Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, (38):55—94.

Renzoni G., 1962, Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este-sureste de Bogotá. Boletín geológico, Servicio Geológico Nacional, Volumen X, No1-3, pp 59-79 Santafé de Bogotá D.C.

Suárez J., 1998, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB, Bucaramanga.

Varnes, D.J., 1978. Slope movements types and processes, Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, EDS), TRB, National research council, Washington D.C. pp. 11-33.

Xie, 1990 Xie, Y. M. (1990). Finite element solution and adaptative analysis for static and dynamics problems of saturated - unsaturated porous media. PhD thesis, University College of Swansea.

Zienkiewics, 1982 Zienkiewics, O. C. (1982). Basic formulations of static and dynamic behavior of soil and other porous material. In Numerical Methods in Geomechanics, chapter 2, pages 12—48. J. B. Martin.

Zienkiewicz, 1980 Zienkiewicz, O. C., C. C. T. B. P. (1980). Drained, undrained, consolidation dynamic behavior assumptions in soils. Geothecnique, 30, pages 385—395.

Zienkiewicz, 1984 Zienkiewicz, O. C., S. T. (1984). Dynamic behavior of saturated porous media: The generalised biot formulation and its numerical solutions. Int. J. Num. Analyt. Meth. Geomech. 8, pages 71—96.13

ANEXO 1

TOPOGRAFIA

ANEXO 2

EXPLORACION DEL SUBSUELO

ANEXO 3

ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 4

MEMORIAS DE CÁLCULO

ANEXO 5

PLANOS

ANEXO 6

PRESUPUESTOS Y APU

ANEXO 7

CRONOGRAMA Y ESPECIFICACIONES PARTICULARES

ANEXO 8

REGISTRO FOTOGRAFICO

MANUAL MANTENIMIENTO DE OBRA