MGL

DIRECCION DE PREVENCION Y ATENCION DE EMERGENCIAS DE BOGOTA - DPAE
AREA DE ANALISIS DE RIESGOS

ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA EN EL BARRIO BUENOS AIRES, LOCALIDAD DE SAN CRISTOBAL

DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS DE CONTROL PROTECCIÓN Y ESTABILIZACIÓN

Contrato de consultoría CCS-240/2000

Tabla de contenido - Informe final

1 GENERALIDADES 1

1.1 ALCANCE DEL ESTUDIO 1
1.2 ORGANIZACIÓN DEL INFORME 1
1.3 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS 2

2 DIAGNOSTICO CONCEPTUAL 2

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SUS POSIBLES CAUSAS 2
2.2 DELIMITACIÓN GEOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO 4
2.3 MODELOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS 4
2.4 EVALUACIÓN CONCEPTUAL DE LA AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DEL ÁREA DE ESTUDIO 5
2.4.1 AMENAZA 5
2.4.2 VULNERABILIDAD 6
2.4.3 RIESGO 6
2.5 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN 6

3 TOPOGRAFIA 7

3.1 MÉTODO DE TRABAJO 7
3.2 MATERIALIZACIÓN DE MOJONES DE REFERENCIA 7
3.3 DETERMINACIÓN DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS 8
3.4 CÁLCULO Y DIBUJO 9

4 GEOLOGIA 9

4.1 MÉTODO DE TRABAJO 9

4.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA 9
4.2.1 GEOLOGÍA REGIONAL 9
4.2.2 GEOLOGÍA LOCAL 10
4.2.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 12
4.3 GEOMORFOLOGÍA 13
4.4 MODELO HIDROGEOLÓGICO LOCAL 15

5 HIDROLOGIA 15

5.1 OBJETIVOS 15
5.2 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE 16
5.2.1 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA 16
5.2.2 INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA: 16
5.3 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA ZONA 16
5.4 COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO 17
5.4.1 PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL 17
5.4.2 PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL 18
5.4.3 PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS 18
5.5 INTENSIDADES MÁXIMAS DE LLUVIAS ESPERADAS 18
5.5.1 CÁLCULO DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN 18
5.5.2 CURVA INTENSIDAD - DURACIÓN - FRECUENCIA (IDF) 19
5.5.3 INTENSIDADES DE LLUVIA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO 19
5.5.4 LLUVIAS CRÍTICAS PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO 20
5.6 INFILTRACIÓN 20

6 GEOTECNIA 22

6.1 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO 22
6.1.1 EXPLORACIÓN 22
6.1.2 ENSAYOS IN-SITU Y DE LABORATORIO 23
6.1.3 ESTRATIGRAFÍA 25
6.1.4 SECCIONES DE ANÁLISIS 28
6.2 INVENTARIO DE PROCESOS 28
6.1.5 FENÓMENOS AMENAZANTES 30
6.3 ANÁLISIS DETERMINÍSTICO 34
6.3.1 DESLIZAMIENTO 34
6.3.2 CAÍDA DE ROCAS 35
6.4 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO 36
6.4.1 PROBABILIDADES DE FALLA A CORTO PLAZO POR DESLIZAMIENTO 36
6.4.2 PROBABILIDADES DE FALLA A LARGO PLAZO POR DESLIZAMIENTO 36
6.4.3 PROBABILIDADES DE FALLA A CORTO PLAZO POR CAÍDA DE ROCAS 38
6.4.4 PROBABILIDADES DE FALLA A LARGO PLAZO POR CAÍDA DE ROCAS 39

7 EVALUACION Y ANALISIS DE AMENAZA POR FRM 39

7.1 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL ANÁLISIS 40
7.2 MÉTODO DE ESTUDIO Y MODELOS EMPLEADOS 40

7.3 CRITERIOS APLICADOS 42
7.4 PÉRDIDA DE SUELOS POR EROSIÓN PLUVIAL 43
7.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL ENTORNO 43
7.4.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELOS 44
7.4.3 MÉTODO DE ESTUDIO PARA LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN PLUVIAL 48
7.4.4 BASE TEÓRICA 49
7.4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS 52
7.4.6 PÉRDIDA DE SUELOS E 55
7.5 FACTORES DETONANTES 57
7.6 ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR FRM 57
7.6.1 AMENAZA ACTUAL 57
7.6.2 LARGO PLAZO 61
7.7 CONCLUSIONES 64

8 EVALUACIÓN Y ANALISIS DE VULNERABILIDAD POR FRM 64

8.1 MÉTODO DE ESTUDIO Y PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD FÍSICA 65
8.2 INVENTARIO DE VIVIENDAS 66
8.2.1 TIPIFICACIÓN DE VIVIENDAS 66
8.2.2 CALIFICACIÓN DE DAÑOS 67
8.3 SOLICITACIONES 67
8.4 CRITERIOS DE INTENSIDAD 68
8.5 RESISTENCIA 69
8.6 INDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA 69
8.7 CALIFICACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD FÍSICA POR FRM 72
8.8 CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA 73
8.8.1 CONDICIÓN DEL SUELO DE FUNDACIÓN 73
8.8.2 TIPO DE CIMENTACIÓN 73
8.8.3 SISTEMA ESTRUCTURAL 73
8.8.4 CUBIERTA 73
8.8.5 DAÑO ACTUAL 74
8.9 ALGUNAS CONCLUSIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SOCIOECONÓMICA 74
8.9.1 VIVIENDA 75
8.9.2 SERVICIOS PÚBLICOS 76
8.9.3 ASPECTOS DEMOGRÁFICOS 77
8.9.4 ACTIVIDAD ECONÓMICA 77
8.9.5 LA COMUNIDAD Y LAS ENTIDADES DEL DISTRITO 77
8.9.6 PERCEPCIÓN DEL RIESGO 78

9 EVALUACION Y ANALISIS DE RIESGO POR FRM 78

10 EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE MITIGACION 79

10.1 ESTRATEGIAS GENERALES DE MITIGACIÓN 79
10.2 MÉTODO DE ANÁLISIS 81
10.2.1 PROBABILIDADES DE FALLA 81
10.2.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS 82
10.2.3 ANÁLISIS COSTO/BENEFICIO 82
10.2.4 ARBOL DE DECISIÓN 82
10.3 ZONA 1 83
10.3.1 DESLIZAMIENTO PRINCIPAL, PARTE SUPERIOR DE LA ZONA 1 83
10.3.2 DESLIZAMIENTO INFERIOR DE LA ZONA 1 85
10.3.3 SECTORES CON INESTABILIDAD ACTUAL Y POTENCIAL EN EL FLANCO DERECHO DEL DESLIZAMIENTO PRINCIPAL 86
10.3.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE LA ZONA 1 87
10.3.5 ARBOL DE DECISIÓN 91
10.3.6 RECALCE DE LA FUNDACIÓN DEL BLOQUE 16 DE LA URBANIZACIÓN ALTOS DEL SOL (PREDIO 57 DEL INVENTARIO DE VIVIENDAS DEL PRESENTE ESTUDIO). 92
10.4 ZONA 2 93
10.4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 93
10.4.2 ALTERNATIVAS DE ESTABILIZACIÓN 93
10.4.3 ARBOL DE DECISIÓN 96
10.5 ZONA 3 96
10.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 96
10.5.2 ALCANCE DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS 96
10.5.3 FACTOR DE SEGURIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA 97
10.5.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN 97
10.5.5 ARBOL DE DECISIÓN 102
10.6 ZONA 4 102
10.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 102
10.6.2 MEDIDAS CORRECTIVAS (**FIGURA 10-22 - PLANO 10-1**) 103
10.7 CONCLUSIONES 104

11 DISEÑO DETALLADO DE LAS OBRAS DE MITIGACION RECOMENDADAS 105

11.1 ZONA 1 105
11.1.1 ALTERNATIVA SELECCIONADA 105
11.1.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN PARA LA ZONA 1 106
11.1.3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO 110
11.2 ZONA 2 111
11.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA 111
11.2.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN PARA LA ZONA 2 111
11.2.3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO 114
11.3 ZONA 3 114
11.3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA 114
11.3.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS POR MITIGACIÓN 115
11.3.3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO 118
11.4 ZONA 4 118
11.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA 118
11.4.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN 119
11.4.3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO 120
11.5 TRATAMIENTO DE SITIOS ESPECÍFICOS 121

11.5.1 RECOMENDACIONES 121
11.6 CONCLUSIONES 122

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 125

TABLAS

3-1 COORDENADAS GEOGRÁFICAS

4-1 LEVANTAMIENTO DE DISCONTINUIDADES EN MACIZOS ROCOSOS

5-1 ESTACIÓN PLUVIOGRÁFICA VITELMA
5-2 INTENSIDAD DE LA LLUVIA EN EL ÁREA DE ESTUDIO
5-3 RELACIÓN LLUVIA CRÍTICA – LLUVIA ANUAL
5-4 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

6-1 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO
6-2 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS
6-3 MECANISMO DE FALLA DE TALUDES
6-4 INFORMACIÓN DE REFERENCIA PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
6-5 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS UTILIZADOS
6-6 FACTORES DE SEGURIDAD DE LAS SECCIONES ANALIZADAS
6-7 RESULTADO DE ANÁLISIS DE CAÍDA DE ROCAS CON RCOFALL
6-8 RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD A CORTO PLAZO POR DESLIZAMIENTO
6-9 PROBABILIDAD DE FALLA A CORTO PLAZO POR CAÍDA DE ROCAS

7-1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS MATERIALES
7-2 VALOR ESTIMADO DEL FACTOR DE ERODABILIDAD K
7-3 VALOR DE LONGITUD, PENDIENTE Y FACTOR LS
7-4 VALOR DE COBERTURA FACTOR C
7-5 RESULTADO DE CLASIFICACIÓN EUPS
7-6 CLASIFICACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELOS

8-1 TIPIFICACIÓN DE VIVIENDAS
8-2 CALIFICACIÓN DEL DAÑO ACTUAL
8-3 RANGO DE SOLICITACIONES E INTENSIDAD DESTRUCTIVA
8-4 MATRIZ DE DAÑO PARA CALIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

8-5 VALORACIÓN DEL INDICE DE PÉRDIDAS PARA VALORACIÓN DEL ID
8-6 VALORES DE α SEGÚN EL GRADO DE AMENAZA
8-7 VALOR CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE VULNERABILIDAD
8-8 CALIFICACIÓN DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO
8-9 VALORACIÓN DE RESPUESTAS TABLA 8-8

9-1 CALIFICACIÓN DEL RIESGO

10-1 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 1 – ZONA 1
10-2 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 2 – ZONA 1
10-3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 1 – ZONA 2
10-4 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 2 – ZONA 2
10-5 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 1 – ZONA 3
10-6 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 2 – ZONA 3
10-7 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 3 – ZONA 3
10-8 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ALTERNATIVA 4 – ZONA 3
10-9 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ZONA 4

11-1 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ZONA 1
11-2 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ZONA 2
11-3 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ZONA 3
11-4 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO ZONA 4

A7-1 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO TOTAL OBRAS DE MITIGACION DE AMENAZA POR FRM EN EL BARRIO BUENOS AIRES

FIGURAS

2-1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4-1 GEOLOGÍA REGIONAL
4-2 ZONAS DE ESTUDIO

5-1 COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN EN EL ÁREA DE ESTUDIO
5-2 CURVA IDF ESTACIÓN VITELMA
5-3 MAPA DE PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL
5-4 MAPA DE LLUVIA CRÍTICA
5-5 PERÍODO DE RETORNO LLUVIA CRÍTICA

5-6 LOCALIZACIÓN DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN
5-7 A 5-10 ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

6-1 LOCALIZACIÓN DE EXPLORACIÓN
6-2 CONVENCIONES REGISTROS DE PERFORACIÓN
6-3 A 6-7 REGISTROS DE PERFORACIÓN
6-8 A 6-12 REGISTROS DE TRINCHERAS
6-13 A 6-15 REGISTROS DE APIQUES
6-16 VARIACIÓN DEL NÚMERO DE GOLPES CON LA PROFUNDIDAD
6-17 VARIACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN CON LA PROFUNDIDAD
6-18 ENVOLVENTE DE MOHR - COULOMB
6-19 ENSAYOS DE LABORATORIO P1 Y P2
6-20 ENSAYOS DE LABORATORIO P3 Y P4
6-21 ENSAYOS DE LABORATORIO P5
6-22 VARIACIÓN DEL PESO UNITARIO CON LA PROFUNDIDAD
6-23 A 6-25 GRADACIONES
6-26 CURVA ESFUERZO - DEFORMACIÓN
6-27 ENSAYO DE CORTE DIRECTO
6-28 A 6-43 PROBABILIDAD DE FALLA A LARGO PLAZO POR DESLIZAMIENTO
6-44 PERÍODO DE RETORNO VS. FACTOR DE EROSIVIDAD
6-45 PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA ANUAL DE PÉRDIDA DE SUELOS
6-46 PROBABILIDAD DE FALLA A LARGO PLAZO POR CAÍDA DE ROCAS

7-1 ENFOQUE CONCEPTUAL DEL ESTUDIO DE RIESGOS POR FRM
7-2 PLANO DE PENDIENTES
7-3 COBERTURA
7-4 PÉRDIDA DE SUELOS

8-1 INVENTARIO DE VIVIENDAS
8-2 TIPOLOGÍA DE VIVIENDAS
8-3 A 8-13 TABULACIÓN DE ENCUESTAS
8-14 CALIFICACIÓN DE DAÑOS
8-15 VALORACIÓN DEL INDICE DE DAÑO CON CONJUNTOS DIFUSOS
8-16 CÁLCULO DE INDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA

10-1 A 10-5 ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE FRM
10-6 RELACIÓN FS VS. PF PARA TOMA DE DECISIONES
10-7 MEDIDAS DE MITIGACIÓN FLANCO DERECHO ZONA 1

10-8 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 1 – ZONA 1
10-9 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 2 – ZONA 1
10-10 ARBOL DE DECISIÓN SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE MANEJO ZONA 1
10-11 ESQUEMA DE TRATAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DEL BLOQUE 16
10-12 SELLADO DE GRIETAS
10-13 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 1 – ZONA 2
10-14 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 2 – ZONA 2
10-15 ARBOL DE DECISIÓN SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE MANEJO ZONA 2
10-16 VARIACIÓN DEL FS CON LA GEOMETRÍA DEL TALUD (PG. 312 HOEK)
10-17 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 1 – ZONA 3
10-18 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 2 – ZONA 3
10-19 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 3 – ZONA 3
10-19 A VISTA EN PLANTA ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 3 – ZONA 3
10-20 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 4 – ZONA 3
10-20 A VISTA EN PLANTA ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN 4 – ZONA 3
10-21 ARBOL DE DECISIÓN SELECCIÓN DE ALTERNATIVA DE MANEJO ZONA 3
10-22 ALTERNATIVA DE MITIGACIÓN ZONA 4

11-1 RECONFORMACIÓN ZONA 1 (SECCIÓN CENTRAL L-51)
11-2 RECONFORMACIÓN ZONA 1 (FLANCO DERECHO L40)
11-3 DESPIECE MURO DE GAVIONES EN LA BASE DE LA LADERA (ZONA 1)
11-4 DESPIECE MURO DE GAVIONES EN PARTE MEDIA DE LA LADERA (ZONA 1)
11-5 DESPIECE MURO DE GAVIONES FLANCO DERECHO (ZONA 1)
11-6 CONSTRUCCIÓN DE FILTROS
11-7 FILTRO FRANCÉS CON CUNETA
11-8 DRENES HORIZONTALES
11-9 CANALES Y CUNETAS DE CONCRETO
11-10 RECONFORMACIÓN ZONA 2 (SECCIÓN Z2 PC)
11-11 BARRERA DE PROTECCIÓN
11-12 RECONFORMACIÓN EXTREMO NORTE ZONA 3 (SECCIÓN L-32)
11-13 RECONFORMACIÓN ZONA 3 (SECCIÓN L-31)
11-13 A DETALLE DE COLOCACIÓN DE RECUBRIMIENTO CON MALLA-MORTERO
11-14 DESCOLE
11-15 RECUBRIMIENTO CON MALLA ANCLADA
11-16 RECUBRIMIENTO CON MALLA ANCLADA
11-17 PERNOS DE ANCLAJE
11-18 MANTO DE COBERTURA VEGETAL
11-19 ESTRUCTURA DE GAVIONES ZONA 4 (SECCIÓN L-1)

11-20 GEODREN PARA LA ENTRADA DEL CONJUNTO RESIDENCIAL
11-21 ESQUEMA DEL MANEJO DE RIESGOS POR DESLIZAMIENTO

PLANOS

1 TOPOGRAFÍA
2 GEOLOGÍA
3 GEOMORFOLOGÍA
4 INVENTARIO DE PROCESOS
5 SECCIONES DE ANÁLISIS
6 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA ACTUAL
7 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA A LARGO PLAZO
8 CALIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD FÍSICA
9 CALIFICACIÓN DE RIESGO ACTUAL
10-1 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN
10-2 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN
11 DISEÑO DETALLADO DE OBRAS DE MITIGACIÓN

ANEXOS

1 SOPORTE TOPOGRÁFICO (CARTERAS, CERTIFICACIÓN DE COORDENADAS)
2 FOTOGRAFÍAS AÉREAS
3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD
4 CÁLCULO DE PERMEABILIDAD
5 INVENTARIO DE VIVIENDAS
6 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CONSIDERANDO LAS OBRAS DE MITIGACIÓN
7 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO FINAL
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN

MGL

DIRECCION DE PREVENCION Y ATENCION DE EMERGENCIAS DE BOGOTA - DPAE
AREA DE ANALISIS DE RIESGOS

ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA EN EL BARRIO BUENOS AIRES, LOCALIDAD DE SAN CRISTOBAL

DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS DE CONTROL PROTECCIÓN Y ESTABILIZACIÓN

Contrato de consultoría CCS-240/2000

Informe final

1 GENERALIDADES

1.1 Alcance del estudio

En este informe se presentan los resultados del estudio de riesgos por remoción en masa y diseños detallados de las obras de control, protección y estabilización en el barrio Buenos Aires, realizado por Moya y García Ltda. para el Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá de la DPAE, dentro del Contrato de Consultoría CCS-240/2000.

El alcance general del estudio contempla la evaluación y análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa (FRM), sin considerar el efecto que pueda generar un evento sísmico en los taludes y viviendas de la zona; sin embargo, este aspecto fue considerado durante los análisis de estabilidad de taludes.

El trabajo fue adelantado de acuerdo con los lineamientos presentados en los Términos de Referencia de la invitación 1225-05-2000, y siguiendo las indicaciones dadas por el grupo de profesionales encargados de la Interventoría del proyecto, Ingenieros Alvaro J. González y Edgard R. Barbosa y el Geólogo Edgar Forero, de la firma Análisis Geotécnicos Colombianos AGC Ltda., así como las observaciones de la Ingeniera Diana Arévalo de la DPAE.

1.2 Organización del informe

El informe se encuentra organizado en 11 capítulos y 7 anexos. El contenido de cada uno de ellos se presenta desglosado en la tabla de contenido.

1.3 Descripción de las actividades realizadas

El método de trabajo adoptado para el desarrollo del estudio fue el siguiente:

- Recopilación y análisis de información de referencia tales como planos, fotografías aéreas, información hidrometeorológica y climática, geología, así como estudios agrológicos y geotécnicos existente en entidades como el IGAC, IDEAM, EAAB, IGAC, INGEOMINAS, DPAE, IGL y MGL, entre otras.

- Reconocimiento detallado de la zona por parte de un grupo de especialistas en geotecnia y geología, con amplia experiencia en el desarrollo de estudios similares. Durante este reconocimiento se adelantó la evaluación geológica del área, se identificaron los procesos de remoción de masa y se definieron los sitios para exploración del subsuelo.

- Levantamiento topográfico detallado del área de estudio a escala 1:1.000, con curvas de nivel cada 1.0 m.

- Exploración del subsuelo mediante 5 perforaciones y 5 trincheras; en estos sondeos se tomaron muestras representativas de los materiales encontrados las cuales se enviaron al laboratorio para realizar diferentes ensayos de clasificación y resistencia.

- Inventario de viviendas mediante la realización de una encuesta con la cual se evaluaron las condiciones estructurales y daño actual de las viviendas, así como las características socioeconómicas de los habitantes del sector.

- Análisis de la información recolectada en campo, con base en la cual se plantearon las diferentes alternativas para el control, protección y estabilización de la zona.

- Diseños detallados de la alternativa seleccionada.

2 DIAGNOSTICO CONCEPTUAL

2.1 Descripción del problema y sus posibles causas

El problema de riesgo en el área de estudio se relaciona con varios casos de inestabilidad activos y potenciales, que amenazan en grado diverso a un bloque de la Urbanización Altos del Sol y a las viviendas de la parte baja de la colina; dichos problemas se describen a continuación, en orden de mayor a menor importancia:

1. Deslizamiento rotacional: Se encuentra hacia el extremo noroccidental del área de estudio, cuyo movimiento ha dejado descubierta parte de la cimentación del

bloque 16 de la Urbanización, y ha causado daños en un segmento del andén perimetral de dicho bloque y en dos viviendas antiguas en mampostería con sistema estructural precario, dispuestas en la parte media del movimiento. Según los habitantes del sector, este movimiento se inició por el rompimiento de un tubo de acueducto que pasa por debajo del bloque comprometido.

2. Caída de rocas y desprendimiento de bloques: Ocurren en la parte superior del talud suroccidental de la urbanización; han causado daños locales en las viviendas situadas en la parte baja del mismo, y podrían poner en peligro las vidas de los residentes en este sitio.

3. Inestabilización potencial de los taludes de la colina debido a erosión y aporte excesivo de agua: Ocurre en el talud sur de la urbanización y puede afectar seriamente el taller de mecánica ubicado en la parte baja del mismo. Igualmente, puede inestabilizarse por estos procesos el talud del antiguo frente de explotación ubicado hacia el oriente del sitio de estudio.

Las posibles causas de estos problemas son las siguientes:

a) Deslizamiento rotacional:

- Exceso de presión de poros ocasionado por el aporte de agua al terreno, proveniente de la tubería de acueducto y alcantarillado en mal estado, y en menor grado del relleno de escombros de la parte inferior de la cantera.

- Pérdida de soporte en la pata del talud como resultado de la demolición de un muro de contención, acción adelantada por los vecinos del sector para adecuar el terreno y construir en éste un parque.

b) Caída de rocas:

- Erosión diferencial entre el estrato de lodolita de la parte inferior del talud y el nivel arenoso de la parte superior, que hace que este último pierda soporte progresivamente ocasionando la liberación y caída por gravedad de los bloques formados por las discontinuidades del macizo rocoso .

c) Inestabilidad potencial por erosión y aporte excesivo de agua:

- Deficiencias en el manejo de aguas lluvias en la parte alta de los taludes, fenómeno que produce erosión diferencial en el frente del talud y facilita el desprendimiento de bloques.

- Eventuales excavaciones en la pata del talud para la ampliación de las viviendas.

2.2 Delimitación geométrica del área de estudio

El sitio de estudio está emplazado en el extremo oriental del barrio Buenos Aires, localidad de San Cristóbal, y abarca un área de aproximadamente 3,0 Ha entre las calles 1A Sur y 5 Sur, y las carreras 1 y 3. Geométricamente, los taludes involucrados en el estudio están distribuidos en forma de herradura circundando una colina en cuya cima se encuentra la urbanización Altos del Sol (Cra 3A No. 5-00). En la **Figura 2-1** se presenta la delimitación del área de estudio.

El alcance de este trabajo involucra las viviendas de la parte baja de la ladera norte y el talud sur de la urbanización, así como el talud del frente de explotación de una antigua cantera localizado en el costado oriental de la urbanización. Adicionalmente, aunque no entran en el estudio los edificios del conjunto Altos del Sol por tratarse de una propiedad privada y además porque sus habitantes se encuentran involucrados en un proceso contra los constructores del mismo, se emitirá un concepto sobre amenaza, vulnerabilidad y riesgo del bloque 16 de la urbanización, debido a que el movimiento del sector norte está afectando los materiales de cimentación de la misma, esto sin entrar a dar recomendaciones directas sobre el tratamiento de la cimentación de la misma.

2.3 Modelos y métodos de análisis

El análisis geotécnico propuesto para el presente estudio comprende los siguientes puntos:

a) Elaboración de un modelo geológico de la zona a partir de un levantamiento geológico detallado de la misma y la disposición estructural de las unidades.

b) Estudio de la evolución de los procesos de inestabilidad, mediante comparación de fotografías aéreas y planchas del IGAC de diversas fechas y la memoria histórica de habitantes de la zona.

c) Análisis de estabilidad de taludes (determinístico, probabilístico, estático y dinámico) de todos los casos de inestabilidad detectados, incluyendo el análisis con las obras de estabilización que se recomienden.

   El análisis determinístico se ejecutará por el método de Janbu, u otro que se considere apropiado, tanto en el caso estático como en el dinámico, utilizando el programa de computador PC-Stabl. El análisis probabilístico se hará según Harr (1987), Van Marcke (1999) y otros.

d) Inventario de la cantidad exacta de viviendas en el área de estudio, estado de las mismas, características estructurales y nivel de daños, así como la determinación del número de moradores en zonas de riesgo.

e) Estimativo del costo de las casas de la zona de estudio, el cual comprende el costo de evacuación y relocalización de familias, demolición de casas, terraceo, reconformación y demás obras de estabilización necesarias.

f) Definición de criterios para zonificación por grado de amenaza y riesgo, y criterios para definir grados de vulnerabilidad en elementos expuestos.

   Las condiciones de vulnerabilidad se definirán con base en la encuesta ya realizada y los criterios que se convengan con la Coordinación de la DPAE y la Interventoría.

g) Estimativo de precipitación en la zona, posibilidad de saturación de materiales del depósito y empleo de correlaciones entre la precipitación y la generación de deslizamientos. Con estos datos y las características del terreno se diseñarán las obras de drenaje para estabilización.

h) Diseño detallado de obras correctivas, su localización, dimensiones, magnitud y costos; se prepararán las especificaciones de construcción,

i) Análisis beneficio/costo de alternativas de mitigación.

2.4 Evaluación conceptual de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo del área de estudio

Para la evaluación de riesgos por fenómenos de remoción en masa (FRM) se seguirán en líneas generales los procedimientos para este tipo de estudios establecida por MGL e IGL a partir de la experiencia en estudios de estabilidad de taludes y de riesgo por FRM en estudios de sectores como Zarazota, Providencia Alta, Playón – Playitas, La Carbonera y Callejón de Santa Bárbara, con los cuales encontramos varias similitudes en el caso del barrio Buenos Aires, y adoptando criterios de García (1998), González (1990), Cantillo (1998) y Millán (1998), avalados en estudios anteriores para la DPAE.

Para la evaluación de riesgos se contemplan las siguientes etapas básicas: definición del estudio, evaluación de amenazas, evaluación de vulnerabilidad, evaluación de riesgo, análisis de sensibilidad y recomendaciones.

2.4.1 Amenaza

Se seguirán en líneas generales los métodos propuestos por Cantillo, Carlos (1998) “Propuesta Metodológica para la Evaluación de Riesgos por Movimientos en Masa a Escala Local”. Trabajo final de la especialización en Evaluación de Riesgos y Prevención de Desastres, Universidad de Los Andes, Bogotá. con criterios y conceptos enunciados por Millán, Javier (1998) "Lineamientos Metodológicos para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa", Proyecto de Grado para optar al título de Magister en Geotecnia, Facultad

de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Se considerarán los siguientes factores para la evaluación de la amenaza: topografía; tipo de materiales; procesos degradacionales existentes y las solicitaciones que generan o imponen; susceptibilidad a la erosión; precipitación; sismicidad y actividad antrópica.

2.4.2 Vulnerabilidad

Se aplicará el método propuesto por Soler et al (1999) junto con los lineamientos dados por Leone (1996), teniendo en cuenta las observaciones y recomendaciones que han planteado los Ings. Edgar Barbosa y Nancy Alfonso, de Geourbana Ltda., interventores del proyecto de zonificación de riesgos por FRM en el barrio La Paz, sector Los Naranjos, adelantado por IGL para la DPAE; igualmente se contemplarán observaciones realizadas durante la ejecución del mismo trabajo por la geóloga Doris Suaza. La vulnerabilidad física de las viviendas será evaluada a partir del inventario y tipificación de ésta mediante la realización de la encuesta ya mencionada, a partir de la cual se evaluarán las condiciones estructurales de las mismas de acuerdo con el grado de resistencia que deban oponer al fenómeno o solicitación que las afecte. Adicionalmente se buscará la manera de involucrar la evaluación de los aspectos de vulnerabildad social, económica y cultural, siguiendo conceptos planteados por Wilches-Chaux, G. (1990).

2.4.3 Riesgo

A partir de los mapas temáticos de amenaza y vulnerabilidad se evaluará el riesgo empleando como herramienta el sistema de información geográfica SPANS. Conceptualmente las zonas de riesgo bajo, medio y alto se asocian a las zonas correspondientes ya definidas de amenaza, considerando que la vulnerabilidad puede ser mayor en la parte sur y sureste de la zona en estudio.

2.5 Alternativas de solución

Las soluciones para el presente caso pueden referirse a lo siguiente:

- Reconformación y estabilización de la zona de deslizamiento mediante terraceo, drenaje, contención y revegetalización.

- Protección del talud rocoso contra la erosión mediante revestimiento de concreto o construcción de un muro contra impacto en la parte baja del talud.

- Relocalización de las familias que habitan edificaciones en condición muy crítica, demolición de éstas y recuperación geotécnica y ambiental de los lotes o rellenos que ocupaban.

- Drenaje superficial interceptor y de captación por medio de canales, zanjas y cunetas revestidas con concreto, especialmente en la parte alta de los taludes.

- Drenaje subsuperficial con filtros y drenes horizontales.

- Recomendaciones generales para el diseño del recalce o reforzamiento de la cimentación del bloque 16 de la urbanización Altos del Sol.

3 TOPOGRAFIA

La base topográfica utilizada para este estudio fue levantada directamente en campo durante los días 6 al 9 de septiembre de 2000.

3.1 Método de trabajo

Se realizaron las mediciones topográficas por medio de una poligonal con observaciones recíprocas y cierre antes del ajuste angular igual o mayor de 1:5.000, tomando como apoyos para la partida los puntos materializados en el área. Los detalles (cercas, escarpes, edificaciones y vías, entre otros), fueron tomados por radiación. Las carteras del levantamiento topográfico se presentan en el **Anexo 1** – Soporte topográfico.

Se orientó el levantamiento topográfico a producir un plano a escala 1:1.000, (de acuerdo con los alcances de los Términos de Referencia), pero debido a la poca extensión del área de estudio (3.0 Ha aproximadamente), se decidió, en conjunto con la DPAE y la Interventoría, presentar los diferentes planos en escala 1:500. El plano topográfico, que servirá de base para el desarrollo del estudio, corresponde al **Plano 1**.

3.2 Materialización de mojones de referencia

Se materializaron tres (3) puntos de apoyo: uno junto al Bloque 16 del conjunto residencial Altos del Sol (SOL-1), otro en el parque infantil de la misma urbanización (SOL-2) y el último en la intersección de la Carrera 2 A y la Calle 1 A Sur (SOL-3); éste se dejó como una incrustación horizontal.

Estos puntos, materializados con mojones de 0.25 x 0.25 m de lado y 0.6 m de profundidad y con una marca central de disco estándar en bronce en el cual se estampó la nomenclatura correspondiente, fueron ubicados en sitios estables, perdurables, de fácil acceso y excelente visibilidad, y sirvieron de apoyo para la apertura y cierre de la poligonal. Igualmente podrán ser utilizados para la referenciación y localización de las obras que se construyan para la estabilización del sector.

3.3 Determinación de coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas para los puntos de apoyo fueron obtenidas por el método de poligonal con precisión igual o mayor de 1:10.000, la cual tuvo como puntos de partida los vértices de la Red Geodésica Distrital establecida por el IGAC en 1986 y redeterminados en el sistema WGS-84 en 1996.

En la **Tabla 3-1** se presentan las coordenadas del vértice CD-557-A, utilizado para determinar las coordenadas del sitio de estudio, y las coordenadas de los mojones de referencia y de los demás deltas del levantamiento.

Tabla 3-1 Coordenadas geográficas

CD-557-A (Coordenadas geodésicas)			
PUNTO	**LATITUD**	**LONGITUD**	**ALTITUD**
DATUM WGS84	04° 34’ 57,858” N	74° 04’ 38,822” E	2.808,235

CD-557-A (Coordenadas planas)			
PUNTO	**NORTE**	**ESTE**	**ALTITUD**
DATUM WGS84	98.192,827	100.388,923	2.808,235

PUNTOS MATERIALIZADOS PARA APOYO TOPOGRAFICO			
PUNTO	**NORTE**	**ESTE**	**ALTITUD**
SOL - 1	98.334,510	99.793,094	2.675,129
SOL - 2	98.316,715	99.742,100	2.666,283
SOL - 3	98.386,318	99.757,467	2.651,741

POLIGONAL 1			
PUNTO	**LATITUD**	**LONGITUD**	**ALTITUD**
D – 1	98.298,730	99.818,248	2.682,861
D – 2	98.263,697	99.881,893	2.677,940
D – 3	98.212,754	99.798,693	2.669,065
D – 4	98.187,338	99.703,568	2.651,968
D – 5	98.180,855	99.662,990	2.648,265
D – 6	98.259,633	99.654,096	2.652,616
AUX – 1	98.316,174	99.704,644	2.655,209
SOL – 1	98.334,510	99.793,094	2.675,129
SOL – 2	98.316,715	99.742,100	2.666,283

POLIGONAL 2			
PUNTO	**LATITUD**	**LONGITUD**	**ALTITUD**
D – 1	98.298,730	99.818,248	2.682,861

POLIGONAL 2			
PUNTO	**LATITUD**	**LONGITUD**	**ALTITUD**
D – 2	98.263,697	99.881,893	2.677,940
D – 3	98.212,754	99.798,693	2.669,065
D – 4	98.187,338	99.703,568	2.651,968
AUX – 2	98.203,410	99.823,598	2.660,966
AUX – 3	98.173,272	99.810,657	2.655,999
AUX – 4	98.121,901	99.758,329	2.649,984

Al final del **Anexo 1** se presenta la certificación de las coordenadas geodésicas preliminares y planas cartesianas del vértice utilizado para la determinación de las coordenadas geográficas de todos los puntos del levantamiento topográfico.

3.4 Cálculo y dibujo

El procesamiento de la información obtenida durante el levantamiento y los cálculos del mismo fueron realizados con ayuda del programa POLTOP–1, verificando los resultados con la información de las carteras de campo. La salida gráfica de la información se realizó con los programas AutoCAD e Eagle Point, versión 14.

4 GEOLOGIA

4.1 Método de trabajo

Para el desarrollo del estudio geológico se realizaron dos visitas de campo a la zona, durante las cuales se elaboró la cartografía geológica y el inventario de procesos. En la oficina se interpretaron fotografías aéreas del IGAC de los años 1956, 1984 y 1990 (presentadas en el **Anexo 2**), para conocer la evolución geomorfológica del área; adicionalmente se consultó el plano geológico del Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Santafé de Bogotá (Ingeominas, 1997). Con base en la información consultada y las observaciones de campo se elaboraron los **Planos 2 –** Geología, **3 –** Geomorfología y **4 –** Inventario de procesos.

4.2 Geología del área

4.2.1 Geología regional

El área de estudio se encuentra sobre las estribaciones occidentales o parte baja de los cerros que bordean la parte oriental de la Ciudad de Santafé de Bogotá. Estos cerros conforman el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá, principal estructura del área, la cual tiene un rumbo general NNE. Las unidades que

constituyen este flanco son las Formaciones Arenita Dura y Plaeners del Grupo Guadalupe, de edad Cretácica, y las Formaciones Terciarias Guaduas, Cacho y Bogotá; sobre esta última se encuentra el Barrio Buenos Aires.

El Anticlinal de Bogotá a lo largo de su rumbo, presenta variación en el sentido de su buzamiento sobre el flanco occidental; en ocasiones es hacia el occidente (posición normal) y en otras es hacia el oriente (posición invertida). Específicamente en el sector comprendido entre el río San Cristóbal y el río San Francisco, las unidades se encuentran en posición normal, con rumbo general noreste y buzamiento hacia el noroeste.

Desde el punto de vista estructural, además del anticlinal se encuentra la falla inversa de Bogotá que se dispone paralela al eje del pliegue y pone en contacto la Formación Plaeners con la Formación Guaduas. El trazo de esta falla se encuentra a 2 km aproximadamente hacia el oriente del Barrio Buenos Aires. Adicionalmente, se aprecian lineamientos de falla que se disponen diagonales al rumbo de las estructuras y posiblemente con alguna componente de movimiento lateral derecho; dentro de estas fallas se encuentran el lineamiento del río San Cristóbal con rumbo NW y el del Río San Francisco con orientación este-oeste (**Figura 4-1**).

La figura de geología regional del presente informe fue tomada del mapa geológico elaborado por el Ingeominas (1988) para el estudio de Zonificación Geotécnica de Santafé de Bogotá y no presenta diferencias importantes (para el sector de estudio) con el plano geológico del "Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inestabilidad del terreno para varias localidades de Santafé de Bogotá" elaborado por Ingeocim Ltda. (1998) para la UPES.

4.2.2 Geología local

El área de estudio se encuentra en su totalidad sobre la Formación Bogotá (**Plano 2**); sin embargo, por las características del estudio y para facilitar la descripción geológica de las diferentes unidades de roca y de los Depósitos Cuaternarios presentes en la zona, se dividió el Barrio Buenos Aires en cuatro zonas, como se indica en la **Figura 4-2.**

Zona 1 Se localiza hacia la parte norte, sobre la ladera limitada entre los bloques 13 a 16 de la Urbanización Altos del Sol y la Carrera 2 A.

Zona 2 Comprende un antiguo frente de explotación, localizado sobre el costado occidental del conjunto Altos del Sol, y un relleno extenso que abarca desde la calle 5 Sur hasta la Calle 1 Sur.

Zona 3 Corresponde a la parte posterior o costado sur de la urbanización Altos del Sol. Esta zona está delimitada por la Calle 5 sur y la malla de cerramiento de la urbanización.

Zona 4 Esta zona se localiza al occidente de la Zona 3, y abarca desde la malla de cerramiento de la urbanización hasta la carrera 3 sur.

En la Zona 1 la principal unidad la constituye los rellenos antrópicos de ladera (Qral), conformados por fragmentos de ladrillo y material sobrante de construcciones antiguas, en matriz arcillo-limosa de color café. Esta unidad se encuentra cubierta en gran parte por pastos y sobre ella se han presentado en el pasado deslizamientos de tipo superficial (Qd). En la parte baja de la Zona 4, también se aprecia una exposición importante de Qral, de composición similar al depósito de la Zona 1.

Como complemento a la descripción dada sobre los depósitos Cuaternarios, se pueden apreciar las fotografías y el texto de los registros estratigráficos de las trincheras, sondeos y apiques, realizados dentro del programa de exploración del subsuelo (numerales 6.1 y 6.1.1 del presente informe).

4.2.2.1. Formación Bogotá

En los taludes dejados por la explotación de materiales de las zonas 2 y 3, se puede apreciar la secuencia de intercalaciones de arenitas y lodolitas que conforman la Formación Bogotá. Las arenitas (Tpbs) son de grano fino a medio, con cuarzo, líticos y matriz arcillosa, friables, de color gris - café, bien seleccionadas, macizas; se clasifican como sublitoarenitas. Las lodolitas (Tpbl) son de color gris, y rojizo por meteorización, macizas y se encuentran fracturadas y meteorizadas por efecto del intemperismo.

A partir de las observaciones de campo, se definió que los espesores de las capas de lodolitas varían entre 3.0 y 5.5 m, mientras que las arenitas generalmente presentan espesores de 2.0 m y en ocasiones alcanzan hasta los 5.0 m; esta variación en el espesor de los estratos está asociada con las condiciones de depósito. La descripción anterior de la Formación Bogotá, corresponde al conjunto inferior de la Unidad definido por Ulloa y Acosta (1987), el cual fue depositado en un ambiente fluvial meandriforme.

4.2.2.2. Cuaternario

A continuación se hace la descripción de las diferentes unidades que conforman el Cuaternario en la zona de estudio; se definieron seis unidades debido a la gran importancia que tiene el Cuaternario en el estudio de estabilidad de taludes y como evidencia de los diferentes procesos denudativos que han afectado el paisaje.

- Suelos Residuales

El desarrollo de suelos orgánicos o residuales es escaso debido precisamente a la gran actividad minera que se efectuó en el pasado en esta Zona; sin embargo se observan algunas exposiciones de suelo residual predominantemente de composición arcillosa (Qsra) hacia la parte media de la ladera de la Zona 3, su espesor es variable pero en general no supera el metro (1.0m).

- Depósitos

Como evidencia de las caídas de roca en el pasado, se encuentran los depósitos "de base" (Qdb), denominados informalmente de esta manera para efectos del presente estudio. Los depósitos se encuentran a manera de montículos, acumulados hacia la pata de los taludes de la Zona 3 y están conformados por fragmentos de arenita, mezclados con material de desecho de construcciones, Estos depósitos son estables y actualmente se encuentran cubiertos en su mayoría por pastos.

Dentro de este grupo también se encuentran los deslizamientos rotacionales que se aprecian en la parte alta y baja de la Zona 2. Estos depósitos corresponden a movimientos de remoción en masa sobre material de relleno.

- Rellenos Antrópicos

Los depósitos Cuaternarios están representados principalmente por rellenos antrópicos tanto antiguos (Qraa) como recientes (Qrar). Los primeros se encuentran sobre la parte noroccidental, en el límite entre las Zonas 1 y 2, y fueron realizados para reconformar los antiguos frentes de explotación de materiales; están representados por fragmentos de ladrillos y bloque, en matriz limosa de color café; actualmente se encuentran cubiertos por pastos. Los segundos se encuentran en el botadero de desechos de construcción y escombros que comprende la mayor parte plana de la Zona 2; su composición es bastante heterogénea ya que se observan restos de pavimento, ladrillo, recebo, basuras, etc.

4.2.3 Geología Estructural

Desde el punto de vista de Geología Estructural, a partir de la interpretación de las fotografías aéreas y del reconocimiento detallado de los afloramientos de las Zonas 2 y 3, se infiere que el barrio Buenos Aires se encuentra sobre una estructura monoclinal, ya que no se aprecian pliegues importantes. En general, las capas tienen un rumbo promedio N10°W a N30°W y buzan de 10° a 25° hacia el suroeste (**Plano 2**). Al parecer hay un cambio local en el rumbo de los estratos, ya que en los pocos afloramientos existentes en la Zona 1, se registraron valores de N28°E/27°NW; sin embargo, estos datos no son confiables ya que pueden

corresponder a dislocaciones o movimientos locales sobre los antiguos taludes de corte. Desafortunadamente, la poca exposición de la roca en esta zona no permite definir si realmente se trata de un cambio en la orientación de las capas.

Las arenitas están afectadas principalmente por dos familias de diaclasas con orientación general N55°E y N50°W, y buzamiento 82°SE y 80°NE, respectivamente. Los planos de diaclasa presentan un espaciamiento ancho, entre 0.6 y 2.0 m, persistencia o continuidad baja que varía entre 1.0 y 3.0 m, la apertura entre las juntas es moderadamente abierta, entre 0.5 y 2.5 mm, y su superficie es ligeramente rugosa (**Tabla 4-1**). Estos planos de discontinuidad no forman bloques cinemáticamente inestables debido al bajo ángulo de buzamiento de los estratos; la caída de material de tamaño promedio entre 0.6 y 1.0 m de diámetro, está asociada con la pérdida de soporte de las capas de arenita debido a los procesos de meteorización y erosión del nivel lodolítico subyacente.

En el **Plano 2 –** Geología**,** se encuentran las diferentes estaciones realizadas durante el reconocimiento geológico y las representaciones estereográficas para los taludes de las zonas 2 y 3 en donde se presenta la caída de rocas; en ellos se aprecia que no hay posibilidad cinemática de movimiento en cuña o falla planar, asociada con el fenómeno de inestabilidad. En la estación 1, la estratificación y una familia de diaclasas forman cuña, pero con un plano de intersección con buzamiento bajo (17°) e inferior al ángulo de fricción de las arenitas (de 22° a 26°), lo que restringe su posibilidad de movimiento.

Es importante anotar dentro del capítulo de geología, que en las Zonas 2 y 3, donde mejor está expuesta la roca, la erosión diferencial ha dejado las capas de arenita en voladizo debido a la alta susceptibilidad de las capas lodolíticas a los procesos denudativos, lo que ha generado problemas serios de inestabilidad por la caída de bloques de arenita ante la pérdida del material de soporte, y la presencia de diaclasas con valores altos de buzamiento. Este fenómeno de remoción en masa es común en los antiguos cortes de explotación de materiales, con el agravante de que en la pata de los taludes se encuentran las viviendas del Barrio Buenos Aires.

4.3 Geomorfología

Adicional a la geología y a los procesos denudativos imperantes en el pasado geológico reciente, la disposición actual de las formas del terreno es el resultado de una intensa actividad antrópica, centrada en la explotación artesanal de materiales para la fabricación de ladrillo (zona de chircales) y la posterior reconformación del terreno mediante rellenos para la construcción de viviendas.

A continuación se describen las principales unidades geomorfológicas presentadas en el **Plano 3**, tomando como base de clasificación su origen (natural o antrópico), los procesos erosivos, la pendiente del terreno, los fenómenos de remoción en masa y la geología de la zona. Debido a la gran relación que existe

entre la geomorfología y el mapa de inventario de procesos, se definió únicamente una sola nomenclatura para los dos planos.

- Unidad de rellenos antrópicos (Ra). Se encuentra cubriendo la paleotopografía de antiguos frentes de explotación de materiales para la fabricación de ladrillo. Presenta susceptibilidad a los fenómenos de remoción en masa debido a su origen, su localización sobre media ladera y la presencia ocasional de zonas húmedas.

- Deslizamientos antiguos (Da). Movimientos antiguos sucedidos en material de relleno; generalmente se trata de deslizamientos de poca magnitud.

- Deslizamientos activos (Dac). Movimientos de poco espesor ocurridos en laderas conformadas por rellenos. Es importante la presencia de agua en algunos sectores. Las tres unidades anteriores se encuentran en las Zonas 1 y 4.

- Talud de corte con caída de rocas (Cr). Representada por la caída de bloques de arenita diaclasada, de tamaño variable entre 0.4 y 1.0 m. Su origen está asociado con la meteorización diferencial del material de soporte (nivel lodolítico) y son frecuentes sobre taludes de corte de alta pendiente y altura promedio de 4.0 m. Presenta erosión en surcos y cárcavas incipientes debido a la falta de cobertura vegetal sobre los taludes.

- Talus (T). Se trata de bloques de arenita y fragmentos de arcillolita acumulados sobre la pata de los taludes, producto de la caída de rocas generada por la pérdida del material que sirve de soporte a las capas de arenitas.

- Unidad de erosión laminar (Zel). Erosión laminar y surcos de erosión incipiente sobre terrenos de baja pendiente, conformados por suelo residual o rellenos antrópicos. En el relleno del costado norte se puede presentar infiltración.

- Unidad de erosión en surcos (Zes). Erosión en surcos sobre laderas de pendiente moderada, conformadas por intercalaciones de arenitas y arcillolitas meteorizadas. Las cuatro unidades anteriores predominan en las Zonas 2 y 3.

- Sector inundable (Zi). Estas áreas pueden verse afectadas principalmente en épocas de invierno prolongado o durante lluvias ocasionales de alta intensidad o duración.

- Unidad estable (Ze). Presenta pendiente suave a moderada, constituida por arenitas y arcillolitas o rellenos antiguos, cubiertos generalmente por pastos.

4.4 Modelo hidrogeológico local

Basados en el modelo geológico del área de estudio, se puede inferir que las aguas lluvias tienen la posibilidad de infiltrarse a través de los diferentes rellenos que se encuentran localizados principalmente en las Zonas 1 y 2. En la Zona 1, la pendiente general del terreno y la presencia de relleno sueltos o de baja densidad sobre roca predominantemente lodolítica de baja permeabilidad, favorecen la acumulación de agua a lo largo del contacto depósito-roca. Adicionalmente, en esta zona hay un aporte de aguas servidas, proveniente probablemente del conjunto Altos del Sol, ya que en la perforación P5 a 2.5 m de profundidad se reportaron malos olores en una capa de limo café; además, los moradores de la vivienda ubicada hacia la pata del deslizamiento de la parte alta de la Zona 1, comentaron durante el reconocimiento de campo que es frecuente la presencia de agua de mal olor proveniente de la ladera de la parte posterior de la casa.

El aporte de agua que se infiltra a través del extenso relleno de la Zona 2 hacia la Zona 1 es bajo, ya que infrayaciendo el relleno antrópico, predominan las rocas lodolíticas con espesores mínimos de 3.5 m (de acuerdo con la información obtenida a partir de las perforaciones P3 y P4). Estas rocas presentan baja permeabilidad y no hay indicios de niveles superiores o superficiales de arenitas que favorezcan el flujo de agua, lo que hace más difícil la infiltración desde este sector hacia la Zona 1. Adicional a lo anterior, el nivel del agua en la perforación 3 (1.85m) se encuentra más bajo con respecto a la perforación 4 (1.30m); ambos niveles fueron medidos 8 días después de realizados los sondeos y disminuyen la posibilidad de aporte de agua del relleno hacia el sector inestable de la Zona 1.

Debido a la disposición estructural de la roca con buzamiento hacia el suroeste, existe la posibilidad de infiltración de aguas lluvias hacia las zonas 1 y 4, a través de las capas gruesas de sublitoarenita que afloran en los taludes de las zonas 2 y 3. Adicionalmente se puede presentar infiltración de agua a través de las fracturas que están afectando a las sublitoarenitas, es decir, hay una permeabilidad secundaria importante (por lo menos a nivel de afloramiento) en estos estratos que favorece el flujo de agua y posiblemente tiene mayor relevancia que la permeabilidad primaria, la cual puede verse reducida por la presencia de matriz arcillosa en estas rocas.

5 HIDROLOGIA

5.1 Objetivos

Los principales objetivos del estudio de hidrológico son los siguientes:

- Caracterizar el área de estudio desde el punto de vista hidrológico, incluyendo la determinación de la precipitación crítica para diferentes periodos de retorno.

- Relacionar las propiedades hidrológicas con la posibilidad de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

5.2 Análisis de información disponible

Para la elaboración del estudio, se consultó la siguiente información básica:

5.2.1 Información topográfica

Se contó con la siguiente información topográfica:

- Levantamiento topográfico del área de estudio a escala 1:500.
- Cartografía general del IGAC a escala 1:50.000 y 1:30.000.

5.2.2 Información hidroclimática:

- "Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá", realizado para la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, por IRH Ltda. en noviembre de 1995.

- "Zonificación de riesgos por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la ciudad de Santa Fe de Bogotá", realizada para la UPES por Ingeocim Ltda (1998).

- Información pluviográfica obtenida a partir de los registros de la estación Vitelma, caracterizada en la **Tabla 5-1**:

Tabla 5-1 Estación pluviográfica Vitelma

CÓDIGO	ESTACION	OPERADA POR	TIPO	ELEVACION (msnm)	COORDENADAS		PERIODO DE REGISTRO
					Norte	Este	
2120524	Vitelma	EAAB	PG*	2.800	997.540	1.000.600	1941 – 2000

*PG Estación Pluviográfica, según la clasificación del IDEAM.

Cabe anotar que la cercanía de la estación Vitelma al área de estudio justifica su utilización como única fuente de información para el análisis de precipitación.

5.3 Caracterización hidrológica de la zona

El Barrio Buenos Aires se encuentra dentro de la cuenca del río San Cristóbal, hacia el cual drena topográficamente. Localmente, la zona de interés no se encuentra bajo la influencia o acción de quebradas ni zanjones.

Aunque el área de estudio tiene forma de “herradura”, para el estudio hidrológico se tomaron en cuenta principalmente las zonas norte (Zona 1 del estudio

geológico) y sur (Zonas 3 y 4 de la geología), las cuales drenan en direcciones opuestas: la zona norte drena hacia la Carrera 2 A, y la sur hacia la Calle 5 Sur y la Carrera 3. En la zona norte la longitud media de drenaje (análoga a la longitud del cauce) es de aproximadamente 70 m, y la diferencia entre cotas para ésa longitud es de 22 m, mientras que para la zona sur, la longitud media es de aproximadamente 170 m y la diferencia en elevación de 25 m. La zona intermedia del área de estudio (correspondiente a la Zona 2 en el estudio geológico) no fue tenida en cuenta en este numeral, debido a su topografía plana, a la poca influencia de la misma sobre el aporte de agua a los depósitos de la zona norte (según el modelo hidrogeológico descrito en el numeral 4.4 del presente informe), y porque esta zona no presenta una condición actual de riesgo sobre las viviendas del sector.

A pesar de que el sistema de alcantarillado de la zona se encarga de recibir y conducir las aguas lluvias y aguas servidas del área, la escasez de obras de drenaje superficial, especialmente en la zona que circunda el cerramiento de la urbanización Altos del Sol, provoca durante la ocurrencia de lluvias fuertes una escorrentía intensa con el consecuente arrastre de material suelto, causando la pérdida de materiales finos, el desprendimiento de bloques, la inundación de viviendas y lotes baldíos, y la acumulación de sedimentos. Durante la exploración del subsuelo y el reconocimiento de campo pudo establecerse la salida de aguas servidas hacia el extremo suroccidental de la Urbanización Altos del Sol, en el talud posterior del taller de mecánica del Sr. Nicolás Tavera (predio 1 del inventario de viviendas); esta fuga de aguas servidas también fue detectada en las perforaciones P1 y P2 al percibir malos olores durante su realización.

Debe destacarse también el rompimiento de un tubo de agua potable bajo el Bloque 16 de la urbanización ocurrido hacia finales de 1998 o los primeros días de 1999, emergencia que fue atendida por la EAAB, pero aproximadamente 20 días después de la rotura del tubo se produjo un asentamiento en la base del mismo edificio. El Consultor considera que este colapso del terreno pudo fisurar o desencajar la tubería de drenaje de aguas servidas y generar la infiltración descrita antes. Según la propietaria del apartamento 101 de este bloque, quien tuvo la precaución cubrir con plástico el espacio entre la cimentación del edificio y el terreno para evitar la infiltración de agua lluvia, el terreno no ha presentado movimiento desde este día.

5.4 Comportamiento de la precipitación en el área de estudio

5.4.1 Precipitación total anual

En la **Figura 5-1 A** se presenta la precipitación total anual durante en el periodo 1941-2000. El valor anual promedio pudo establecerse en 1.000 mm, con ciclos de aumento y decrecimiento de la precipitación que oscilan entre 1.403 mm (valor registrado durante en 1999) y 481 mm (registrado en 1964).

5.4.2 Precipitación media mensual multianual

La **Figura 5-1 B** ilustra la precipitación media mensual multianual, e incluye igualmente los valores máximos y mínimos mensuales en la estación Vitelma. En esta gráfica puede establecerse un comportamiento bimodal de las lluvias, con periodos de mayor precipitación entre los meses de marzo y mayo (entre 45 y 74 mm/mes), y entre octubre y diciembre (de 66 a 78 mm/mes). La precipitación media mensual multianual es de 84 mm.

5.4.3 Precipitación máxima en 24 horas

Los mayores valores de precipitación máxima en 24 horas se han registrado, como era de esperarse, en los meses de mayo (74 mm) y octubre (78 mm). En la **Figura 5-1 C** se indican los valores máximos de precipitación en 24 horas registrados en la estación Vitelma.

5.5 Intensidades máximas de lluvias esperadas

5.5.1 Cálculo del tiempo de concentración

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la fórmula de Kirpich:

$$Tc = \left(11.9 \frac{L^3}{h} \right)^{0.385}$$

donde:

Tc = Tiempo de concentración en horas.
L = Longitud del cauce en millas.
h = Diferencia de elevación (pies) entre los límites superior e inferior del área de drenaje.

En este caso se determinó el tiempo de concentración para cada zona de estudio:

- Zona norte:

Diferencia de elevación, h= 22 m (72 pies)
Longitud, L= 70 m (0.05 millas)

$$Tc = \left(11.9 \frac{0.05^3}{72} \right)^{0.385}$$

Tc = 0.016 h = 1 min

- Zona sur:

Diferencia de elevación, h= 25 m (82 pies)
Longitud, L= 170 m (0.11 millas)

$$Tc = \left(11.9 \frac{0.11^3}{82} \right)^{0.385}$$

Tc = 0.037 h = 2.2 min

5.5.2 Curva Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF)

En la **Figura 5-2** se presenta la curva IDF propuesta en el "Estudio para el Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá" para la estación Vitelma.

5.5.3 Intensidades de lluvia para diferentes períodos de retorno

El tiempo de concentración representa el tiempo que debe transcurrir desde el comienzo de una lluvia determinada, para que toda el área de drenaje aporte escorrentía en una sección específica, es decir, para que se produzca la máxima escorrentía superficial. De acuerdo con lo anterior, la intensidad de la lluvia crítica para un período de retorno dado, es aquella de duración igual o mayor al tiempo de concentración del área de drenaje en consideración.

Se debe tener en cuenta que las zonas de drenaje en el área de estudio poseen áreas bastante pequeñas, que constituirían tan solo un porcentaje de la microcuenca real. Como consecuencia de lo anterior se tienen tiempos de concentración bastante bajos, los cuales deben ser extrapolados en la curva IDF.

Las intensidades obtenidas para las dos zonas, con base en sus respectivos tiempos de concentración se presentan en la **Tabla 5-2**.

Tabla 5-2 Intensidad de lluvia en el área de estudio

Tr (años)	I (mm/hora) Zona Norte	I (mm/hora) Zona Sur
3	82	84
5	92	95
10	105	108
25	124	128

Tr (años)	I (mm/hora) Zona Norte	I (mm/hora) Zona Sur
50	136	138
100	154	156

5.5.4 Lluvias críticas para diferentes períodos de retorno

Para calcular la relación existente entre la precipitación media anual y la lluvia crítica – duración, se acudió a los estudios "Relaciones de precipitación crítica – duración que disparan movimientos en masa en Santafé de Bogotá", presentado por A. González, E. Zamudio y R. Castellanos en el XI CPMSIF en Fox de Iguazú, Brasil (1999), y en el "Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por inestabilidad del terreno para varias localidades de Santafé de Bogotá", realizado por Ingeocim Ltda. para la UPES en 1998. En este último estudio se encontró que, con base en la relación entre la lluvia crítica y la duración, la ciudad de Bogotá puede dividirse en dos subzonas; las ecuaciones para calcular la lluvia crítica y su duración en cada subzona se presentan en la **Tabla 5-3**:

Tabla 5-3 Relación entre la lluvia crítica y la lluvia anual para Santa Fe de Bogotá (Ingeocim 1998)

Zona	Lluvia crítica (mm)	Duración (días)
Suroccidental	0.3609 x Lluvia anual	3.2829 x Lluvia crítica $^{0.4157}$
Cerros orientales	12.6325 + 0.1814 x Lluvia anual	0.04923 x Lluvia crítica

La representación gráfica de las ecuaciones correspondientes a la zona de los cerros orientales, en la cual se emplaza el área de estudio (barrio Buenos Aires), se muestra en las **Figuras 5-3** a **5-5**. En dichas figuras, el área de estudio tiene un valor promedio de precipitación media anual de 1.100 a 1.150 mm y una lluvia crítica que varía entre 180 y 190 mm, con un período de retorno de ésta que varía entre 30 y 35 años.

Reemplazando en las ecuaciones de la **Tabla 5-3** el valor de lluvia anual (1.000 mm), se obtiene una lluvia crítica para el sitio de estudio de 194 mm, y una duración de 9,55 días.

5.6 Infiltración

La infiltración es un fenómeno complejo que depende en gran medida de las características físicas del suelo o materiales que conforman la superficie del área de estudio. Así, en suelos o materiales arenosos se percibe mayor velocidad de infiltración que en los arcillosos y cuando la estructura es laminar o masiva la

infiltración tiende a ser menor que cuando se presentan estructuras granulares y blocosas.

Para determinar el nivel de infiltración en diferentes zonas del área de estudio se realizaron cuatro ensayos, cuya ubicación se presenta en la **Figura 5-6** y la descripción de los mismos en la **Tabla 5-4**.

Tabla 5-4 Ensayos de Infiltración.

DESCRIPCION	ENSAYO			
	1	2	3	4
Localización	Costado Norte del lote 51, cota 2660. (Zona 1)	Costado norte del bloque 16, cota 2675 (Zona 1)	Aledaño al muro que sirve de límite para el relleno de la " laguna", sobre la cota 2675. (Zona 2)	Parte superior del escarpe del costado sur del conjunto residencial, frente al lote 25. (Zona 3)
Suelos	Material de relleno, con agregados de diverso tamaño en una matriz de textura limosa, con cobertura vegetal de pasto denso.	Relleno parcialmente compactado, con agregados de diverso diámetro en una matriz arcillo limosa, cubierto por un césped denso.	Relleno compuesto por materiales de diversa clase como recebo, escombros, rocas y residuos arcillosos, sin compactar adecuadamente.	Afloramiento rocoso, capa superficial muy delgada; afectados por algún grado de erosión.
Valor de Infiltración, cm/h	11,0 cm/h	1,2 cm/h	0,65 cm/h	1.8 cm/h
Apreciación	Moderadamente rápida	Moderadamente lenta	Moderadamente lenta	Moderada

En el área de estudio se encuentran con mucha frecuencia depósitos de materiales transportados con el fin de rellenar las áreas bajas dejadas por la explotación artesanal para la industria ladrillera. Por esta razón, los materiales del subsuelo son heterogéneos en cuanto a tamaño, textura, consistencia y no forman un suelo propiamente dicho.

Lo anterior se refleja en las gráficas de infiltración (**Figuras 5-7** a **5-10**), calculadas a partir de los datos tomados en campo, resultando curvas con inflexiones y cambios bruscos en la infiltración instantánea, según sea el material al cual llegue el frente de agua.

El relleno localizado en la parte occidental del conjunto residencial Altos del Sol presenta un comportamiento muy diferente, con una infiltración básica moderadamente rápida, debido al bajo grado de compactación de los materiales que lo conforman y a la pendiente pronunciada que en ocasiones se puede considerar como escarpada. En este sector un gran porcentaje del agua se infiltra y la escorrentía es baja por la densa capa de pasto que cubre la superficie (ensayo 1).

En la zona plana se tiene una infiltración moderadamente lenta, independiente de la cobertura vegetal sobre la superficie, debido en gran medida a la presencia de

intercalaciones de arcillolita gris bastante impermeable en el subsuelo y a la capa de textura arcillosa colocada en la superficie (ensayos 2 y 3).

El escarpe rocoso sobre el cual se construyó la urbanización Altos del Sol presenta una infiltración moderada (ensayo 4) ya que la capa rocosa tiene abundantes grietas y la capa de arcillolita se encuentra bastante fracturada; sin embargo, en este sector el agua lluvia tiende a correr sobre la superficie favorecida por la pendiente inclinada hacia el sur occidente de la zona de estudio. Esto se evidencia por la pérdida de material superficial y posterior sedimentación en las partes bajas o en las zonas con cobertura vegetal.

Los coeficientes de permeabilidad para las diferentes zonas evaluadas, calculadas a partir de los resultados de estos ensayos mediante el método propuesto por A. J. González G. (1987), se presentan en el **Anexo 4**.

6 GEOTECNIA

6.1 Investigación del subsuelo

6.1.1 Exploración

Para determinar el tipo de materiales que conforman el subsuelo en el área de estudio y las características geotécnicas de los mismos, se planteó inicialmente un programa de exploración consistente en 30,0 m de perforaciones con equipo de rotación distribuidas así: dos en el cuerpo del deslizamiento noroccidental de la urbanización Altos del Sol (Zona 1) y una en el relleno de escombros y desechos de explotación ubicado en la parte posterior del conjunto (Zona 2); también la ejecución de 25,0 m de trincheras exploratorias en los taludes del este y sur de la urbanización (Zonas 3 y 4).

Finalmente, se realizaron en total 32.0 m de perforación con equipo de rotación, distribuidos en cinco sondeos así: dos en la Zona 1, sobre el cuerpo del deslizamiento noroccidental (P1 y P2), dos en la Zona 2, sobre el relleno nororiental (P3 y P4) y una más hacia la corona del deslizamiento principal de la Zona 1, muy cerca del bloque 16 del conjunto (P5). Cabe aclarar que las perforaciones P4 y P5 fueron hechas por sugerencia de la Interventoría, hecha el día en que los profesionales a cargo efectuaron la visita de reconocimiento al sitio. Los registros de las perforaciones se presentan en las **Figuras 6-2** a **6-7**.

En cuanto a las trincheras exploratorias, se hicieron cinco en total: una en la pata del deslizamiento nororiental de la Zona 1 (Tr1), una hacia el extremo norte del talud principal de la Zona 2 (Tr2) y tres más a lo largo del talud de la Zona 3 (Tr3 a Tr5). De estas trincheras se tomaron muestras para observación, masno para ensayar en laboratorio, excepto la muestra 2 de la trinchera Tr1, sobre la cual se

realizó el ensayo de corte directo. Los registros de las trincheras se presentan en las **Figuras 6-8** a **6-12**.

Adicionalmente, y por sugerencia de la Interventoría, se efectuaron 5 apiques más (P1 a P5), localizados cuatro de ellos sobre la Zona 1, y el restante sobre la Zona 4. El objetivo de esta exploración adicional estuvo encaminado a establecer los espesores del relleno antrópico sobre el que se presentan actualmente fenómenos de inestabilidad. Durante la realización de los apiques se tomaron muestras para identificación visual pero no se realizaron sobre éstas ensayos de laboratorio. Los registros de los apiques se presentan en las **Figuras 6-13** a **6-15**. La distribución de todos los sondeos, trincheras y apiques efectuados en el área de estudio se presenta en la **Figura 6-1**.

6.1.2 Ensayos in-situ y de laboratorio

Durante el desarrollo de los diferentes sondeos exploratorios se tomaron lecturas de resistencia de los materiales con veleta de campo y penetrómetro de bolsillo; los resultados se presentan en los registros. Adicionalmente, en las perforaciones se hizo el ensayo de penetración estándar SPT, cuyos resultados se muestran en las **Figuras 6-16** a **6-18**. El estimativo de los parámetros de resistencia al corte con base en resultados normalizados del ensayo de SPT, fue tomado del método propuesto por A. J. González G. (1998).

Adicional a las pruebas de campo, se tomaron muestras representativas de las diferentes perforaciones, recuperadas mediante tubo partido, las cuales fueron enviadas al laboratorio para realizar ensayos de humedad natural, límites de Atterberg, peso unitario, granulometría por tamizado con lavado sobre el tamiz 200 y por hidrómetro. También se tomó una muestra en bloque para realizar el ensayo de corte directo.

En la **Tabla 6-1** y las **Figuras 6-19** a **6-22** se presenta el resumen de los ensayos realizados sobre muestras de tubo partido (“Split Spoon”); en las **Figuras 6-23** a **6-25** los resultados de la granulometría por tamizado; en las **Figuras 6-26** y **6-27** el resultado del ensayo de corte directo.

Cabe aclarar que en el ensayo de peso unitario se obtuvieron valores muy altos, situación detectada al comparar estos datos con el resultado obtenido del ensayo de SPT (golpes/pie). Por lo tanto, y además por sugerencia de la Interventoría, los resultados fueron afectados por un factor de corrección por área de 0.87 que corresponde a la relación de áreas definida entre el diámetro interno y el diámetro externo de un muestreador de tubo partido, bajo la premisa que durante el proceso de toma de muestra el material se densifica. A partir de los datos de laboratorio, los cuales se presentan en los registros de perforación de las **Figuras 6-3** a **6-7**, se presentan en la siguiente tabla los valores corregidos de peso unitario, corrección aplicada con base en el criterio explicado anteriormente.

Tabla 6-1 Resumen de ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Humedad natural (%)	Limites de Atterberg		Clasifi. USCS	Peso unitario (t/m^3)	% pasa T200
				Plástico	Líquido			
P-1	M1	0.05 – 0.50	14.7					
	M2	0.50 – 1.05	15.5	14	49	CL	1.84	
	M3	1.05 – 1.55	12.5				1.89	
	M4	1.55 – 2.00	14.1					
	M5	2.05 – 2.50	19.0	20	54	CH	1.84	
	M6	3.00 – 3.30	15.2					
	M7	3.50 – 3.65	14.7				1.87	
	M9	4.70 – 5.05	16.0	14	39	CL	1.79	
	M10	6.00 – 6.05	9.8					
	M11	7.00 – 7.05	6.0					
P-2	M1	0.05 – 0.50	27.5					55.4
	M2	0.55 – 1.00	21.6				1.76	
	M3	1.05 – 1.50	20.9					55.8
	M4	1.55 – 2.00	13.6				1.88	
	M5	2.05 – 2.50	19.0					
	M6	2.55 – 3.00	23.1	18	38	CL	1.80	
	M7	3.05 – 3.50	18.3	18	41	CL	1.84	
	M8	3.55 – 4.00	23.8				1.76	
	M9	4.05 – 4.50	20.9	16	41	CL	1.82	
	M10	4.55 – 5.00	21.1					82.8
	M11	5.05 – 5.50	9.5	17	48	CL	1.94	
	M12	6.50 – 6.70	15.5				1.99	
	M13	7.50 – 7.55						
P-3	M1	0.05 – 0.50	22.7					
	M2	0.55 – 1.00	14.1				1.64	
	M3	1.05 – 1.50	14.3	14	33	CL	1.78	
	M4	1.55 – 2.00	23.2				1.53	
	M5	2.05 – 2.50	61.7					
	M6	2.55 – 3.00	37.8				1.64	
	M7	3.05 – 3.50	16.7	14	30	CL	1.74	
	M8	3.55 – 3.80	8.8				1.91	67.3
	M9	5.00 – 5.35	9.5	19	31	CL	2.00	
	M10	5.85 – 7.00						
	M11	7.00 – 7.35	9.8				2.03	
P-4	M1	0.05 – 0.50	18.5					
	M2	0.55 – 1.00						
	M3	1.05 – 1.50	28.4				1.63	
	M4	1.55 – 2.00	26.7				1.65	
	M5	2.05 – 2.50	29.3				1.50	
	M6	2.55 – 3.00	23.5				1.88	
	M7	3.05 – 3.30	7.6	14	30	CL		
	M8	4.50 – 4.55	6.6					

Sondeo	Muestra	Profundidad (m)	Humedad natural (%)	Limites de Atterberg		Clasifi. USCS	Peso unitario (t/m^3)	% pasa T200
				Plástico	Líquido			
P-5	M1	0.05 – 0.50	22.4					36.1
	M2	0.55 – 1.00	11.0				1.84	
	M3	1.05 – 1.50	13.8				1.85	
	M4	1.55 – 2.00	7.1					
	M5	2.05 – 2.50	24.2				1.70	
	M6	2.55 – 3.00	9.0				1.97	98.0
	M7	3.05 – 3.50	11.8				1.83	97.6
	M8	3.55 – 4.00	14.4				1.79	87.3
	M9	4.05 – 4.50	9.2	20	49	CL	1.83	
	M10	4.55 – 5.00	12.9				1.87	24.7
	M11	5.05 – 5.50	18.1	19	53	CH	1.82	
	M12	5.50 – 5.60	16.3				1.90	

6.1.3 Estratigrafía

En los registros de perforaciones y los perfiles de las trincheras levantadas (**Figuras 6-3 a 6-12**) se presenta el perfil del subsuelo encontrado durante la exploración en el área de estudio.

A continuación se presenta los perfiles resumen de las diferentes zonas exploradas.

6.1.3.1 Parte media y baja del deslizamiento noroccidental (Zona 1):

En este sector se realizaron las perforaciones P1 y P2 y la trinchera Tr1. La estratigrafía encontrada corresponde a un relleno con material de desechos de antiguas ladrilleras y escombreras de construcción que sobreyacen a un estrato de arcillolita meteorizada con vetas de oxidación en la parte superior del estrato. El nivel freático en este sector se encontró a 2.40 m, y el perfil promedio es el siguiente:

0.0 – 2.3 m RELLENO arcillo-arenoso con desechos de antiguas ladrilleras y escombros de construcción. A partir de 1.0 m de profundidad aparecen bloques y gravas de arenita friable.

Humedad natural	w_n (%) 12 - 27
Límite líquido	w_L (%) 49
Límite plástico	w_p (%) 18
Peso unitario	γ_T (t/m^3) 1.76 – 1.88
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 4 - 14
Resistencia al corte no drenada	c_u (t/m^2) 17 – 21

2.3 – 4.8 m ARCILLOLITA muy meteorizada gris claro con vetas amarillas y moradas por oxidación. En la perforación P2 esta capa es de consistencia media a blanda, presentando una capa más blanda entre 4.5 y 4.8 m.

Humedad natural	W_n (%) 15 – 25
Límite líquido	W_L (%) 37 – 54
Límite plástico	W_p (%) 14 – 20
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.74 – 1.87
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 5 y 12 y >75
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 3 y 12 y > 22,5

4,8 – 7,55 m ARCILLOLITA gris con ocasionales vetas de oxidación de consistencia firme a muy firme. (fin de la exploración)

Humedad natural	w_n (%) 5 – 12
Límite líquido	w_L (%) 39 – 47
Límite plástico	w_p (%) 14 – 17
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.79 – 1.94
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 52 y >75
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 20 y > 22,5

6.1.3.2 Parte alta del deslizamiento noroccidental (Zona 1)

Hacia la corona del deslizamiento, en proximidad al Bloque 16 de la urbanización Altos del Sol, se realizó la perforación P5. El Nivel freático se encontró a 3,40 m, y el perfil estratigráfico de esta perforación se presenta a continuación:

0,0 - 0,10 m Capa delgada de limo café oscuro con pasto.

0,1 – 2,2 m RELLENO areno – arcilloso amarillo con gravas y escombros de construcción.

Humedad natural	w_n (%) 7 - 15
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.70 – 1.87
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 2 - 7

2,2 – 2,6 m LIMO café oscuro negruzco con olor a aguas servidas.

Humedad natural	w_n (%) 24
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.70
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 3
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 5 – 6

2,6 – 3,5 m ARENITA friable diaclasada, con pequeñas aberturas.

Humedad natural	w_n (%) 8 –12
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.83 – 1.97
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 17 – 20
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 14 – > 22,5

3,5 – 5,6 m ARCILLOLITA habana y gris claro con vetas amarillas por oxidación (fin de la exploración).

Humedad natural	w_n (%) 8 –17
Límite líquido	w_L (%) 50 – 53
Límite plástico	w_P (%) 19 – 21
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.79 – 1.91
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 30 – 41
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 20 – > 22,5

6.1.3.3 Zona de relleno en el sector nororiental de la urbanización (Zona 2)

Este sector está conformado por un relleno antrópico dispuesto en una zona destinada para la captación de agua necesaria en la fabricación de ladrillo. El nivel freático se encontró entre 1,60 y 1,80 m, y el perfil promedio de las perforaciones P3 y P4, es el siguiente:

0,0 – 1,9 m RELLENO arcillo – limoso con arena, gravas y escombros de construcción.

Humedad natural	w_n (%) 14 – 24
Límite líquido	w_L (%) 33
Límite plástico	w_P (%) 14
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.63 – 1.78
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 6 – 30
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m^2) 5 – 13

1,9 – 2,5 m LIMO café oscuro con raíces, perteneciente a una capa vegetal sepultada.

Humedad natural	w_n (%) 23 – 62
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.53
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 4 – 14

2,5 – 3,4 m ARCILLA habana – rojiza claro con vetas grises y moradas; presenta una capa muy delgada de arcilla de consistencia muy blanda.

Humedad natural	w_n (%) 17 – 34
Límite líquido	w_L (%) 30

Límite plástico	w_P (%) 14
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.63 – 1.74
Resistencia a penetración estándar	N (golpes/pie) 1 – 9
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m2) 1,5 – 9

3,4 – 7,35 m ARCILLOLITA gris clara con vetas rojizas por oxidación, de consistencia firme a muy firme; presenta unos lentes de arena a 5,0 m de profundidad. (Fin de la exploración).

Humedad natural	w_n (%) 8 – 10
Límite líquido	w_L (%) 30
Límite plástico	w_P (%) 14 – 19
Peso unitario	γ_T (ton/m^3) 1.91 – 2.02
Resistencia a penetración estándar	N (golpe/pie) > 75
Resistencia al corte no drenado	c_u (ton/m2) 22 y > 22,5

6.1.4 Secciones de análisis

Considerando la secuencia de materiales encontrados en el área de estudio y los fenómenos de inestabilidad que los afectan, se tomaron cinco secciones de análisis (indicados en el **Plano 2 –** Geología), sobre las cuales se realizarán también los análisis de estabilidad para la evaluación de la amenaza. Dichas secciones se presentan en el **Plano 5**, y en la **tabla 6.2** están consignados los rangos de los diferentes parámetros geotécnicos determinados a partir de los ensayos de laboratorio y de la información disponible en MGL sobre estudios similares en cercanías a la zona de trabajo.

Tabla 6-2 Parámetros geotécnicos utilizados

Material	Peso unitario (ton/m^3)	Cohesión (ton/m^2)	Angulo de fricción (°)
Relleno	1.63	0.0 – 0.5	21 – 25
Arenita	2.00	0.0 – 0.2	22 – 26
Arcillolita	2.05	0.0 – 2.0	14 - 22

6.2 Inventario de procesos

En el Barrio Buenos Aires predominan dos mecanismos de falla de taludes: el primero se aprecia en las Zonas 2 y 3 y consiste en la caída de rocas, principalmente bloques de arenita de tamaño variable entre 0.4 y 1.0 m de lado, propiciado por la erosión diferencial que afecta de manera más intensa a los niveles de lodolitas, dejando de esta manera sin soporte las capas de arenitas. Además de la pérdida del material de la base, el movimiento está favorecido por la

presencia de diaclasas con alto ángulo de buzamiento, definiendo de esta manera bloques de arenita susceptibles a la caída.

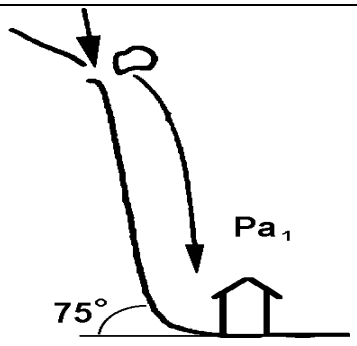
El proceso anteriormente descrito se presenta sobre un antiguo talud de corte de la Zona 3, el cual tiene de 3.0 a 5.0 m de altura y 90.0 m de longitud; hacia la base del mismo se han construido casas de uno y dos niveles, que han sufrido en el pasado el impacto de los bloques de arenita. En la Zona 2 también aflora un talud de corte de 60.0 m de longitud y 6.0 m de altura promedio, en donde se ha presentado caída de material, sin embargo, actualmente no representa una amenaza ya que no hay asentamientos humanos en este sector (**Plano 4**).

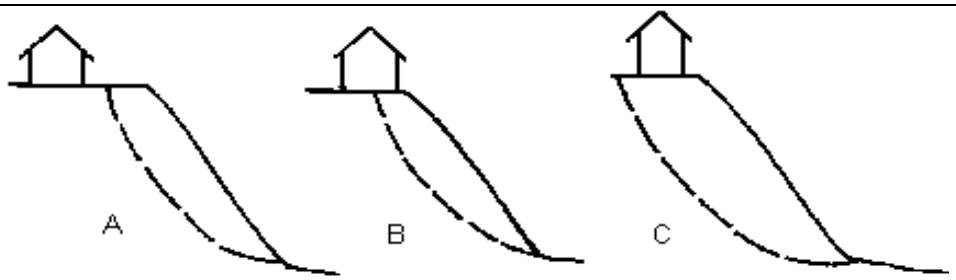
El segundo mecanismo de falla se encuentra en la Zona 1, entre los edificios de apartamentos del conjunto Altos del Sol y la Carrera 1 sur, en donde se aprecian dos deslizamientos de tipo rotacional sobre material de relleno; los movimientos son independientes pero sus ejes se encuentran alineados siguiendo una dirección noroeste. El primero está localizado hacia la parte alta de la ladera y su corona alcanza a interesar la cimentación del bloque 16 del conjunto residencial, su pata llega hasta la zona posterior de una casa antigua que se ubica sobre la parte media de la ladera.

El segundo deslizamiento se inició por la demolición de un muro de mampostería que se encontraba sobre el costado oriental de la carrera 1 sur; el desconfinamiento de la pata del talud generó el movimiento del material de relleno, el cual ha progresado y actualmente sus grietas de tracción se encuentran a 5.0 m de la casa antigua descrita en el párrafo anterior. Es importante mencionar la presencia de agua hacia la parte baja del deslizamiento y la gran longitud de la corona del mismo (50.0 m), la cual pasa por la parte posterior de dos viviendas del barrio Buenos Aires.

En la siguiente tabla se indican de manera gráfica los dos mecanismos de falla descritos anteriormente.

Tabla 6-3 Mecanismos de falla de taludes

	**1. CAIDA DE ROCA** Probabilidad de que la roca alcance al elemento expuesto, según la trayectoria del material caído. Se ilustra la caída directa en talud bastante empinado. (Flageollete, J.C., 1999)



2. DESLIZAMIENTO ROTACIONAL

Elemento expuesto situado en la corona del talud o en su inmediata vecindad.

A: la estructura está por fuera de la masa deslizada; puede quedar expuesta a retrogresión.
B: daño parcial por deslizamiento superficial.
C: La estructura total es abarcada por un deslizamiento profundo.

(García L., M., 2000)

6.1.5 Fenómenos amenazantes

A continuación se describe el origen de los fenómenos descritos anteriormente, de acuerdo con la información recolectada entre los habitantes del sector:

6.1.5.1 Deslizamiento

De acuerdo con las zonas en que se dividió el área de estudio para facilitar su localización y descripción (**Figura 4-2**), en la Zona 1 se presentan dos deslizamientos activos que están afectando seriamente la cimentación del bloque 16 de la urbanización Altos del Sol y las viviendas localizadas en la ladera existente entre dicha urbanización y la Carrera 2 A (lotes 48, 49, 51 y 52 del inventario de viviendas, **Figura 8-1**).

De acuerdo con las versiones dadas por diferentes habitantes del sector sobre la ocurrencia del proceso de inestabilidad de la parte superior de la ladera y que involucra la cimentación del Bloque 16 y la vivienda de la parte media de la zona (lote 51), se pudo establecer que los primeros indicios de inestabilidad del terreno se presentaron hacia 1995, año en que comenzó a agrietarse el andén que pasa por el frente del edificio. Dos años más tarde, hacia mediados de 1997, el movimiento produjo un hueco de aproximadamente 0.5 m de profundidad en la base del edificio y el rompimiento de la tubería de agua potable, daño que fue reparado por la EAAB.

Hacia comienzos de 1999, nuevamente se rompió la tubería de suministro de agua potable de la parte superior del conjunto, razón por la cual la EAAB decidió suspender el servicio por esta tubería (localizada a lo largo de la zona verde

existente entre la Calle 1ª Sur y el Bloque 16) y prestarlo por la tubería que pasa por el frente de la portería del conjunto; con esta medida, la Empresa garantizaba la eliminación del aporte de agua al terreno. Debido a esta nueva fuga sumada a un posible aporte de aguas servidas por desajuste o rompimiento de la tubería de conducción de éstas en los bloques comprometidos por el deslizamiento (sistema construido por los habitantes del conjunto con la colaboración de la alcaldía local), la pared posterior de la vivienda de la parte media de la ladera (predio 51 del Inventario de Viviendas) y la pared de la terraza de la vivienda localizada en la pata de la ladera (predio 49 del Inventario) estaban siendo seriamente afectadas por el movimiento. La hipótesis del posible aporte de aguas servidas se basa en el mal olor de los efluentes de agua existentes tanto en la parte media como en la parte baja de la ladera, reportado por los habitantes del sector y registrado en la perforación P5. Hasta este momento el material sobre el que estaba apoyada parte de la base del muro exterior del edificio presentaba un hundimiento de aproximadamente 1.0 a 1.5 m con respecto al nivel original del terreno.

Durante la visita al sitio realizada el 11 de noviembre de 2000, se tuvo conocimiento del rompimiento en forma axial (por tracción) del tubo de aguas servidas que sale en forma vertical, por debajo de la escalera de acceso al edificio. Dicho suceso, ocurrido durante la última semana de octubre o la primera semana de noviembre de 2000, pudo producirse por un incremento en el hundimiento del terreno.

Observando el hueco en la base del edificio, pudo establecerse también una diferencia de nivel de aproximadamente 2.5 m entre el fondo de la grieta (en la que se evidenció la presencia de material saturado por aguas servidas) y el nivel original del terreno. La dimensión horizontal de la zona hundida es de aproximadamente 2.0 m y se considera que en este sentido el proceso no puede aumentar más, debido a que afortunadamente se encuentra un afloramiento de arenita sobre el cual está apoyado el resto del edificio. El hundimiento ha provocado un muy leve agrietamiento en el apartamento 101 del Bloque 16. También se ha presentado la suspensión del servicio de gas natural en los tres apartamentos del costado sur de esta torre debido al peligro que representa el movimiento del terreno sobre los contadores y las mangueras de suministro, pues, de acuerdo con el concepto emitido por funcionarios la empresa correspondiente, el tensionamiento consecuente puede romper las mangueras y generar una explosión. Este fenómeno se ha presentado también en los conductos de suministro de agua potable, ocasionando el cambio de las mismas en una ocasión, y si el movimiento continúa, muy pronto tendrán que reemplazarse nuevamente.

Durante la visita mencionada también pudo establecerse que los edificios se encuentran apoyados sobre un cimiento en piedra y mortero de aproximadamente 1.0 m de profundidad, rodeado por una viga de amarre no continua de aproximadamente 0.5 m de espesor. Sobre este sistema relleno - viga de amarre (el cual se encuentra sin soporte en uno de sus extremos debido al hundimiento) se encuentra apoyada la placa de aproximadamente 0.3 m de espesor que sirve

de piso a los apartamentos del primer nivel, sobre la cual están construidos los muros de mampostería. El espesor de las placas de los entrepisos de los apartamentos del segundo y tercer nivel no supera los 0.15 m.

El otro deslizamiento que afecta esta ladera, pero ahora en su parte inferior, sobre la Carrera 2ª A, pudo haberse generado por el desconfinamiento de la pata del talud debido a la demolición de un pequeño muro de piedra que lo contenía, acción llevada a cabo por los vecinos del sector quienes pretendían adecuar este sitio para un parque infantil y de paso solucionar con esta acción algunos problemas de salubridad; la pérdida de soporte del talud, sumada al aporte constante de agua (tanto potable como servida) desde la parte alta y media del talud (éste último debido al precario estado de la tubería de desagüe de las viviendas 51 y 52) pudo ser el origen de las grietas indicadas en el **Plano 4** - Inventario de procesos. Cabe destacar la constante emanación de agua mal oliente en la pata del talud, y el proceso de infiltración de agua potable o de escorrentía que se ha venido presentando desde hace más de un año por el muro posterior de las viviendas 48 y 49, localizadas sobre el flanco derecho del movimiento.

6.1.5.2 Caída de rocas

Las viviendas construidas desde hace aproximadamente 8 años en la pata del talud que bordea la parte posterior del conjunto (Zona 3 de la **Figura 4-2**) se han visto afectadas con alguna frecuencia por la caída de bloques de arenita y, en algunos casos, por el escurrimiento de algunos flujos de lodolita meteorizada. La caída de los bloques, formados a partir del diaclasamiento o alto grado de fracturación que afectan este nivel superior del talud, es fomentada por la erosión o meteorización de las lodolitas del nivel inferior que los soportan o sostienen. El fenómeno es incrementado por algunas excavaciones que realizan en la pata del talud los propietarios de las viviendas para ampliarlas un poco hacia la parte de atrás.

Cabe aclarar que el proceso de caída de bloques no afecta a todas las viviendas de la zona 3, sino a aquellas construidas en los predios 17, 19 y 23 a 34 del Inventario (**Figura 8-1**), comprendidas entre el relleno de la Zona 2 y el costado suroccidental de la carrera 2ª A (todas localizadas en la vecindad inmediata de la pata del talud).

De acuerdo con las observaciones de campo y los testimonios recogidos entre los habitantes del sector, el desprendimiento de bloques es constante en época de lluvia, período durante el cual el agua de escorrentía fluye sin control alguno sobre la cara del talud favoreciendo la erosión y pérdida de soporte de los bloques, los cuales se desploman sobre las viviendas.

Los efectos más serios del proceso descrito se han presentado en las dos viviendas localizadas a ambos lados del extremo noroccidental de la Carrera 2ª A

(predios 17 y 19) y en el predio 31, éste último situado cerca de la intersección de la Diagonal 4ª con la calle 5ª Sur. En el primer caso (predio 17), un gran bloque de arenita irrumpió en el comedor de la casa destruyendo no solo la pared, sino también la alacena - biblioteca que se encontraba apoyada sobre este costado; los habitantes de esta vivienda afirman que sobre el lote 18 (también de su propiedad) continuamente se presenta el flujo de materiales desde la pata del talud. En el caso del predio 19, el desprendimiento de un bloque destruyó la pared posterior del segundo piso poniendo en peligro la vida de dos ancianos que se encontraban en la habitación, pero afortunadamente la lavadora apoyada contra la pared contuvo la roca y minimizó su impacto. En el predio 31, el impacto causado por el desprendimiento de un bloque y el flujo del material que lo soportaba destruyó la habitación posterior de la vivienda; en este caso tampoco se presentaron víctimas fatales debido a que la niña que ocupaba la habitación acababa de salir de allí.

Otro talud afectado por el fenómeno de desprendimiento de bloques es el que bordea el relleno de la Zona 2, pero debido a la inexistencia de viviendas en el sector se considera que la amenaza actual es nula, pero la potencial o a largo plazo es alta. Para que este proceso no se convierta en un factor de riesgo, pueden plantearse varias posibilidades:

1. Construir obras preventivas y correctivas de los procesos de deslizamiento que ofrezcan un alto margen de seguridad para viviendas que se construyan sin regulación mayor.

2. Construir obras preventivas y correctivas que suministren un factor de seguridad adecuado y limitar el desarrollo urbanístico de tal manera que haya una faja de seguridad sin construcciones paralela y hasta cierta distancia del talud.

3. Hacer apenas algunas obras menores, como tumbar en forma controlada varios bloques rocosos que ya se encuentran muy propensos a caer, y una zanja de coronación, y prohibir el desarrollo urbanístico en toda la zona de relleno, no solo por el efecto que sobre las viviendas puede tener el desplome de los fragmentos de roca, sino por los posibles asentamientos diferenciales que se podrían presentar en las viviendas debido a la heterogeneidad de los materiales del relleno y el deficiente o muy variable grado de compactación de los mismo, así como por la presencia de materia orgánica en el fondo del relleno, todo esto sin considerar las condiciones de drenaje natural del terreno. En esta alternativa se considera que dicho espacio podría destinarse a la recreación, esparcimiento y prácticas deportivas para los habitantes del barrio.

4. Combinación de las anteriores.

Considerando que la causa fundamental del desprendimiento de bloques se debe principalmente a la pérdida de soporte por erosión pluvial, a continuación se

presentará el estudio relacionado con este proceso, con base en el cual se calculará la amenaza para esta zona de estudio.

6.3 Análisis determinístico

6.3.1 Deslizamiento

Para el análisis determinístico de estabilidad en la Zona 1, afectable por fenómenos de deslizamiento, se utilizó el programa PCSTABL6 con el cual se pueden obtener más de 200 superficies de falla diferentes empleando 7 métodos de análisis; estas combinaciones permiten estudiar diferentes tendencias del terreno y establecer la más desfavorable y con mayor probabilidad de ocurrencia. Adicionalmente, el software tiene la opción de introducir la variable sísmica, con lo cual puede complementarse el análisis de estabilidad de taludes y obtener resultados aún más completos.

El procedimiento de análisis partió del ajuste de las propiedades de los materiales obtenidas en los ensayos de laboratorio (límites de Atterberg y peso unitario, especialmente del relleno por considerarse el material susceptible de deslizarse) y verificadas con información disponible en las firmas MGL e IGL. En todos los casos se adoptaron los parámetros necesarios considerando las propiedades del suelo del lado conservador para mantener los resultados de los análisis de estabilidad y recomendaciones de trabajo con suficiente margen de seguridad; la recopilación de información utilizada para el presente estudio se presenta en la **Tabla 6-4** y los parámetros adoptados finalmente para el análisis (valores mínimo, máximo y medio de cohesión y fricción) se presentan en la **Tabla 6-5**.

Se analizaron 5 secciones representativas de modos de falla en las diferentes zonas inestables encontradas en el área de estudio; la localización de estas secciones se presenta en el **Plano 2** y la morfología y estratigrafía de cada una en el **Plano 5**. Con base en los análisis de estas secciones se determinó la estabilidad de cada talud mediante el cálculo del factor de seguridad con la teoría del equilibrio límite (método de Janbu) y determinando la probabilidad de falla por el método del punto medio – PEM – (Rosenblueth, 1975); los factores de seguridad obtenidos para las diferentes combinaciones de condiciones sísmicas y de saturación se presentan en la **Tabla 6-6**. En el **Anexo 3** – Análisis de estabilidad, se presentan los mecanismos de falla considerados para cada una de las secciones analizadas.

Inicialmente el programa generó superficies de falla circulares aplicando el método de Janbu, cubriendo el mayor número de posibilidades y obligando el paso de las diferentes superficies de falla a través de puntos “fijos” dados por evidencias de campo (grietas, fisuras, etc.) o por el mecanismo de falla predominante.

Todos los análisis se realizaron para la condición actual de cada talud, razón por la cual la posición del nivel piezométrico y su incidencia en la estabilidad fue

definida con base en la información de campo. Para el análisis bajo condiciones sísmicas se empleó una aceleración de la gravedad de a/g = 0.24, de acuerdo con el mapa de microzonificación sísmica para Santa Fe de Bogotá (Ingeominas - Universidad de Los Andes, 1997).

6.3.2 Caída de rocas

Para las zonas 2 y 3, afectables por procesos de caída de rocas, se realizó el análisis determinístico de estabilidad mediante la utilización del programa RocFall desarrollado Rocscience Inc., con ayuda del cual se determinó la energía cinética máxima y el alcance o recorrido longitudinal que puede tener un bloque al desprenderse de la parte alta del talud; estas características están en función del peso del bloque que puede desprenderse y de las condiciones físicas y geométricas de la superficie por la que rueda.

Para este caso específico se realizaron los análisis considerando que el tamaño del bloque que puede caer varía entre 0.4 y 1.0 m^3 de acuerdo con la información estructural obtenida en el levantamiento geológico, es decir, una masa de roca que pesa 760 y 1900 kg respectivamente. Se evaluaron diferentes condiciones para el comienzo del movimiento de un bloque. Luego de varias modelaciones y teniendo en cuenta las observaciones de bloques caídos en el área durante el tiempo en que se ha venido desarrollando el estudio, se consideró como la condición más representativa del mecanismo que el bloque parte con una velocidad inicial nula, en general, se ha establecido que el desprendimiento se origina por pérdida de soporte y no por una condición cinemática favorable a la inestabilidad.

A lo largo del talud de la Zona 3 se seleccionaron siete perfiles "típicos" sobre los cuales se corrió el programa; la selección de los mismos se basó en las características topográficas del talud en cada sitio y la cercanía de vivienda al mismo; en todos los casos el muro posterior de la vivienda se consideró como parte del perfil. Bajo esta premisa, el programa arrojó los resultados presentados en la **Tabla 6-7** (columnas 3 y 5). Posteriormente, al notar que en ninguno de los casos los bloques superaron la altura de dichos muros, y teniendo la certeza de que aunque esta situación no se presente, los bloques sí tienen la capacidad de romper el muro y quedar dentro de las habitaciones traseras de las casas, se corrió nuevamente el programa para las mismas secciones pero sin considerar la "barrera" del muro; los resultados obtenidos se presentan en la misma tabla (columnas 2 y 4). La localización de cada una de las secciones se indica en el **Plano 6** - Zonificación de la amenaza actual.

Tabla 6-7 Resultado del análisis de caída de rocas con RocFall

SECCION	VOLUMEN DEL BLOQUE = 1.0 m^3 (PESO = 1900 kg)		VOLUMEN DEL BLOQUE = 0.4 m^3 (PESO = 760 kg)		Alcance del material dentro de la vivienda (m)
	Energía Cinética máxima (kj)	Energía Cinética máxima (kj)	Energía Cinética máxima (kj)	Energía Cinética máxima (kj)	
S1 - L34	50.0	48.0	15.2	20.0	1.5
S2 - L32	45.0	45.0	15.5	15.5	3.0
S3 - L29	78.0	60.2	36.0	25.0	1.5
S4 - L26	56.0	24.0	22.5	10.0	3.0
S5 - L24	129.0	101.0	50.0	43.0	7.0
S6 - L19	98.0	86.0	40.0	37.0	5.0
S7 - L17	105.0	105.0	42.0	40.0	4.0

En la calificación de vulnerabilidad se utilizan los resultados de la distancia alcanzada por los bloques rocosos dentro de las viviendas.

6.4 Análisis probabilístico

Las probabilidades de falla de los taludes se determinaron a corto plazo (probabilidad total para un período de análisis de 1 año) y a largo plazo (25 años).

6.4.1 Probabilidades de falla a corto plazo por deslizamiento

Utilizando el método de Rosenblueth (1975), se determinó la probabilidad de falla a corto plazo utilizando el teorema de probabilidad total tomando los resultados de los análisis de cuatro condiciones extremas para los factores detonantes lluvia y sismo:

- Sin lluvia - sin sismo.
- Con lluvia - sin sismo.
- Sin lluvia - con sismo.
- Con lluvia - con sismo.

Es importante resaltar que las probabilidades de falla se ajustaron a distribuciones normal y lognormal, obteniéndose de esta forma valores mínimos y máximos. Generalmente, los valores mínimos corresponden a la distribución normal y los máximos a los valores obtenidos de la distribución lognormal.

En la **Tabla 6-8** se presenta el resumen de los resultados a corto plazo obtenidos para cada una de las secciones de estudio.

6.4.2 Probabilidades de falla a largo plazo por deslizamiento

Para determinar la probabilidad de falla de taludes a largo plazo se tuvo en cuenta la siguiente hipótesis:

Se utiliza al igual que en la primer teoría de la probabilidad total, pero en ésta hipótesis se mantiene constante la probabilidad de ocurrencia del deslizamiento y se varía la probabilidad de ocurrencia (y por tanto de no ocurrencia) de la lluvia y el sismo [1] es decir:

$$P(Dz)_n = P(PDz / S\,LL) * P(S)_n * P(LL)_n + P(Dz / S'LL) * P(S')_n * P(LL)_n + P(Dz/S\,LL') * P(S)_n * P(LL')_n + P(Dz/S'LL') * P(S')_n * P(LL')_n.$$

donde,

$P(Dz)_n$ = Probabilidad de que ocurra el deslizamiento con un período de retorno de *n* años.

$P(PDz / S\,LL)$ = Probabilidad de que ocurra el deslizamiento anual con sismo y con lluvia.

$P(Dz / S'LL)$= Probabilidad de que ocurra el deslizamiento anual sin sismo y con lluvia.

$P(Dz/S\,LL')$ = Probabilidad de que ocurra el deslizamiento anual con sismo y sin lluvia.

$P(Dz / S'LL')$ = Probabilidad de que ocurra el deslizamiento anual sin sismo y sin lluvia.

$P(S)_n$ = Probabilidad de que ocurra el sismo con un período de retorno de *n* años.

$P(LL)_n$ = Probabilidad de que ocurra la lluvia con un período de retorno de *n* años.

$P(S')_n$ = Probabilidad de que no ocurra el sismo con un período de retorno de *n* años.

$P(LL')_n$ = Probabilidad de que no ocurra la lluvia con un período de retorno de *n* años.

El análisis de la probabilidad de falla a largo plazo (25 años) correspondiente a la hipótesis planteada, se efectuó a partir de la relación entre probabilidad de falla del talud y el periodo de análisis (años) presentada en forma gráfica para las secciones características en las **Figuras 6-28** a **6-43**.

---

1 González, A. (1992) "Avalanche Risk Evaluation at Utica – Colombia". Primer Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.

6.4.3 Probabilidades de falla a corto plazo por caída de rocas

Para la evaluación de la probabilidad de falla por caída de bloques a corto plazo se consideró el mecanismo básico establecido a partir de las observaciones en el sitio, según el cual éste proceso se produce por pérdida de soporte del bloque debido al arrastre del material subyacente por escorrentía, agua infiltrada a través de las discontinuidades o mecanismos de socavación. La pérdida de suelo (presentada en el numeral 7.4) se calculó mediante la Ecuación Universal (E = R x K x LS x P x C) y se supuso que este valor y el modelo en que se soporta dicha ecuación puede extrapolarse a las condiciones del sitio. Como la pérdida mayor de material se relaciona con la lluvia, la probabilidad se asoció con el factor R de erosividad de la ecuación universal, el cual depende directamente de la lluvia.

Para el cálculo de la probabilidad a corto plazo se relacionó la probabilidad de ocurrencia de las cuatro condiciones extremas para los factores detonantes sismo y lluvia (sin lluvia – sin sismo, con lluvia – sin sismo, sin lluvia – con sismo y con lluvia – con sismo), siguiendo en términos generales el planteamiento de Rosenblueth (1975) empleado para calcular la probabilidad de falla a corto plazo por deslizamiento, al relacionar la probabilidad del factor detonante y la probabilidad de falla parcial de los bloques.

Para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia del sismo se tomó el valor del sismo de diseño presentado en el Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-98.

Para calcular la probabilidad de ocurrencia de la lluvia y la de falla parcial de los bloques, se realizó el análisis de equilibrio límite de un bloque en cada una de las condiciones extremas; con base en el resultado se determinó la longitud de base del bloque que debe perderse para provocar la caída, y con base en ésta el cálculo de pérdida de suelo y el factor de erosividad R utilizando las **Figuras 6-44** y **6-45**.

En la siguiente tabla se presentan los resultados encontrados para cada condición extrema:

Tabla 6-9 Probabilidades de falla a corto plazo por caída de rocas

Caso	Factor de Seguridad FS	Probabilidad de Falla
Sin lluvia – Sin sismo	1.5	2.9×10^{-7}
Con lluvia – Sin sismo	1.0	0.5
Sin lluvia – Con sismo	1.1	0.16
Con lluvia – Con sismo	0.5	0.99

6.4.4 Probabilidades de falla a largo plazo por caída de rocas

Para determinar la probabilidad de caída de rocas se realizó el mismo procedimiento empleado para el caso de deslizamiento, relacionando la probabilidad de ocurrencia de la falla de un bloque (por equilibrio límite) con la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia de la lluvia y el sismo. Los resultados se muestran en la **Figura 6-46**.

7 EVALUACION Y ANALISIS DE AMENAZA POR FRM

La inestabilidad reinante en el terreno una vez concluidas as labores de minería artesanal (extracción de materiales de construcción, principalmente arcilla para fabricación de ladrillo) es, en la mayoría de los casos, la principal fuente de amenazas naturales por fenómenos de remoción en masa (FRM) que se presentan en los cerros orientales de ciudad de Bogotá. Entre los procesos más comunes se encuentran:

- Caída de bloques, propiciada por el alto grado de fracturación de los estratos competentes debida al uso indiscriminado de explosivos y otras prácticas de extracción.

- Deslizamientos, flujos y otros procesos de remoción en masa en las laderas de los cerros o en los taludes de rellenos artificiales, causados en la mayoría de los casos por la intervención inadecuada de depósitos coluviales, por la heterogeneidad y baja compactación de los rellenos de origen antrópico en los frentes abandonados de la explotación, o por el manejo inadecuado de agua de escorrentía, agua potable o aguas servidas por parte de los moradores de la zona.

- Carcavamiento y otros procesos de erosión intensa, causados por la degradación que sufren los estratos blandos (como arcillolitas y lodolitas) al quedar sin cobertura vegetal en los frentes de excavación abandonados.

Lo anterior, sumado al proceso de urbanización muchas veces inadecuado tanto de barrios formales como subnormales, se ha convertido en un problema constante que involucra a las comunidades menos favorecidas y a diferentes entidades del distrito, entre las que se destacan la DPAE, las alcaldías locales y la EAAB.

El área de estudio se encuentra en el piedemonte de los cerros orientales de la ciudad, sobre antiguas zonas de chircales y explotaciones mineras artesanales de arcillolitas y arenitas, exactamente entre las Carreras 1ª y 3ª y las Calles 1ª y 5ª Sur, barrio Buenos Aires, hacia el sur de la planta de Tubos Moore. Aunque en el área existen viviendas antiguas que no se han visto afectadas ni por FRM ni por

otro tipo de fenómenos de origen natural o antrópico (ejemplo de ello son las viviendas de la entrada a la urbanización Altos del Sol, construidas hace más de 65 años), las nuevas viviendas del sector, pertenecientes a las urbanizaciones desarrolladas durante los últimos 8 años tanto en la parte alta como en la parte baja de los antiguos frentes de explotación, han sufrido continuamente los efectos de deslizamientos y caídas de roca.

En el presente capítulo se analizan los dos principales fenómenos que están poniendo en peligro a los habitantes del sector (caída de rocas y deslizamiento). Como resultado de este análisis se presenta la zonificación de la amenaza actual por FRM y la calificación del grado de ésta, predio a predio.

7.1 Enfoque conceptual del análisis

El enfoque conceptual seguido en el presente estudio se ha desarrollado a través de la experiencia de los profesionales de MGL tanto en estudios de estabilidad de taludes (problemas de deslizamientos, flujos y avalanchas, prevención y corrección de fenómenos de inestabilidad, evaluación sectorial o regional de estabilidad, entre otros), así como en estudios de riesgos por fenómenos de remoción en masa – FRM – (zonificación, mitigación y otros aspectos), enfoque que coincide en líneas generales con el representado en la **Figura 7-1**, adoptada de Flageollet (1999).

La aplicación de este enfoque conlleva establecer un modelo predictivo de la evaluación de taludes y del comportamiento geotécnico de materiales, basado tanto en estimativos puramente empíricos como en el análisis probabilístico, dado que varios datos de entrada relacionados con la clasificación del proceso (método de falla observado, inferido o previsto), la profundidad de las superficies de falla, los mecanismos de falla o la resistencia al corte, pueden provenir de apreciaciones subjetivas del investigador. También se tiene en cuenta el concepto de que el comportamiento de un sistema geotécnico (un talud, un terraplén, un conjunto de éstos o una zona o serie de zonas) puede expresarse como una función de factores (pluviosidad, relieve, infiltración, uso de la tierra, sismo) que pueden considerarse como variables aleatorias.

7.2 Método de estudio y modelos empleados

En general, se puede definir la amenaza como “la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que potencialmente puede afectar los elementos existentes en un área dada y en un período de tiempo determinado”. El presente estudio está enfocado a la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de los procesos de remoción en masa (como deslizamientos y caída de bloques) que pueden afectar los taludes y laderas en roca, suelos o rellenos de origen antrópico, sobre o bajo los cuales está construido el barrio Buenos Aires; estos materiales y los procesos que los afectan fueron descritos en el Capítulo 6.

De acuerdo con los diversos modos de falla, el volumen y velocidad de la masa inestable, la acción o impacto de ésta sobre los habitantes y sus propiedades (viviendas, instalaciones) o sobre las demás obras de infraestructura comunitaria, puede ser significativa; dicha acción se domina "solicitación", y está relacionada directamente con la velocidad y forma del movimiento que debe adquirir la masa inestable para producir el daño.

El concepto de “solicitación” ha sido destacado por Leone (1996) dentro del método de estudio de riesgos por fenómenos de remoción en masa. Flageollet (op. cit.) comenta al respecto que "los efectos morfológicos de un deslizamiento de tierras no son iguales a todo lo largo del mismo, puesto que el movimiento ocurre de acuerdo con una dirección dominante, la cual es vertical en la parte superior y lateral en el resto; en la pata ocurre un movimiento de empuje y una acumulación y en ocasiones de materiales; en el caso de caída de rocas o detritos hay impacto, acumulación y un efecto inicial de estallido (“blast”); en un flujo de tierras hay ablación (disgregación o supresión de materiales) seguida de empuje, impacto y acumulación. La potencia del efecto destructivo de los modos de solicitación depende de su magnitud individual. Esta magnitud es determinada por el campo de deformación que se mide en términos de velocidad, profundidad, distancia, energía cinética, etc."

Con base en estos conceptos, se llevaron a cabo las siguientes labores para establecer la zonificación o división del terreno en áreas de comportamiento homogéneo ante determinadas solicitaciones, calificadas de acuerdo con el grado de amenaza que pueden representar, los posibles procesos de remoción en masa ya sea en forma potencial (amenaza a largo plazo) o activa (amenaza actual) (Soeters y Van Westen, 1996).

a) Zonificación geomorfológica de acuerdo con los materiales presentes en el sitio, las características topográficas (incluyendo la similitud de inclinación o pendiente de los taludes) y la homogeneidad de comportamiento ante procesos de infiltración (Capítulo 4 y **Plano 3** – Geomorfología).

b) Levantamiento detallado de procesos de inestabilidad y estudio de estos procesos en relación con el medio ambiente en que ocurren. Los resultados de esta actividad fueron presentados en el Capítulo 6 y **Plano 4** – Inventario de procesos.

c) Análisis de posibles mecanismos de falla en relación con el comportamiento de materiales presentes en el área y con los procesos activos y potenciales observados.

d) Determinación de los parámetros de resistencia (c’ y ϕ’) máximos y mínimos para cada una de las zonas homogéneas con base en los trabajos de investigación del subsuelo y los análisis retrospectivos de estabilidad;

igualmente se determinó el perfil del talud para cada una de las zonas homogéneas.

e) Análisis de estabilidad para las diferentes combinaciones de parámetros de resistencia, lluvia y sismo.

f) Cálculo de las probabilidades de falla anuales por medio del método PEM y determinación de las probabilidades de falla para diferentes períodos de retorno para taludes afectados por fenómenos de deslizamiento.

g) Evaluación de procesos erosivos y cálculo de pérdida de suelos, debido a que este proceso puede considerarse como uno de los factores contribuyentes o detonantes para la generación de caída de rocas. El resultado del estudio de suelos se presenta en el numeral 7.4.

h) Cálculo de la amenaza a corto y largo plazo para taludes afectados por caída de rocas.

i) Identificación y evaluación de los factores detonantes.

j) Zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa tanto a corto como a largo plazo.

7.3 Criterios aplicados

De acuerdo con las características del área de estudio, para el análisis de la amenaza deben considerarse los siguientes factores que influyen en la generación o la reactivación de fenómenos de remoción en masa:

- Topografía, presentada en el **Plano 1** y en la **Figura 7-2** Mapa de pendientes.

- Tipos de materiales presentes en el área y los procesos que los afectan, descritos en el Capítulos 4 y 6 y los **Planos 2** – Geología local, 3 – Geomorfología y 4 – Inventario de procesos.

- Características hidrológicas y comportamiento de la pluviosidad en el área de estudio, presentada en el Capítulo 5.

- Susceptibilidad a la erosión y pérdida de suelos por erosión pluvial (presentados en el numeral 7.4).

Como métodos de evaluación de la amenaza, se consideraron los siguientes:

- Análisis determinístico de estabilidad para el cálculo del factor de seguridad FS para cada una de las zonas de susceptibilidad o comportamiento geotécnico

similar, utilizando para esto los parámetros geomecánicos de cada tipo de material.

Entran aquí los valores de propiedades índice, peso unitario y parámetros de resistencia al corte, expuestos en el Capítulo 6. Se utilizaron valores de cohesión y fricción máximos, mínimos y promedio como forma de resolver su variabilidad.

En lo relativo a presiones de poros y grado de saturación, el análisis se realizó considerando diferentes posiciones del nivel piezométrico establecidas a partir de la exploración del subsuelo y las observaciones de campo.

- Análisis probabilístico de estabilidad o cálculo de probabilidades de falla.

  En general, el factor de seguridad FS de un talud está dado por la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. Las fuerzas resistentes son función de los parámetros de resistencia del material: ángulo de fricción ϕ' y cohesión c'. Las fuerzas actuantes son función del peso unitario (γ), el cual se relaciona directamente con el peso de la masa que pude inestabilizarse; la sobrecarga (q); la presión de poros (por ejemplo en términos de la relación r_u); y la aceleración producida por el sismo (α). La convolución de estas variables (según el modelo de falla) determina la distribución de probabilidad del factor de seguridad FS. La probabilidad de falla del talud $P_{(Dz)}$ se puede calcular determinando la probabilidad de que el FS sea menor o igual a 1.0.

  Para simplificar el modelo, la variable de peso unitario se tomó como constante. Además, como no se tiene una relación entre la presión de poros (expresada como, r_u) y la precipitación, se calcularon los FS para condiciones razonables de saturación, suponiendo que el caso más crítico se presenta cuando la precipitación es mayor o igual a la lluvia crítica (probabilidad de ocurrencia de 3.3 a 4.0%, aproximadamente), hallada en la sección 5.5.4 del capítulo 5.

7.4 Pérdida de suelos por erosión pluvial

7.4.1 Características del entorno

Morfológicamente, el área de estudio presenta zonas de relieve escarpado en los taludes de los antiguos frentes de explotación, con pendiente superior a 45° (Zonas 2 y 3); ondulado a quebrado, con pendiente entre 10° y 30° en la ladera adyacente al conjunto residencial Altos del Sol (Zonas 1 y 4); y plano a ligeramente ondulado, con pendiente menor al 10°, en la zona superior del relleno y en la terraza donde se ubica el predio 51 del Inventario de Viviendas (Zonas 1 y 2). En la **Figura 7-2** se presenta el mapa de pendientes, en el cual se pueden diferenciar claramente cada una de estas zonas.

En cuanto a la presencia y distribución de los suelos en el área de estudio, se puede decir que puntualmente se encontraron algunos suelos moderadamente profundos, de textura franco limosa en el primer horizonte, limitado por capas de arenisca dura y arcillolitas intercaladas en el resto del perfil, con buen drenaje tanto interno como superficial, erosión moderada y afloramiento de horizontes subsuperficiales, debido a la intensa explotación mineral ocurrida en el sector. En la mayor parte del área de estudio se encontró suelo antrópico producto de rellenos y excavaciones, con presencia de alta cobertura vegetal pero con algunos problemas de manejo de aguas lluvias, lo que propicia la aparición de deslizamientos. En general, la capa orgánica superficial ha desaparecido en el escarpe rocoso y se encuentra el material parental en la superficie, con características favorables para el proceso de pérdida y transporte de materiales (erosión)

En cuanto a la vegetación, puede afirmarse que el bosque natural ha sufrido un intenso proceso de deforestación y actualmente subsiste, especialmente en las laderas frente al conjunto de apartamentos, una vegetación compuesta por estratos herbáceo y arbustivo y la presencia de un estrato arbóreo insignificante. Esta vegetación secundaria desarrollada en el área está conformada por plantas gramíneas (Kikuyo) y de hoja ancha (escobas, lengua de vaca, carretones y cardos) y algunos arbustos como Solanum lycioides, Solanum sp. (lulo de perro), Solanum heterofilum (fregaplatos), Salix humboldtiana (sauce) y Sambucus spp. (sauco). En el estrato inferior se encuentran algunas herbáceas como Pennisetum clandestinum (kikuyo), Trifolium repens (trébol blanco), Trifolium pratense (trébol rojo) y plantas espontáneas como el diente de león, las malvas y escobas, con cobertura del suelo entre 40 y 90% en algunos sitios, mientras que en otros no hay vegetación y aflora material parental en la superficie.

7.4.2 Caracterización de suelos

Para caracterizar los diferentes suelos encontrados en el área de estudio se levantaron 6 perfiles edafológicos, los cuales se indican en la **Figura 7-3**.

Los suelos muestreados en el borde del escarpe nororiental del conjunto residencial Altos del Sol, frente a la zona de relleno sin vegetación, presentan características morfológicas comunes como son los colores claros y las texturas francas. Estas características están asociadas con buen drenaje natural, nivel freático profundo y poco fluctuante y material parental derivado de areniscas y arcillolitas.

Los suelos de la zona de rellenos están conformados por diversos materiales, con rocas y escombros de tamaños variables. La textura de la matriz es limosa en el relleno del costado noroccidental (Zona 1) con colores oscuros, y arcillosa en el relleno nororiental (Zona 2), con colores claros. Se observa alta capacidad de retención de humedad y una velocidad de infiltración moderadamente lenta.

Las características morfológicas de cada perfil se describen a continuación:

- Perfil 1:

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Zona 1, parte posterior del lote 51. .
Relieve: Quebrado. Pendiente: 30%.
Drenaje natural: Bien drenado
Vegetación actual: Pasto Kikuyo.
Uso Actual: Vegetación herbácea.
Material parental: Arenisca fracturada.
Horizontes diagnósticos: Superficial, ócrico
Subsuperficial, Contacto lítico (roca)
Taxonomía del perfil: Entisol.

Descripción del perfil:

0 a 35 cm Au	Color pardo pálido (10YR6/3); textura franco arcillosa; estructura en bloques, medianos, débiles; presencia de grietas verticales de tamaño mediano; consistencia suelta, no plástica y ligeramente pegajosa; abundantes poros medianos; actividad de edafofauna regular, raicillas abundantes, finas y medias; reacción al HCl negativa, al H_2O_2 negativa y al NaF negativa; límite abrupto, de topografía plana.
35 a 80cm C	Contacto lítico, arenisca fracturada, color pardo pálido (10YR6/3), estructura de roca, con bloques grandes y fracturas rellenas con suelo transportado desde la superficie.

- Perfil 2.

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Zona 1, extremo nororiental del lote 51, junto a la cerca. *Relieve*: Quebrado. Pendiente: 30%.
Drenaje natural: Bien drenado
Vegetación actual: Pasto Kikuyo.
Uso Actual: Pradera, vegetación herbácea.
Material parental: Materiales transportados, relleno.
Taxonomía del perfil: No presenta, por ser material de relleno.

Descripción del perfil:

Ap 0 a 1.0 m	Relleno con matriz de color pardo rojizo oscuro (5YR3/3), textura limosa; estructura migajosa, débil, con presencia de residuos de roca arenisca, escombros de construcción y restos de basura; consistencia de la matriz suelta, friable, plástica y pegajosa; poros medianos, abundantes; actividad de edafofauna escasa, raicillas abundantes, finas y medias; no se detectan carbonatos (reacción al HCl negativa), la materia orgánica es muy baja (reacción al H_2O_2 negativa) y no se detectan cenizas volcánicas (reacción al NaF negativa); no se observa cambio de material a 1.0 m de profundidad

- Perfil 3.

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Extremo norte de la Zona 2
Relieve: Plano. Pendiente: 5%.
Drenaje natural: Regular a mal drenado
Vegetación actual: No hay cobertura vegetal.
Uso Actual: Lote vacío, depósito de materiales y escombros.
Taxonomía del perfil: No presenta, por ser material de relleno.

Descripción del perfil:

0 a 1.0 m Relleno con matriz de color pardo (10YR5/3), textura arcillo arenosa con materiales limosos; estructura migajosa, débil, con presencia de escombros de construcción y algunos fragmentos de roca; consistencia de la matriz firme, friable, ligeramente plástica y pegajosa; poros pequeños, abundantes; actividad de edafofauna escasa, raicillas inexistentes; no se detectan carbonatos (reacción al HCl negativa), la materia orgánica es muy baja (reacción al H_2O_2 negativa) y no se detectan cenizas volcánicas (reacción al NaF negativa); no se observa cambio de material a 1.0 m de profundidad.

- Perfil 4.

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Zona 1, costado sur del lote 49.
Relieve: Ligeramente ondulado. Pendiente: 10%.
Drenaje natural: Imperfectamente drenado
Vegetación actual: Pasto Kikuyo.
Cobertura: Superior al 90%
Uso Actual: Pradera, zona verde.
Taxonomía del perfil: No presenta, por ser material de relleno.

Descripción del perfil:

0 a 35 cm Relleno con matriz de color café oscuro (7.5YR3/2), textura variable, desde francoarenosa a francoarcillosa, según el material que se analice; estructura granular, gruesa, débil, con presencia de escombros de construcción y algunos fragmentos de roca; consistencia de la matriz suelta, friable, plástica y ligeramente pegajosa; poros medianos y grandes, abundantes; actividad de edafofauna moderada, raicillas finas abundantes en los 15 cm superficiales; no se detectan carbonatos (reacción al HCl negativa), presenta materia orgánica (reacción al H_2O_2 positiva) y no se detectan cenizas volcánicas (reacción al NaF negativa); no se observa cambio de material a mayor profundidad

- Perfil 5.

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Zona 1, junto al bloque 16 del conjunto.
Relieve: Plano. Pendiente: máximo 5%.
Drenaje natural: Bien drenado
Vegetación actual: Pasto Kikuyo.
Cobertura: 90%
Uso Actual: Pradera, zona verde.
Taxonomía del perfil: No presenta, por ser material de relleno.

Descripción del perfil:

0 a 35 cm: Relleno con matriz de color pardo amarillo (10YR5/6), textura variable, desde francoarenosa a arcillosa, según el material que se analice, estructura granular, gruesa, débil, con presencia de fracmentos de roca y escombros de construcción; consistencia de la matriz suelta, friable, ligeramente plástica y ligeramente pegajosa; poros finos y medianos, abundantes; actividad de edafofauna escasa, raicillas finas abundantes en los 20 cm superficiales; no se detectan carbonatos (reacción al HCl negativa), la materia orgánica es muy baja (reacción al H_2O_2 negativa) y no se detectan cenizas volcánicas (reacción al NaF negativa); no se observa cambio de material a mayor profundidad.

- Perfil 6.

Fecha de descripción: 13 de Octubre de 2000
Localización: Extremo oriental del escarpe del la zona 3.
Relieve: Escarpado Pendiente 75%.
Drenaje natural: Bien drenado
Vegetación actual: No existe.
Cobertura: 0%
Uso Actual: Relicto del frente de explotación minera, sin uso aparente.
Material parental: Arenita fracturada.
Horizontes diagnósticos: Superficial, ócrico
Subsuperficial, contacto lítico (roca)
Taxonomía del perfil: Entisol.

Descripción del perfil:

0 a 60 cm Au: Color café oscuro (7.5YR4/2); textura franco limosa; estructura en bloques, medianos, firmes; consistencia firme, friable, ligeramente pegajosa y no plástica; abundantes poros medianos; actividad de edafofauna moderada, raicillas abundantes, finas y medias; reacción al HCl negativa, al H_2O_2 negativa y al NaF negativa; límite abrupto, de topografía plana.

60 a 170 cm: Color pardo amarillo (10YR5/8), estructura de roca, con bloques grandes, consistencia extremadamente dura, nula actividad de edafofauna, sin

raicillas, no presenta reacción al HCl, al H_2O_2 , ni al NaF. Límite abrupto y plano.

170 a 220 cm Color gris (7.5YR6/0) con manchas amarillo rojizo (7.5YR7/6) y moteados café rojizo oscuro (2.5YR3/4), de textura arcillosa, estructura en bloques angulares gruesos, consistencia muy dura, firme, plástica y pegajosa, nula actividad de edafofauna, sin raicillas, no presenta reacción al HCl, al H_2O_2 , ni al NaF.

7.4.3 Método de estudio para la estimación de pérdida de suelo por erosión pluvial

Para la estimación de la pérdida de suelo por erosión pluvial en el barrio Buenos Aires se utilizó el modelo matemático propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), o Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, que correlaciona factores de erosión (lluvia - viento), propiedades del suelo y condiciones que afectan el proceso de erosión.

La expresión matemática del modelo es:

$$\mathbf{E = R \times K \times LS \times P \times C}$$

donde:

E: pérdida de suelos (ton/ha/año)
R: Erosividad de la lluvia, en función de su energía cinética (J/m^2), si la lluvia se expresa en mm y (MJ/m^2), si se expresa en cm.
K: erosionabilidad del suelo (adimensional), con valores entre 0.1 y 1.0 cuando la lluvia se expresa en cm; o valores entre 0.01 y 0.001, cuando la lluvia se expresa en mm.
L: Longitud de la pendiente, expresada en m.
S: Grado de pendiente, expresado en %.
P: Prácticas de conservación de suelos (mecánicas, biológicas).
C: Cobertura vegetal.

Para estimar cada uno de los factores involucrados en la ecuación anterior se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión de información básica:

  Plano topográfico del área de estudio
  Información meteorológica: Precipitación máximas en 24 horas y máximos mensuales
  Información referente al medio físico: clima, vegetación, suelos, geología, hidrología.
  Información relacionada con la aplicación del modelo USDA para la estimación de la pérdida de suelo.

- Reconocimiento del terreno, y ensayos de campo, el cual incluyó una visita técnica a la zona de estudio para realizar descripción de suelos, toma de muestras, ensayos de infiltración y localización de procesos de erosión, así como identificación de tipos de vegetación.

- Cartografía analítica o superposición de planos temáticos de vegetación y de pendientes, que permitió detectar zonas homogéneas en cuanto a cobertura vegetal, pendiente, prácticas de control de erosión y suelos.

7.4.4 Base teórica

- Factor R: *Erosividad*.

Definido por Wischmeier (1959) como el producto de dos características de la lluvia: la intensidad máxima (en 30 minutos) y la energía cinética. El modelo matemático se logró tras el análisis del tamaño de la gota y la correspondiente velocidad terminal. La ecuación de regresión que describe la energía cinética es:

$$Ec = 1.213 + \log_{10} I$$

donde *Ec*: Energía cinética (Kgm / m^2 mm)
I: Intensidad de la lluvia (mm/h)

La energía cinética para un incremento en la intensidad se obtiene multiplicando la energía cinética estimada mediante la ecuación por la cantidad de lluvia correspondiente al incremento de *I*. La Ec de un aguacero puede ser calculada sumando la Ec calculada para cada incremento en la intensidad de un aguacero. Los análisis de regresión muestran que las cantidades de suelo perdido durante fuertes aguaceros correlacionan con el producto de la Ec total con la intensidad *I* en 30 minutos (Wischmeier, 1959).

Este producto, designado como *EI* es la medida del modo como se combina la intensidad y la Ec en las tormentas y define la combinación de efectos del impacto de las gotas de lluvia y su turbulencia con el transporte de las partículas del suelo.

El factor Erosividad, R, se obtiene dividiendo el producto *EI* por 173,6.

El computo del factor Erosividad de la lluvia, para una tormenta se define como:

$$R = \{ \Sigma^{n}_{j=1}(1.213 + 0.89 \, \mathrm{Log}_{10} \, \mathrm{I}j) \, (\mathrm{I}j\mathrm{T}j)\} \, \mathrm{I}_{30}$$
$$(173.6)$$

donde:

R: Indice de erosividad
Ij: Intensidad para un incremento j en el aguacero, mm/h
Tj: periodo de tiempo para el incremento j, hr.
I_{30} : Intensidad máxima en 30 minutos del aguacero, mm/hr
j: Incremento específico en la lluvia
n: Numero de incrementos del evento.

Según varios estudios, se establece que para aguaceros el tamaño de gota mediano no incrementa la intensidad por encima de 79.2 mm/hr (Carter y otros, 1974; Hudson, 1971); Entonces, este límite fue usado para calcular la Ec por unidad de lluvia por la ecuación. También se recomienda que el límite 63.5 mm/hr se use en el componente I_{30} de la ecuación.

Cuando se dispone sólo de información pluviométrica se utiliza el modelo de Fournier, para la determinación del factor R, erosividad.

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

Donde R es el índice de erosividad; *p* es la precipitación momentánea (horaria, diaria, mensual), *P* es la precipitación total del período estudiado y n es el número de años.

- Factor K, *Erodabilidad.*

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

Para hallar el valor K, se emplean 5 propiedades del suelo, que se relacionan mediante el nomograma aceptado por el USDA:

- % limo + Arena muy fina
- % Arena con diámetro mayor a 0.1mm
- Contenido de materia orgánica, %
- Estructura del suelo
- Permeabilidad

Para el cálculo del factor K cuando el porcentaje de materia orgánica no es un número entero, se utiliza el modelo matemático cuya expresión es:

$$\mathbf{100K = (2.1\ M^{1.14}\ x\ 10^{-4})(\ 12\text{-}a\ ) = 3.25\ (b\text{-}2) + [\ 2.5\ (\ c\text{-}3\ )\ ]}$$

donde:

K: Indice de erodabilidad
M: (%limo + Arena Muy Fina)(100 - %Arcillas)
a: % de Materia orgánica
b: Estructura del suelo
c: Permeabilidad
100: Factor de conversión cuando la lluvia está referida en centímetros; 1000 cuando la lluvia está en milímetros.

- Factor LS, *Longitud y grado de pendiente.*

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

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

Para la determinación del factor que mide el efecto de la longitud y grado de pendiente (LS) se utilizó el mapa de pendientes de la zona de estudio y se aplicó la siguiente ecuación:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{a}\right)^{m}\left(\frac{b + cS + dS}{e}\right)$$

Donde:

λ: Longitud de la pendiente en metros
m Constante que depende del grado de pendiente
S Grado de pendiente
a, b, c, d y *e* constantes.

- Factor C C*obertura vegetal.*

Relaciona el tipo de vegetación y la cobertura vegetal con la erosión originada por la lluvia; el efecto de la vegetación se observa en cuatro aspectos:

- Intercepción de la lluvia por la cubierta vegetal.

- Disminución de la velocidad de escurrimiento y acción cortante del agua.

- Aumento de la granulación del suelo por efecto de las raíces, además del aumento de la porosidad y actividad biológica.

- Incremento de la transpiración, conducente a desecación del suelo.

La vegetación ejerce un efecto protector sobre el suelo, según sus exigencias en labores culturales (cultivos) y la cobertura vegetal formada; a mayor cobertura vegetal, menor erosión del suelo. Los cultivos de ciclo corto causan mayor erosión que la vegetación perenne o los sistemas boscosos.

- Factor P, *Prácticas de manejo o protección.*

Es posible modificar ciertas propiedades del suelo con la implementación de prácticas de manejo. Así pues, la labranza excesiva destruye la estructura del suelo facilitando el arrastre de sedimentos y nutrientes, disminuyendo la productividad del suelo.

7.4.5 Análisis de resultados

A continuación se presentan y analizan los resultados obtenidos.

- Factor Erosividad (R):

Se utilizó información pluviométrica reportada como precipitación total mensual, para un periodo de 10 años (1989 - 1998). El valor calculado para el Factor Erosividad fue de 121.30. Este valor muestra condiciones de lluvias intensas, con apreciable capacidad de erosión.

- Factor erodabilidad (K):

Para la evaluación del Factor K, se utilizaron los resultados de los análisis de laboratorio realizados sobre muestras representativas de los materiales expuestos a la acción de la lluvia (especialmente la granulometría), así como el análisis en campo de la infiltración.

– Granulometría.

  Los suelos del área de estudio poseen contenido moderado de limos y arenas muy finas, con un rango de 28 a 52%. El contenido de materia orgánica es muy variable para el horizonte superficial, dependiendo del material que se encuentre, mientras que para los horizontes subsuperficiales este valor es muy bajo (0.1%).

  En la **Tabla 7-1** se presenta la distribución granulométrica de las muestras tomadas en campo.

Tabla 7-1. Distribución granulométrica de los materiales

Tamaño de las partículas (mm)	PORCENTAJE			
	Muestra P4A1	Muestra P5A1	Muestra P6A1	Muestra P6C1
	1.0	0.7	1.65	
2.0 a 1.0	3.0	1.6	0.50	
1.0 a 0.5	4.5	2.2	2.0	
0.5 a 0.25	6.5	15.0	1.75	
0.25 a 0.1	8.0	17.0	0.50	
0.10 a 0.02	26.0	10.5	2.0	16.2
0.02 a 0.002	18.0	14.5	26.0	42.6
menor a 0.002	11.0	13.0	52.0	41.2
Arena	45	62	20	0
Limo	44	25	28	58.8
Arcilla	11	13	52	41.2
APRECIACION	Franco	Franco arenoso	Arcilloso	Arcillo limoso

La estructura depende del tipo de material y varía desde granular gruesa hasta migajosa media, con agregación débil a moderada, según lo expresado en la descripción de perfiles. Todos los suelos presentan buen drenaje.

- Infiltración:

  Los ensayos realizados para obtener el valor de la infiltración en los materiales del área de estudio se presentaron en el numeral 5.6 del capítulo 5 del Informe 2 del presente trabajo; sin embargo, en el **Anexo 4** del presente trabajo se estima el valor de la permeabilidad K a partir de estas pruebas de infiltración, empleando el método propuesto por A.J. González G. (1987).

En la tabla siguiente se presentan los resultados de la evaluación del factor de erodabilidad K para diferentes sitios en la zona de estudio.

Tabla 7-2. Valores estimados del factor K, erodabilidad

DETERMINACION	MUESTRA			
	P4 A1	P3A1	P6A1	P6C1
% materia orgánica	9.2	1.1	2.9	0.0
% Arcillas (ϕ < 0.002)	11	13	52	41.2
% Limo más arena muy fina (ϕ entre 0.1 y 0.002) (ϕ < 0.1)	52	42	28.5	58.8
% Arenas	37	45	19.5	0
Apreciación	Franco	Franco arenoso	Arcilloso	Arcillo limoso
Estructura	granular fina 2	granular fina 2	blocosa gruesa 4	blocosa fina 3
Permeabilidad	11 cm/h Moderadamente	0.65 cm/h Moderadamente	1.8 cm/h moderada	1.8 cm/h moderada

DETERMINACION	MUESTRA			
	P4 A1	P3A1	P6A1	P6C1
Calificación USDA	rápida 2	lenta 4	3	3
Factor K	**0.049**	**0.223**	**0.105**	**0.234**
Clasificación	**Baja**	**Media**	**Baja**	**Media**

Como se aprecia en la tabla, los valores del Factor K para los suelos y materiales de la zona, oscilan entre 0.049 y 0.234, indicando materiales con susceptibilidad moderada al efecto erosivo de la lluvia. Las muestras 4A-1 y 6A-1, con mayor contenido de materia orgánica, tienen una agregación de partículas mas fuerte, ofreciendo mayor resistencia a la erosión que las muestras 3A-1 y 6C-1. La muestra 6C-1 corresponde a la capa de arcillolita, ubicada debajo de las areniscas en los escarpes, presenta una mayor erodabilidad que significa mayor pérdida de sedimento y por ende, pérdida de sustento para la capa de roca arenisca que descansa sobre ésta.

- Factor de pendiente (LS):

Las pendientes en el área de estudio son muy variadas: desde el rango de ligeramente plano (menor al 30%) a ondulado (entre 30 y 60%), pasando por quebrado (entre 60 y 100%), hasta muy escarpado (superior al 100%) en los taludes. En la **Tabla 7-3** se resumen las pendientes y longitudes en el área de estudio.

Tabla 7-3. Valores de longitud, pendiente y factor LS

Pendiente %	Longitud m	Factor L	Factor S	Factor LS	
				Individual	promedio
menor de 30%	10 50	0.6722 1.5031	7.2780	4.8924 10.9398	7.9162
30-60%	2.5 40	0.3361 1.3444	7.2780 26.1953	2.4462 35.2179	18.8321
60- 100 %	3 10	0.3681 0.6722	26.1953 69.6249	9.6448 46.8030	28.2240
mayor de 100%	2.5 10	0.3361 0.6722	69.6249	23.4015 46.8030	35.1023

De la tabla anterior se destaca el alto valor de LS para las zonas de pendientes altas, situación que incrementa la escorrentía; en el caso del afloramiento de arcillolita susceptible a la erosión la alta pendiente agrava la situación, favoreciendo la pérdida de sedimentos desde los taludes.

- Factor de Cobertura superficial (C)

En la zona de estudio se encontraron áreas con vegetación herbácea y arbustiva con cobertura sobre el suelo superior al 90%, principalmente en el relleno de la zona 1 y sobre el escarpe de las zonas 3 y 4, mientras que en el relleno de la zona 2 no se presenta vegetación y la cobertura vegetal es menor al 1%. Las vías de acceso al barrio, así como a las viviendas presentan adecuada cobertura ya sea de asfalto o de cemento.

De este modo el área que se encuentra expuesta a la acción de los agentes erosivos se encuentra en las zonas 2 y 3, que en gran porcentaje tienen relieve plano. Sin embargo, los taludes verticales del escarpe se hallan sin cobertura, lo cual unido a la susceptibilidad a la erosión de las arcillolitas y a la alta pendiente los hacen una zona de especial interés en cuanto a pérdida de suelo por erosión pluvial.

En la **Tabla 7-4** se muestran los valores del factor C en cada caso.

Tabla 7-4 Valores del factor C - Cobertura

COBERTURA		FACTOR C
TIPO	UBICACIÓN	
Vegetación espontánea con C.V. mayor al 75%	Relleno de la zona 1, Talud superior del escarpe de la zona 3 y la zona 4	0.003
Zonas pavimentadas o cementadas	Principales vías de acceso a las viviendas	0.003
Sin cobertura, suelo desnudo	Relleno y talud del escarpe de la zona 2, talud inferior del escarpe de la zona 3 y algunas áreas de la parte plana de éste talud.	1.0

- Factor Prácticas de conservación (P)

No se evidencia prácticas de conservación de suelos ni de manejo del agua de escorrentía, por lo que a éste factor se le asignó el valor de 1 para el modelo de predicción de pérdida de suelo.

7.4.6 Pérdida de suelos E

La zonificación de pérdida de suelo en la zona de estudio se realizó por superposición de mapas temáticos de cobertura superficial (**Figura 7-3**) y mapa de pendientes (**Figura 7-2**). Con base en los resultados obtenidos para cada parámetro y en las condiciones de relieve y cobertura, se construyó la matriz de la **Tabla 7-5**, donde se muestran los resultados al aplicar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS). Este resultado se presenta gráficamente en la **Figura 7-4**.

Tabla 7-5. Resultados totales de los factores de la EUPS

FACTOR	ZONA						
	Relieve variable	Relieve plano a ligeramente ondulado		Relieve ondulado a quebrado		Relieve escarpado	
	Vías pavimentadas	Cobertura mayor a 75%	Sin cobertura	Cobertura mayor a 75%	Sin cobertura	Cobertura mayor a 75%	Sin cobertura
R	121.30	121.30	121.30	121.30	121.30	121.30	121.30
K	0.049	0.049	0.223	0.105	0.223	0.105	0.234
LS	7.9162	7.9162	7.9162	28.22	28.22	35.10	35.10
C	0.003	0.003	1.0	0.003	1.0	0.003	1.0
P	1	1	1	1	1	1	1
E (ton/ha/año)	**0.141**	**0.141**	**2.290**	**1.078**	**763.35**	**1.341**	**996.28**
Clasificación	**no hay**	**no hay**	**ligera**	**ligera**	**muy severa**	**ligera**	**muy severa**

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

Tabla 7-6. Clasificación de la pérdida de suelo

PERDIDA DE SUELO (ton/ha/año)	CLASIFICACION
0	Ninguna
Menor de 2.5	Ligera
De 2.5 a 10	Moderada
De 10 a 25	Severa
Mayor de 25	Muy severa

La pendiente y la falta de cobertura superficial son factores determinantes de la pérdida de suelos en la zona de estudio. Las características físicas y químicas de los suelos hacen que sean moderadamente susceptibles a la acción erosiva de la lluvia, aspecto que se mitiga en algunos casos por la presencia de alta cobertura superficial (vegetación, cemento o asfalto).

La situación es crítica para el caso de los taludes de los escarpes donde se presenta afloramiento de capas de arcillolita altamente susceptibles a la erosión, que al ser erosionadas dejan sin sustento a las capas superiores de roca arenisca fracturada, provocando caída de bloques sobre las casas vecinas.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que el mayor porcentaje de pérdida de suelos por erosión pluvial se concentra en las zonas con pendientes muy elevadas desprotegidas de cubierta vegetal, que corresponden a los taludes de los frentes de explotación mineral, zonas 2, 3 y 4; específicamente la erosión ocurre sobre las capas de arcillolita que afloran en el talud.

También pude decirse que la zona de los rellenos presenta un comportamiento irrelevante en cuanto a pérdida de suelos, siendo ligera en ambos casos. En el relleno sin cobertura vegetal (zona 2) no se pierde suelo debido al relieve plano que minimiza la escorrentía y en el relleno con cobertura vegetal (zona 1), a pesar

de las fuertes pendientes, no se pierde suelo por que la superficie se encuentra protegida de la acción erosiva de la lluvia. En éste caso, ocurren movimientos del relleno sin presencia de la erosión.

7.5 Factores detonantes

Sobre el proceso de deslizamiento que se presenta en la Zona 1, se considera como factor detonante el aporte continuo de agua potable y aguas servidas a los materiales de la ladera.

Adicionalmente, gracias al análisis de la pérdida de suelos se pudo concluir que para las Zonas 2 y 3, la ausencia de cobertura de los taludes, la precipitación y la pendiente son los factores que promueven el proceso de desprendimiento de bloques; sin embargo, no se puede desconocer que en la ocurrencia de este fenómeno influye también la intervención antrópica de los taludes al realizar excavaciones en la pata de los mismos.

Adicionalmente, aunque el presente estudio solo se refiere a la amenaza por efectos de remoción en masa, es claro que un evento sísmico de cierta magnitud puede generar pérdidas muy grandes.

7.6 Zonificación de amenazas por FRM

7.6.1 Amenaza actual

Los parámetros considerados para la zonificación de amenaza actual por FRM en el área de estudio fueron los siguientes:

- El factor de seguridad FS de las masas susceptibles de deslizarse en las Zonas 1 y 4, calculado con base en los análisis de estabilidad presentados en el numeral **6.3.1.** La categoría de amenaza (alta, media o baja) fue adoptada de la "Guía metodológica para la cuantificación de la evaluación de amenaza por fenómenos de remoción en masa", presentada al final de la Resolución No. 364 del 17 de octubre de 2000 de la Secretaría Distrital de Gobierno - Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá.

- Probabilidad de caída de rocas a corto plazo con base en la relación de la probabilidad de ocurrencia de las condiciones extremas de los factores detonantes. La categoría de la amenaza (alta, media o baja) fue determinada según las condiciones actuales de equilibrio de los bloques y las emergencias que ha generado en fenómeno en el pasado.

- Adicionalmente, en la categorización fue reforzada con el criterio y experiencia de los profesionales que han participado en el estudio.

Con base en éstos, los rangos establecidos para la zonificación por amenaza actual y las características de cada uno son:

7.6.1.1 Zona 1

- **Amenaza alta**

Alta probabilidad de reactivación y retrogresión del deslizamiento rotacional múltiple de la parte superior de la zona y de intensificación del movimiento traslacional a continuación del anterior.

Alta probabilidad de erosión y reactivación del deslizamiento traslacional en la pata, con avance sobre la Carrera 2ª A.

- **Amenaza media**

La constituye una franja vecina a la corona del deslizamiento actual y a los bloques de vivienda de los predios 57 y 58, y franjas de los flancos del flujo de tierras actual, expuestas a flujo de tierras lento a muy lento que pueden actuar sobre los predios 48, 49, 50 y 52.

También entra aquí la faja vecina a la pata de a zona, sobre la Cra 2ª A y un sector del flanco derecho, donde pueden ocurrir flujos de detritos procedentes de escarpes de poca altura o de excavaciones para construcción arriba del predio 49 y al lado oriental del 48, así como avance de materiales en flujo de tierras sobre la Cra. 2ª A y los predios 41 a 45.

- **Amenaza baja**

Sectores planos al oriente y sureste de la corona del deslizamiento y de los predios 57 y 58. Ladera al sur y occidente del flanco izquierdo del deslizamiento – flujo de tierras actual, que desciende con pendiente moderada hacia el área de parqueaderos y caseta de entrada al conjunto residencia; dicha ladera muestra señales de reptación superficial.

7.6.1.2 Zona 2

- **Amenaza alta**

Abarca escarpe vertical con sectores locales en extraplomo (o talud negativo) por influencia de un sistema de diaclasas con tal dirección; además, una faja de la parte plana paralela a la pata del escarpe puede ser cubierta por bloques rocosos y detritos desprendidos de aquél.

Alta probabilidad de desprendimiento y caída de bloques precedido o no por volcamiento, y acompañado de la generación de grietas de tracción y separación incipiente de nuevos bloques atrás de la corona actual. Las dimensiones de los bloques fluctúa entre 0.6 y 2.2 m (con volúmenes variables entre 0.7 y 6.3 m^3). La faja de la pata corresponde a la distancia de recorrido de bloques calculada y comprobada en sitio, igual a dos veces la altura del talud.

Puede haber también alta probabilidad de infiltración de agua por las discontinuidades de la arenisca superior, erosión, ablandamiento y degradación general (meteorización diferencial) de la arcillolita subyacente que ocupa la mitad inferior del talud. En vista de lo anterior, la faja paralela a la pata del talud puede sufrir impacto y cubrimiento por el derrumbe.

- **Amenaza media**

Comprende la faja adyacente a la corona del talud (afloramiento de arenita) en la cual puede ocurrir incremento de la abertura de diaclasas sensiblemente paralelas a dicha corona e iniciación de un proceso de volcamiento de bloques. Además, incluye una franja de la parte plana (relleno artificial) a continuación de la faja vecina a la pata del talud, hasta la cual podría ocurrir el desplazamiento ocasional de bloques de arenita o de flujos de lodo locales originados en sitios de alta humedad de la mitad inferior del talud, especialmente del contacto arenita / arcillolita.

- **Amenaza baja**

Corresponde a una faja situada al occidente y suroccidente de la corona del talud, de topografía plana, cubierta de pasto, y dentro de la malla de cerramiento del Conjunto Residencial, algo apartada de zonas construidas.

Incluye el cuerpo del relleno artificial con superficie plana aunque alterada por frecuentes montones de materiales de desecho y recebo sueltos. Es una zona en preparación para construir viviendas en la cual pueden presentarse asentamientos diferenciales debido a la heterogeneidad de materiales que la forman y la variabilidad en grado de compactación de éstos o la existencia eventual de suelos orgánicos en la base del relleno.

7.6.1.3 Zona 3

- **Amenaza alta**

Alta probabilidad de desprendimiento y caída de bloques rocosos de la arenisca de la parte superior del talud, y de flujos de detritos de la arcillolita de la parte inferior del mismo, favorecida por separación entre diaclasas de 0.4 a 1.0 m e infiltración en la arenisca, ablandamiento y degradación avanzada en la arcillolita.

La distancia de recorrido de los bloques supera varias veces a la distancia que existe entre el talud y el muro posterior de las casas vecinas, sin que dichos muros ofrezcan (en el caso de que existan) la capacidad estructural suficiente para soportar el impacto de bloques. En la totalidad de la zona, la arcillolita sufre intensa degradación por erosión pluvial y cambios climáticos; esto elimina el soporte de los bloques de arenisca y origina flujos de lodo locales que colmatan el espacio existente entre el talud y las viviendas.

En el extremo nororiental de la zona existen altas probabilidades de deslizamientos masivos de arenisca y arcillolita meteorizada, propiciadas por la mayor altura del talud y las condiciones de los materiales existentes (muy alterados y muy alterables).

- **Amenaza media**

Faja del terreno en la plataforma vecina a la corona del talud, a la cual puede extenderse el proceso de separación, volcamiento o desprendimiento previo a la caída de bloques de arenita, o iniciarse flujos de detritos pequeños y locales de material meteorizado.

En la base del talud abarca una franja de las viviendas 17, 19 y 23 a 34 de ancho igual a aproximadamente de 1/3 del ancho de aquellas, que podría ser afectado por bloques rocosos en desplazamiento (los de tamaño mayor entre los que caigan del talud).

- **Amenaza baja**

Comprende la mayor parte de la plataforma superior y el talud empradizado que se eleva desde ésta hacia la malla de cerramiento de os bloques residenciales de Altos del Sol. También incluye la parte restante (no en amenaza alta ni media) de las viviendas de los predios 17, 19 y 23 a 34 hasta la cual no alcanzarán a llegar bloques rocosos caídos del talud.

7.6.1.4 Zona 4

- **Amenaza alta**

Abarca una parte del talud sur – suroeste del área estudiada, con alta probabilidad de desprendimiento y caída de bloques de arenita de estratos que afloran tanto en la corona del talud como en los bordes superior e inferior del tercio medio del mismo. Favorece el volcamiento previo a la caída la existencia de algunas diaclasas con inclinación a extraplomo. Existe nacimiento de aguas en una concavidad de la parte superior del talud, de la cual pueden originarse flujos de lodo pequeños.

En la faja inmediata a la base del talud hay alta probabilidad de impacto y cubrimiento de bloques esporádicos, y de reactivación de flujos de tierra o de lodos a partir de depósitos similares a conos de deyección formados por flujos recientes.

- **Amenaza media**

Se califica en esta categoría la faja inmediata al norte de la corona del talud, hasta la malla de cerramiento del Conjunto Residencial, y al occidente de la parte sur del talud donde éste va perdiendo altura, hasta mitad de la distancia entre la corona del talud y las edificaciones que limitan el área estudiada por el oeste. El terreno comprendido muestra en la actualidad condiciones de flujo de tierras lento a muy lento, en las capas superficiales de suelo.

A partir de la base del talud, al sur de ésta, se incluye una faja propensa a recibir materiales caídos o en flujo que acrecientan o extiendan los depósitos existentes.

- **Amenaza baja**

Se incluye aquí el resto de la parte baja de la zona, alrededor de los predios 1 a 5 y sobre el costado norte de la Cra. 3ª, donde puede ocurrir el depósito eventual y en pequeñas proporciones, de flujos de lodo desprendidos del talud y que pudieran sobrepasar la faja de amenaza media siguiendo cañadas del terreno.

7.6.2 Largo plazo

Para la zonificación de amenaza a largo plazo (**Plano 7**), se consideraron los análisis presentados en los numerales **6.4.2** y **6.4.4.**; las características de cada rango establecido son las siguientes:

7.6.2.1 Zona 1

- **Amenaza alta**

Ante intervención nula en la actualidad, pueden aumentar las probabilidades de retrogresión en la corona del deslizamiento rotacional, y de ampliación del movimiento rotacional en los flancos y del cuerpo en traslación en la pata del caso principal superior. Por esta razón, el área de amenaza media actual (año 2000) en esta zona, se convierte en amenaza alta, incrementando así a esta última. Igualmente se prevé la intensificación y ampliación lateral del deslizamiento traslacional de la parte inferior de la zona, sobre la Cra 2ª A.

- **Amenaza media**

Alta probabilidad de que la zona en reptación actual (de amenaza baja) se

convierta en flujo o deslizamiento que involucre un mayor volumen de materiales.

- **Amenaza baja**

Comprende la parte baja de la zona, que no se vería afectada por los diferentes tipos de FRM que se encuentran en el área.

7.6.2.2 Zona 2

- **Amenaza alta**

En el caso de no adoptar medidas correctivas en el presente, los fenómenos degradacionales podrán activarse periódicamente de manera que afectarán fajas de la corona y la pata del talud de dimensiones similares a las de los procesos actuales.

- **Amenaza media**

Corresponde a la zona de amenaza baja actual situada al suroccidente de la corona del talud, a la cual podría propagarse la ampliación de diaclasas y el comienzo del volcamiento de bloques de arenita. Junto con lo anterior podría entrar un flujo de tierras lento a muy lento y de espesor reducido la cobertura de suelo y pasto vecina al cerramiento del Conjunto Residencial.

- **Amenaza baja**

Abarca el área de patios de los bloques residenciales de la parte superior del talud y la mayor parte del relleno artificial, a suficiente distancia de la faja de posible afectación por caída de bloques de arenita o flujos de lodo locales de la arcillolita meteorizada.

7.6.2.3 Zona 3

- **Amenaza alta**

En caso de no controlar los problemas actuales continuará la degradación de la arcillolita y la caída de bloques de arenisca, en una faja de ancho moderado en el borde superior del talud de toda la zona, con un mayor ancho en el promontorio del extremo nororiental y en el sector altamente meteorizado del extremo suroccidental.

En el extremo noreste pueden incrementarse las probabilidades de deslizamiento masivo (superficie de falla compuesta) en roca muy meteorizada en el sector más cercano a la “nariz” (convexidad) del promontorio actual. En el extremo suroeste pueden incrementarse las probabilidades de deslizamiento rotacional poco

profundo – flujo de tierras de la zona superior del talud y el volcamiento y caída de rocas de estratos de arenisca que afloran en sectores intermedios del talud con buzamiento y diaclasamiento desfavorables.

- **Amenaza media**

En la plataforma vecina a la corona del talud sería una faja de ancho igual o ligeramente menor a la de la zona de amenaza media actual (año 2000), hasta la cual se extendería el proceso de ampliación de la abertura de discontinuidades paralelas al talud y volcamiento de bloques previo a la caída. Se considera que este proceso iría decreciendo en intensidad por disminución gradual de la pendiente del talud al progresar la degradación de éste.

- **Amenaza baja**

Comprende lo restante de la plataforma superior y el talud empradizado que se eleva desde ésta hacia la malla de cerramiento de los bloques residenciales de altos del sol. También incluye la parte restante (no en amenaza alta ni media) de las viviendas de los predios 17, 19 y 23 a 34 hasta la cual no alcanzarán a llegar bloques rocosos caídos del talud.

7.6.2.4 Zona 4

- **Amenaza alta**

El área de amenaza alta se vería incrementada por la de amenaza media actual (año 2000), en la cual podrían intensificarse los flujos de tierra superficiales en el talud interviniendo el sector al norte de la malla de cerramiento del Conjunto Residencial. Además aumentaría el avance de los flujos de tierra de la parte inferior de la ladera, en dirección al predio No. 1 y a la Cra. 3ª.

- **Amenaza media**

Entraría en esta categoría un franja del terreno comprendido entre la malla de cerramiento del Conjunto Residencial y los muros de ladrillo de los patios de los bloques vecinos a esta zona. Se podría presentar una mayor tasa de movimiento de flujos de tierra relativamente superficiales; podría afectarse la cimentación de la esquina sur de los patios más cercanos a la concavidad del talud donde hay un nacedero de agua.

En el área adyacente a la base del talud entraría en esta designación de amenaza una faja perimetral en la cual se depositarían bloques y detritos caídos o en flujo desde el talud y que sobrepasarían los depósitos existentes hoy en día (diciembre 2000); además se podría presentar una intensificación o aceleración del flujo de

tierras superficial de la parte sur de la zona en avance al lado del predio 1 hacia la Cra 3ª.

- **Amenaza baja**

Abarca los terrenos restantes de la zona alrededor del perímetro de los predios 1 a 5 y sobre el costado norte de la Cra. 3ª.

7.7 Conclusiones

La ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa (FRM) encontrados en el área de estudio está asociada al aporte de aguas y pérdida de soporte en la pata de la ladera por intervención antrópica (en el caso de los deslizamientos en la Zona 1) y a la pérdida de materiales blandos principalmente por erosión pluvial y manejo inadecuado de aguas lluvias (en el caso de caída de rocas en las zonas 2 y 3); por lo tanto, el control o mitigación de los efectos de estos fenómenos involucra la construcción o adecuación de obras sencillas.

8 EVALUACIÓN Y ANALISIS DE VULNERABILIDAD POR FRM

La vulnerabilidad puede definirse en términos generales como la susceptibilidad que tiene un elemento expuesto (personas, viviendas, obras de ingeniería, cultivos, industrias, etc.) de ser afectado por la manifestación de algún evento físico externo (deslizamiento, sismo, lluvia, erupción volcánica, contaminación ambiental, erosión, accidentes industriales, etc.), afectación que implica necesariamente una pérdida material, la cual se expresa en última instancia como una pérdida económica.

En este capítulo se presentan los conceptos básicos, método utilizado y resultado del análisis de vulnerabilidad física de las viviendas del barrio Buenos Aires, localidad de San Cristóbal; el enfoque conceptual utilizado para este estudio ha seguido en líneas generales lo propuesto por Flageollet (1999) y F. Soler (1999), quienes a su vez utilizan en alto grado conceptos de Leone (1995, 1996); estas propuestas planteadas por Flageollet y Soler han sido adoptadas en Bogotá en varios estudios de riesgo por dichos fenómenos. Sin embargo, aunque el alcance del estudio está referido, como ya se dijo, a la evaluación de la vulnerabilidad física de las viviendas del área de estudio, se intenta también describir algunos componentes socioeconómicos y de percepción de riesgos que tiene la comunidad del sector, con el fin de darle un enfoque más global al análisis de la vulnerabilidad, de acuerdo con algunos de los planteamientos propuestos por G. Wilches-Chaux.

8.1 Método de estudio y procedimiento empleado para determinar la vulnerabilidad física

Siguiendo la metodología propuesta por Leone [(1)] y modificada por Soler et al, la valoración de los posibles daños que podrían causar en las viviendas la ocurrencia o manifestación de los dos tipos de FRM (deslizamiento y caída de rocas), presentada como la vulnerabilidad física de las viviendas en el área de estudio, se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Inventario y evaluación de las condiciones actuales de vulnerabilidad tanto física como social de las viviendas y residentes del sector, mediante la realización de encuestas.

- Clasificación de la tipología de las viviendas y determinación del nivel de daño actual (tanto en elementos estructurales como no estructurales), y el daño potencial que puede ocasionarse en caso de la materialización de eventos amenazantes.

  El alcance del daño ante un fenómeno de deslizamiento depende de la magnitud de la deformación superficial del terreno, la profundidad de la superficie de falla o rotura, el contacto entre la masa en movimiento y la edificación, y para el caso de caída de rocas el daño depende del peso de la masa desprendida, de la energía cinética alcanzada por ésta y del alcance que tengan los bloques al llegar a la suelo. Otros factores que influyen o determinan directamente en el daño que puede sufrir una vivienda expuesta ante un fenómeno amenazante, están relacionados con el tipo de estructura, la calidad de los materiales de construcción y proceso constructivo, así como las características estructurales del muro o cubierta que debe resistir el empuje de la masa en movimiento o el impacto de los bloques desprendidos, variables relacionadas con la resistencia técnica de la construcción

- Grado de exposición de las viviendas ante la amenaza, principalmente en aquellas viviendas situadas en el área de influencia de las zonas de amenaza.

- Relación solicitación - resistencia o daño estructural que puede sufrir la vivienda ante la magnitud del fenómeno materializado.

- Cálculo del Indice de Vulnerabilidad Física (IVF) de cada vivienda, con base en el tipo e intensidad del fenómeno (o solicitación) y las características de los elementos expuestos.

---

1 Leone, F. (1996) Concept de vulnerabilite appliquée L'evaluation des risques generes par les phenomenes de mouvements de terrain. Tesis de doctorado, Universidad J. Fourier, de Grenoble.

8.2 Inventario de viviendas

Con el fin de recoger la información necesaria para la evaluación de la vulnerabilidad del sitio de estudio, tanto desde el punto de vista físico de las viviendas como de los factores socioeconómicos de la comunidad, se adelantó entre los moradores del área una encuesta de 44 preguntas; en el **Anexo 5** se presentan los formularios diligenciados y en la **Figura 8-1** el inventario de viviendas o numeración de lotes establecido.

El formato para la encuesta fue elaborado a partir de formularios empleados durante el desarrollo de trabajos similares, y ajustado de acuerdo con las necesidades específicas del presente estudio; fue por esta razón, y con la intención de involucrar de alguna manera en este tipo de estudios algunos tópicos indispensables en la gestión del riesgo, que se desarrolló la última parte de la encuesta.

8.2.1 Tipificación de viviendas

Durante el ajuste del formulario para el inventario de viviendas de la zona de estudio, se planteó la posibilidad de conservar la caracterización de tipología de viviendas propuesta por Leone y empleada en el desarrollo de estudios similares para la DPAE; en dicha propuesta se clasifican las viviendas desde el tipo B1 (tugurios o ranchos) hasta el tipo B4 (casas de más de dos niveles con estructura y buena calidad de construcción), pasando por las casas en mampostería o prefabricadas (tipo B2) y las casas hasta de dos niveles, con buena calidad de construcción pero sin estructura (tipo B3); sin embargo, debido a que las características socioeconómicas del área de estudio difieren de las de los estudios anteriores (especialmente en el sentido de la estratificación de servicios, pues el barrio Buenos Aires pertenece al estrato 2 mientras que barrios como La Paz o La Carbonera son de estrato 0 y 1), y también a que en los estudios anteriores se presentaron algunas diferencias de opinión con la Interventoría relacionadas con la "tipología de viviendas que debería utilizarse para los estudios detallados", se optó para el presente trabajo emplear una categorización o clasificación de viviendas según el tipo de materiales de construcción y con la cual de alguna manera se hace referencia tácita a la resistencia de las mismas ante manifestaciones de los diferentes FRM típicos o de ocurrencia más probable que pueden afectarlas; dicha clasificación se presenta en la **Tabla 8-1**.

Tabla 8-1 Tipificación de viviendas

TIPO DE EDIFICACION	DESCRIPCION
1	Tugurio o rancho de mampostería.
2	Tugurio o rancho de madera o cartón.
3	Vivienda de mampostería sin refuerzo o vivienda prefabricada.
4	Vivienda de mampostería reforzada.

TIPO DE EDIFICACION	DESCRIPCION
5	Estructura unifamiliar aporticada, de uno o más niveles.
6	Estructura multifamiliar de más de dos niveles.
7	Lote vacío.

Durante el desarrollo del inventario de viviendas y la tipificación de la mismas se tuvo en cuenta el estado actual de los daños y el tipo de fenómenos que en el pasado pudieron afectarlas. El posible grado de afectación (o porcentaje de daños) que podría alcanzar cada vivienda ante la ocurrencia de un nuevo evento amenazante pudo establecerse no solo a partir del nivel de daños sufridos anteriormente, sino también con la ayuda del registro fotográfico que se tiene del área de estudio, especialmente en la zona en que las viviendas pueden verse afectadas (y que de hecho actualmente lo están) por desprendimiento y caída de bloques; dicho registro también fue utilizado para calificar cualitativamente la vulnerabilidad.

En total se evaluaron 58 viviendas. La distribución de la tipología de viviendas se presenta en la **Figura 8-2**; la tabulación de las encuestas, presentadas en gráficos de barras, se muestra en las **Figuras 8-3** a **8-13**; en éstas se resumen los principales aspectos del formato aplicado relativo a las condiciones físicas de las viviendas en la zona de estudio, las condiciones estructurales y el nivel de daño registrado en algunos elementos particulares.

8.2.2 Calificación de daños

Para calificar los daños producidos en las viviendas por la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, se establecieron las 5 categorías indicadas en la **Tabla 8-2**, siguiendo el criterio del DRM (Délégation aux Risques Majeurs); gráficamente, esta calificación se presenta en la **Figura 8-14**.

Tabla 8-2 Calificación de daño actual

CALIFICACION	TIPO DE DAÑO	% DE DAÑO	CARACTERISTICAS
1	Ninguno	0 – 10	Eventualmente, daños leves en elementos no estructurales.
2	Ligero	10 – 30	Fisuración de muros. Reparaciones no urgentes.
3	Moderado	30 – 60	Daños en elementos estructurales. Deformaciones leves.
4	Fuerte	60 – 80	Deformación o fracturación en la estructura.
5	Severo	80 – 100	Desplome parcial o total de la estructura.

8.3 Solicitaciones

Para el presente estudio se entiende como "solicitación" la forma o modo de acción que, sobre las edificaciones existentes, pueden tener los diferentes procesos de remoción en masa en el área de estudio.

Como ya se ha dicho, los fenómenos encontrados en el sitio corresponden a deslizamiento y caída de rocas. La magnitud e intensidad de la acción de un deslizamiento depende del volumen de la masa, el sentido y la velocidad del movimiento y las presiones que puede ejercer sobre las edificaciones, mientras que para la caída de rocas, esta acción depende de la energía, tamaño y alcance horizontal que pueden tener los bloques que se desprenden desde la parte alta de los taludes. Con base en estas características, los daños que pueden sufrir las viviendas se relacionan principalmente con presiones laterales e impactos.

En la **Tabla 8-3** se presenta el rango de solicitación para los dos fenómenos que pueden afectar las viviendas en el área de estudio. Dichos valores fueron adoptados de la Resolución No. 364 emitida el pasado 17 de octubre por la Secretaría Distrital de Gobierno y la DPAE.

Tabla 8-3 Rango de solicitaciones e intensidad destructiva

Tipo de solicitación	Criterio de intensidad	Tipo de parámetro	Escala de intensidad	Potencial destructivo
Presión lateral continuo (PL)	Geometría de la superficie de contacto (SC)	Geométrico	1	SC = 1/3 SE*
			2	SC = 2/3 SE
			3	SC = SE
Impacto (IM)	Energía cinética (EC)	Cinemático	1	EC ≤ 0.1 kJ
			2	EC ≤ 1.0 kJ
			3	EC ≤ 10.0 kJ
			4	EC ≤ 100.0 kJ
			5	EC ≤ 1000.0 kJ

*SE = Superficie expuesta

8.4 Criterios de intensidad

La intensidad de los dos tipos de solicitación identificados se asocian, como se indicó en el numeral anterior, con el empuje que pueden generar los deslizamientos sobre las viviendas o con el impacto de los bloques sobre las viviendas. Con esta información se estableció una matriz para la calificación de la vulnerabilidad:

Tabla 8-4 Matriz de daño para la calificación de la vulnerabilidad según la intensidad de la solicitación

INTENSIDAD (EXPOSICION) SEGUN EL MOVIMIENTO	TIPO DE VIVIENDA						
	1	2	3	4	5	6	7
SC = 1/3 SE	3	4	3	2	2	2	1
SC = 2/3 SE	4	5	4	3	3	3	1

INTENSIDAD (EXPOSICION) SEGUN EL MOVIMIENTO	TIPO DE VIVIENDA						
	1	2	3	4	5	6	7
SC = SE	5	5	5	4	4	4	1
EC ≤ 0.1 kJ	2	3	1	1	1	1	1
EC ≤ 1.0 kJ	3	4	2	1	2	2	1
EC ≤ 10.0 kJ	4	4	3	2	3	3	1
EC ≤ 100.0 kJ	4	5	4	3	4	4	1
EC ≤ 1000.0 kJ	5	5	5	4	5	5	1

Esta matriz fue definida con base en observaciones de campo detalladas (daño actual, sistema estructural y materiales de construcción, especialmente en las estructuras que reciben el efecto de la solicitación - muros o cubierta -, así como el reporte de daños sufridos en el pasado por los dos fenómenos identificados) y en la experiencia de los profesionales participantes en el estudio.

8.5 Resistencia

La resistencia hace referencia a la oposición que ofrece la vivienda (a través de su estructura) ante las solicitaciones o movimientos que pueden afectarla. Esta resistencia u oposición se concentra principalmente en los siguientes elementos estructurales o componentes de las viviendas:

- Zona de afectación por deslizamiento rotacional

  - Tipo y profundidad de la cimentación
  - Tipo de terreno de fundación (relleno, suelo residual, roca meteorizada).
  - Materiales de construcción de la vivienda y el trabajo de conjunto que puedan ofrecer.

- Zona de afectación por caída de roca

  - Sistema estructural
  - Materiales de construcción empleados en la cubierta y muro posterior

8.6 Indice de vulnerabilidad física

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

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

Donde,

Vi : Valor inicial del bien (antes del evento).

Vf : Valor final del bien (después del evento).

Para la evaluación de la vulnerabilidad física de las viviendas se determinaron dos índices de daño, con base en los criterios de tipificación de viviendas presentado en el numeral 8.2.1 y la **Tabla 8-1**:

- Indice de Daño Potencial (IDp), asociado directamente al efecto físico (solicitación) que produce el fenómeno (deslizamiento o caída de rocas).

- Indice de Daño Actual (IDa), o estado actual de la estructura, determinado durante el inventario de viviendas.

Para la cuantificación estos índices de daño (IDa e IDp), se utilizó la teoría de los conjuntos difusos (**Figura 8-15**), adoptando la metodología utilizada para la evaluación de daños durante sismos[3]; de esta forma se determina el porcentaje de daño o índice de pérdidas (IPa, asociado al IDa; y el IPp, asociado al IDp); este porcentaje de pérdidas depende del nivel de confianza en la valoración. Para este caso se adoptó que, para una confianza de 1.0, los rangos de valores de cada ID fueran los propuestos por Leone (1996); para efectos de cálculo se tomó una confianza de 0.5. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 8-5**.

Figura 8-15 Valoración del Indice de Daño (ID) mediante conjuntos difusos

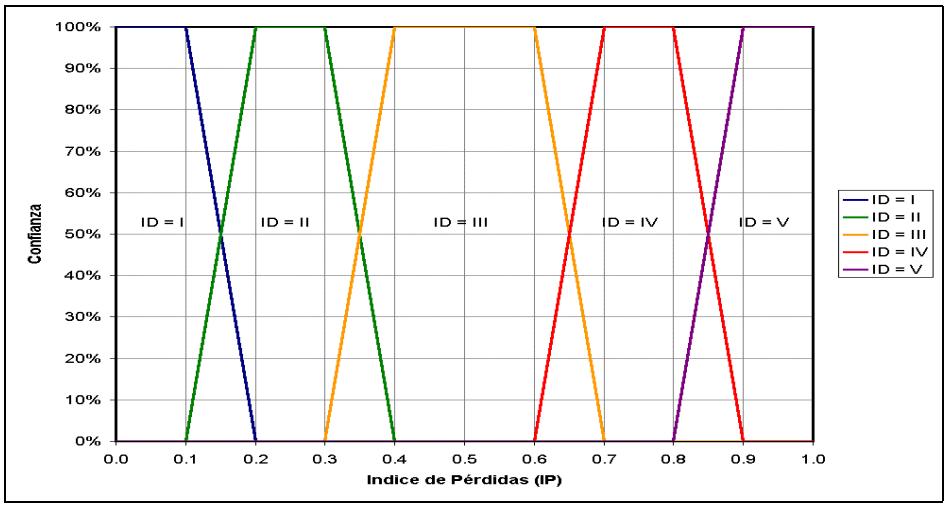


Tabla 8-5 Valores de del Indice de Pérdida (IP) utilizados para la valoración del Indice de Daño (ID)

Indice de Daño	IP MIN	IP MAX
I	0.00	0.15
II	0.15	0.35

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

Indice de Daño	IP MIN	IP MAX
III	0.35	0.65
IV	0.65	0.85
V	0.85	1.00

En teoría, la calificación de la vulnerabilidad deber estar dada como la probabilidad de daño del elemento expuesto (o predisposición del mismo de verse afectado), debido a la ocurrencia o manifestación de un fenómeno determinado.

Para este estudio, la calificación de la vulnerabilidad física de las viviendas se ha determinado mediante el cálculo de un Indice de Vulnerabilidad Física (IVF), con base en el Indice de Pérdidas (IPa e IPp), definido anteriormente; este IVF se ha calculado de la siguiente manera:

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

Debido a que las variables IPp e Ipa de la expresión anterior son dependientes, la valoración del IVF ante FRM resulta compleja del calcular; por lo tanto, se ha utilizado la expresión empírica propuesta por Soler et al[4] para involucrar otras variables diferentes al tipo de solicitación y la tipología de vivienda. De esta forma:

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

donde α es la dependencia o importancia del IPa en la valoración del IVF (0 cuando es mínima y 1 cuando es máxima). A continuación se presenta la gráfica que relaciona el IPp y el IPa con el IVF.

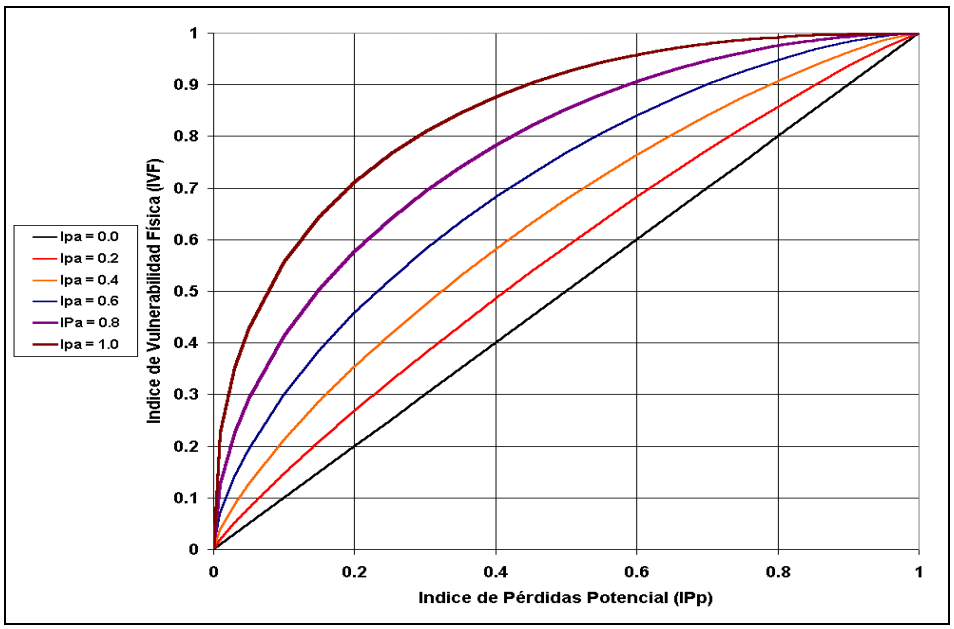
La selección del valor de α se realizó con base en el grado de amenaza por FRM al que se encuentra sometida la estructura:

Tabla 8-6 Valores de α según el grado de amenaza

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

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

Figura 8-16 Cálculo del Indice de Vulnerabilidad Física IVF con base en el Indice de Pérdida IP



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

8.7 Calificación y zonificación de vulnerabilidad física por FRM

Para cada una de las posibles solicitaciones asociadas a la amenaza (empujes laterales e impactos) se calculó un Indice de Vulnerabilidad Física (IVF) de acuerdo con el procedimiento descrito. La calificación de la vulnerabilidad en términos cualitativos (alta, media o baja), se realizó con base en la valoración del IVF tal como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 8-7 Valor cualitativo y cuantitativo de la vulnerabilidad

Categoría de la vulnerabilidad	Valor del IVF
Alta	IVF ≥ 0.65
Media	0.15 ≤ IVF < 0.65
Baja	IVF < 0.15

Los resultados de la evaluación de vulnerabilidad física actual ante la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa se presentan en el **Plano 8**. En la **Tabla 8-8** se resumen algunos aspectos incidentes en esta calificación; igualmente se presenta la calificación cualitativa de amenaza y riesgo. En la **Tabla 8-9** se presenta la valoración de las respuestas de la **Tabla 8-8**.

8.8 Conclusiones de la evaluación de la vulnerabilidad física

Como se ha dicho, la vulnerabilidad física de una vivienda expuesta a la acción de un fenómeno amenazante está relacionada con la resistencia que ésta pueda oponer ante dicha acción. Para fenómenos de deslizamiento y caída de rocas, la resistencia de la vivienda está asociada directamente con el sistema de cimentación y la estructura, así como con las características de los muros o cubierta que reciben el impacto de las masas inestables.

Para el barrio Buenos Aires, la vulnerabilidad física de las viviendas de la Zona 1, afectables por deslizamiento, está relacionada directamente con el tipo y estado del sistema de cimentación y con la condición del suelo de fundación. Para las viviendas de la Zona 3, afectables por caída de rocas, la vulnerabilidad física se asocia con el sistema estructural y las condiciones (o materiales) de la cubierta y el muro posterior de la vivienda; en ambos casos (afectación por deslizamiento y por caída de bloques) tiene incidencia importante el estado de daño actual.

8.8.1 Condición del suelo de fundación

Solo el 3.5% de las viviendas del área de estudio se encuentran cimentadas sobre un relleno (los predios 51 y 52, en la zona 1), y el 96.5% restante se encuentran cimentadas sobre roca.

Como era de esperarse, y debido al tipo de material, solo en el 3.5% del área se presentan problemas de inestabilidad en suelo de fundación, relacionados principalmente con hundimientos.

8.8.2 Tipo de cimentación

El tipo de cimentación de la mayoría de las viviendas (más del 60%) es continuo de piedra, y solo el 10% de los habitantes encuestados afirmaron haber cimentado su vivienda sobre zapatas o vigas de amarre.

8.8.3 Sistema estructural

El 80 ó 90% de las viviendas tienen su sistema estructural compuesto por muros en bloque o ladrillo, y solo el 5% tiene una estructura de pórtico en concreto.

8.8.4 Cubierta

La cubierta del 34% de las viviendas afectables por caída de rocas es de placa de concreto, mientras que el 63% restantes tienen cubierta en teja, bien sea plástica o de zinc. En el resto del área, la cubierta de las casas en su gran mayoría es también en teja.

8.8.5 Daño actual

En la zona de estudio pudo establecerse que por lo menos el 75% de las viviendas no presentan daño actual, el 15% tiene daños leves a moderados, y tan solo el 2% presenta daños fuertes a severos.

8.9 Algunas conclusiones sobre la evaluación de la vulnerabilidad socioeconómica

Aunque los aspectos socioeconómicos de la vulnerabilidad no son considerados dentro de los alcances de este estudio, se presenta a continuación algunas conclusiones sobre este aspecto, realizadas con base las características encontradas en el sitio de estudio, especialmente relacionadas con las carencias identificadas en el sector, no solamente en el cubrimiento de servicios públicos e ingresos económicos familiares, sino considerando también aspectos relacionados con la capacitación o preparación que posee actualmente la comunidad para evitar o mitigar los riesgos naturales o para atender las situaciones de emergencia que se puedan presentar.

Para T. Horlik-Jones y D.K.C. Jones (1993), los riesgos impuestos por las llamadas amenazas “naturales” solo pueden entenderse en términos de sus dimensiones humanas y socioeconómicas. Ellos provienen de la interacción entre los fenómenos físicos y la vulnerabilidad de los sistemas humanos.

Quizás el uso continuado de los términos “amenaza natural” falla en notar la interacción de doble vía entre el ambiente físico y los sistemas humanos, lo cual ha llevado a que varios fenómenos amenazantes cambien en términos de su extensión espacial y sus características de magnitud y frecuencia (ej. deslizamientos, inundaciones, sequías). Como hay pocos desastres realmente naturales, o aquellos que ocurren independientemente de la acción humana (terremotos, erupciones volcánicas, tormentas tropicales), se considera preferible por los tratadistas citados el término amenaza ambiental, puesto que no solo resalta el carácter ecológico esencial de la amenaza, sino que también enfatiza el papel de los humanos en contribuir a la naturaleza amenazante de un lugar.

La vulnerabilidad deriva de la interacción compleja de un rango de factores socioeconómicos y culturales. La importancia relativa de estos factores y la forma en la cual la vulnerabilidad resultante depende de ellos, son aun materia de debate continuo. Se debe prestar mayor atención a la vulnerabilidad asociada con la falta de información pública y las formas en que los procesos de comunicación pueden contribuir a la reducción de la vulnerabilidad; en particular la posible existencia de barreras culturales para una comunicación efectiva del riesgo.

La investigación de las ciencias sociales en países tecnológicamente avanzados ha revelado la importancia esencial jugada por las creencias, la actitud y los juicios

subjetivos en el modelamiento del comportamiento humano y su respuesta ante amenazas.

Las comunidades en áreas propensas a amenazas naturales pueden adoptar un rango de medidas designadas para reducir el nivel de riesgo. Se ha reconocido que los procesos pueden ser bastante insatisfactorios en el sentido de que la gente con frecuencia parece ignorar el potencial de consecuencias serias o parece dispuesta a tomar riesgos innecesarios. Su comportamiento está constreñido por factores socioeconómicos y culturales, y los problemas del día a día, y la gente por lo tanto actúa de acuerdo con la lógica de sus circunstancias. La toma de decisiones individuales está asociada al menos con cuatro factores:

- Experiencias anteriores con la amenaza.
- La riqueza material de los individuos.
- Características de la personalidad.
- El papel percibido del individuo en un grupo social.

También se distinguen cuatro patrones distintos de comportamiento observados en la respuesta de la gente en lugares amenazados:

- Negación del riesgo, con resultados dependientes de la resiliencia de sus formas de vida.
- Aceptación pasiva del riesgo.
- Acción para reducir pérdidas futuras.
- Cambio drástico en uso de la tierra o forma de vida (escoger el cambio).

Mientras el control del estado puede controlar acciones con respecto a localización, uso de la tierra y forma de vida, la percepción y decisión individuales son de todas maneras fundamentales en la determinación de la respuesta a las advertencias sobre eventos específicos, y son, por lo tanto, de relevancia continua en las estrategias de reducción de desastres.

Los resultados que se presentan a continuación se ajustan a las características que le imprimen al área de estudio el hecho de pertenecer a un estrato socioeconómico 2, condiciones que difieren considerablemente con los resultados obtenidos en estudios anteriores (como en los barrios La Paz o La Carbonera), adelantados en zonas de estrato 0 y 1 para barrios subnormales en áreas de invasión y por lo tanto de alto riesgo *per se*.

8.9.1 Vivienda

- Propiedad

Aproximadamente el 95% de las viviendas en el área de estudio son ocupados por sus propietarios, y tan solo el 5% de las viviendas por arrendatarios.

- Tipo de construcción predominante

Con base en la tabulación de las encuestas, pudo establecerse que el 75.5% de las viviendas han sido construidas en mampostería no reforzada, el 9.5% de las viviendas corresponde al tipo de estructura aporticada y solo el 7.5% de las viviendas son tugurios en mampostería. La tipificación de viviendas se presenta en la **Figura 8-2**.

Estas viviendas son de 1 ó 2 pisos, y aunque muchas de ellas se encuentran en su interior en obra negra, pues sus propietarios no han tenido el dinero para terminarlas o se encuentran en el procesos de construir en un futuro el segundo o tercer piso, sus fachadas se encuentran en condiciones agradables a la vista.

- Densidad de la construcción

De los 57 lotes evaluados, solo 3 de ellos se encuentran vacíos, resultando una densidad de construcción cercana al 95%.

- Edad de las construcciones

El rango empleado en la encuesta para determinar la edad de las construcciones fue definido con base en la aparición de las Normas de Construcción Sismo Resistente (en 1984 y 1998), las cuales debieron seguirse durante el diseño y construcción de las urbanizaciones.

Sin embargo, y a pesar de que la gran mayoría de la viviendas (más del 50%) fueron construidas entre 1984 y 1998, sus habitantes afirmaron que ninguna de ellas era sismo resistente. Las viviendas construidas hace más de 16 años son aproximadamente el 30%, y para el restante o sus habitantes no sabían el año de construcción o ha sido construido en los últimos dos años.

- Condiciones generales de la calidad de la construcción

8.9.2 Servicios públicos

El cubrimiento de los servicios públicos básicos (acueducto, alcantarillado y energía eléctrica) es prácticamente del 100%; poco más del 50% de las viviendas poseen conexión a gas natural y el cubrimiento de teléfonos supera el 70%.

En cuanto a las vías del sector, casi el 100% de éstas se encuentran pavimentadas y en buen estado.

8.9.3 Aspectos demográficos

- Densidad de la población

En el área viven poco más de 200 personas, de la cuales el 65% son adultos (mayores de 18 años) y el 35% niños.

- Composición del núcleo familiar

En promedio, las familias están integradas por los dos padres y dos o tres hijos, y en algunos casos, las madres solteras adolescentes y sus hijos conviven en casa de los padres.

8.9.4 Actividad económica

En general, en las familias por lo menos hay una persona que trabaja dependiente o independientemente. En el caso de eventual desempleo del responsable del hogar (usualmente el padre), acuden a la economía informal (por ejemplo, ventas ambulantes) para obtener el sustento.

8.9.5 La comunidad y las entidades del distrito

Para establecer la interacción o confianza de la comunidad con las diferentes entidades del distrito, organizaciones tipo no gubernamentales o asociaciones comunitarias, se diseñó la última parte de la encuesta.

Con base en la tabulación, pudo establecerse que tan solo el 18% de los habitantes ha tenido algún vínculo con la Junta de Acción Comunal (JAC), y casi el 95% declaró no conocer o no haberse relacionado nunca con entidades como la DPAE, la Cruz Roja o la Defensa Civil, menos aún con la Policía u otras instituciones; aún así, la gran mayoría de los habitantes tienen la confianza en que estas entidades, especialmente la Cruz Roja, la Defensa Civil o la EAAB, actuarán oportuna y adecuadamente en caso de ser necesario. La institución en que los habitantes menos confían es la JAC, y en sobre la DPAE recae un poco el escepticismo de la comunidad, pues declaran que, a pesar de que es esta institución la contratante del presente estudio, algunas personas de la zona 3 afirman que en los momentos en que se presentaron las tres emergencias grandes por el desprendimiento de los bloques, la labor o desempeño de los funcionarios del DPAE no fue muy importante.

Sobre capacitación en diversos temas relacionados con la gestión de riesgos o prevención y mitigación de desastres, el 95% de los habitantes declaran no haberla recibido, pero igualmente por lo menos el 70% de ellos muestra interés en recibir capacitación al respecto, especialmente en temas sobre prevención de desastres y primeros auxilios.

8.9.6 Percepción del riesgo

Como ya se ha mencionado a lo largo del estudio, los fenómenos que afectan el área son: deslizamiento rotacional (en la zona 1 y en menor grado en la zona 4), y caída de rocas (en las zonas 2 y parte de la zona 3). Los habitantes del área de influencia a estos fenómenos son conscientes del peligro al que están expuestas, pero declaran que otro factor de alto riesgo para ellos es la inseguridad, ya que el sitio del relleno en la zona 2 favorece la presencia de ladrones y drogadictos. Los habitantes de la zona 1 declaran también que otro de los peligros a los que se encuentra expuesta es a las epidemias y problemas de salubridad por la presencia de los caballos de los zorreros que habitan en el sector; la cantidad de perros también la identifican como un problema. Finalmente, tanto en la zona 1 como en la zona 2, los habitantes consideran que la disposición inadecuada de basuras y el mal manejo de las aguas lluvias y la filtración de las mismas en las viviendas es también un problema de cuidado.

Como posibles soluciones a los problemas relacionados con la ocurrencia de FRM, la comunidad propone el desarrollo de estudios técnicos detallados, la construcción de muros de contención y otras medidas estructurales, así como la reforestación. Para solucionar los problemas "sociales" los habitantes insisten en un incremento en la vigilancia, no solo por parte de las autoridades sino también de los mismos vecinos.

9 EVALUACION Y ANALISIS DE RIESGO POR FRM

Se presenta en este capítulo el análisis de riesgos por fenómenos de remoción en masa en el barrio Buenos Aires, el cual resulta de la convolución del análisis de la amenaza (probabilidad de ocurrencia de fenómenos de remoción en masa como deslizamiento y desprendimiento y caída de fragmentos de roca), y del análisis de la vulnerabilidad (fragilidad de las viviendas expuestas ante los diferentes fenómenos).

El riesgo puede definirse en términos generales como la probabilidad de daños o pérdidas que resultaría de la materialización de un fenómeno físico (FRM, sismos, huracanes, etc.), capaz de afectar (de acuerdo con su grado de vulnerabilidad) a los elementos expuestos a éste (en este caso viviendas).

El método empleado para la determinación del riesgo fue descrito en los capítulos anteriores y sigue en líneas generales lo planteado por Soler et al[1], que a su vez hace parte de un enfoque sistemático de la evaluación de amenaza, vulnerabilidad

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

y riesgo en el cual intervienen conceptual y metodológicamente los trabajos de González y Millán[2, 3.] .

La calificación del riesgo para cada una de las viviendas del sector se realizó mediante la determinación del Indice de Riesgo (IR), teniendo en cuenta el Indice de Vulnerabilidad Física - IVF - (basado en el tipo de vivienda y el estado actual de los daños), y la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de remoción en masa ante el cual ésta se encuentra expuesta, y de acuerdo con los criterios indicados en la Tabla 9-1.

Indice de Riesgo = Probabilidad de Falla X Indice de Vulnerabilidad Física

IR máximo = P máxima X IVF máxima
IR mínimo = P mínimo X IVF mínimo

Tabla 9-1 Calificación del riesgo

CATEGORIA DE RIESGO	CRITERIO
ALTA	0,4 ≤ IR promedio
MEDIA	0,1 ≤ IR promedio < 0,4
BAJA	IR promedio < 0,1

La zonificación de riesgo actual por fenómenos de remoción en masa en el barrio Buenos Aires, se presenta en el **Plano 9.**

10 EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE MITIGACION

Se presenta en este capítulo el análisis de alternativas de mitigación para la reducción del riesgo por fenómenos de remoción en masa (FRM) en los alrededores de la Urbanización Altos del Sol, barrio Buenos Aires.

10.1 Estrategias generales de mitigación

Esta sección del capítulo se refiere a la conceptualización básica de la toma de decisiones en relación con la mitigación de riesgos por FRM en el barrio Buenos Aires, basados en conceptos de Harr (1987), IUGS - Working Group on Landslides (1997), Morgenstern (1997) y Einstein (1997).

3 González G., Alvaro J. y Millán L, Javier A. (1999). “Procedimiento para la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá – Colombia”. XI CPMSIF, Fox de Iguazú, Brasil.
4 Idem. “Resultados de la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia”.

En líneas generales, y tal como se ilustra y describe en la **Figura 10-1**, pueden plantearse por lo menos cuatro estrategias para resolver el problema de mitigación de riesgos por FRM en una zona dada:

1. Inacción.
2. Adoptar medidas pasivas.
3. Acometer medidas activas (construcción de obras).
4. Hacer un estudio más detallado (incluye instrumentación, seguimiento y la instalación de sistemas de alerta y alarma).

A su vez, los lineamientos conceptuales que permiten tomar la decisión sobre la estrategia que debe adoptarse para resolver los problemas generados por los FRM en el sitio de estudio, se presentan en las **Figuras 10-2** a **10-5**. Puede haber otras alternativas o combinación de posibilidades; lo representado en las figuras mencionadas procura dar un proceso algo simplificado y práctico. También existen acciones que se recomienda efectuar cualquiera que sea la estrategia seleccionada finalmente, y por lo tanto no son factor de decisión, como el monitoreo de los sectores inestables.

Debido al compromiso institucional de la DPAE ante la comunidad en peligro y por su misma razón de ser, se ha optado por elegir la estrategia 3 como guía general en la mitigación de los riesgos encontrados, descartando las estrategias 1, 2 y 4 de las mencionadas antes. Con base en esta decisión se procederá en las secciones siguientes de este capítulo al planteamiento y selección de alternativas para adelantar obras correctivas y preventivas en cada zona; dicha selección se realizará con base en la relación costo/beneficio, facilidad de construcción y de común acuerdo con la Interventoría y representantes de la DPAE.

Cabe anotar que para el análisis costo/beneficio no se consideraron las alternativas que de antemano implicaban elevados costos de ejecución (tales como muros o pantallas ancladas de concreto reforzado para la estabilización del terreno en la Zona 1 ó para contención de caída de bloques en las Zonas 2 y 3), debido a que el criterio de mayor relevancia en la elección es el de “obtener mayor seguridad a menor costo".

También debe aclararse que no se consideraron como alternativas independientes la construcción o ejecución de obras que por si solas no representan una solución global al problema (por ejemplo, drenaje como alternativa independiente de la reconformación de taludes o construcción de obras de contención, etc.). Por lo tanto, las diferentes soluciones que se presentan incluyen probablemente el mismo tipo de obras, pero sus diferencias radican principalmente en las cantidades de obra, localización, volúmenes de remoción o reconformación, materiales de las estructuras de contención y otros.

10.2 Método de análisis

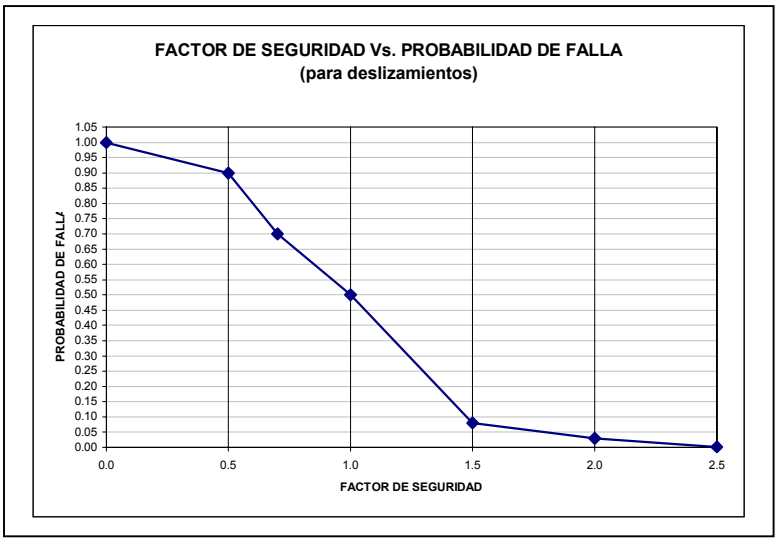
A continuación se describen los lineamientos adoptados para realizar el análisis de alternativas de solución para el manejo de FRM, que pueden poner en peligro la vida de los habitantes del sector y sus propiedades.

10.2.1 Probabilidades de falla

Como se mencionó anteriormente, debe tenerse una relación Factor de Seguridad (FS) – Probabilidad de Falla (Pf) para realizar el análisis de alternativas. Por lo tanto, y considerando que en el sitio se presentan dos procesos diferentes de remoción en masa (deslizamiento y caída de rocas), debe pensarse en la adopción de dos gráficas en las que se presente dicha relación.

Para el caso de deslizamiento, se presenta en la siguiente gráfica la relación FS Vs. Pf, de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis probabilístico de estabilidad (**Tabla 6-8**) y del análisis de estabilidad considerando la existencia de las obras diseñadas; los resultados de este último se presentan en el **Anexo 6**.

Figura 10-6 Relación entre factor de seguridad y la probabilidad de falla, utilizada para la toma de decisiones en caso de deslizamiento.



Para el caso de caída de rocas se considera que la probabilidad de falla con cualquiera de las medidas propuestas tiende a cero (0), debido a que en todas estas se busca la protección del nivel lodolítico contra la erosión, principal detonante del movimiento, y por lo tanto, al no existir pérdida de soporte no hay caída de rocas.

10.2.2 Análisis de alternativas

En el **Anexo 6** se presentan los análisis de estabilidad realizados para los taludes reconformados en las diferentes zonas del estudio, considerando la construcción de las obras correctivas. Estos análisis de estabilidad fueron corridos para condición seca (debido a que la existencia de estructuras de drenaje abaten suficientemente el nivel de agua del subsuelo) y para condición estática (sin considerar sismo).

El análisis de alternativas con base en la relación costo/beneficio de cada una, se basa en la comparación entre la alternativa inicial de "no hacer nada", es decir, calcular a cuánto ascenderán las pérdidas si el talud inevitablemente falla, y las posibles soluciones que se pueden dar para el manejo del problema de inestabilidad, teniendo en cuenta la probabilidad de falla de cada una de éstas. Como ya se mencionó, se considera como mejor alternativa la que brinde un mayor margen de seguridad a un menor costo. Los análisis mencionados se presentan al final de la descripción de cada una de las diferentes alternativas para cada zona.

10.2.3 Análisis costo/beneficio

El análisis costo/beneficio de una serie de alternativas de solución para un sitio determinado consiste en comparar el *costo esperado* de cada solución, el cual involucra el *valor de la obra* más el *costo de las pérdidas esperadas* en función de la probabilidad de falla del talud estabilizado, con el costo de las pérdidas que resultarían de la falla del talud (según su probabilidad de ocurrencia) si éste no es intervenido.

Con base en esta comparación, se considera como mejor alternativa aquella que le imprima un mayor factor de seguridad al talud con la mínima inversión posible.

10.2.4 Arbol de decisión

El árbol de decisión elaborado para el análisis de alternativas de cada zona de estudio relaciona la probabilidad de falla de cada alternativa y las consecuencias económicas de ésta, para obtener el costo esperado.

Este costo esperado fue calculado mediante la ecuación $C_E = C_o + P_f * C_f$, donde:

C_E = Costo esperado.
C_o = Costo inicial, equivalente al costo de los elementos expuestos (en el caso de la alternativa de no hacer obras) ó al costo de las obras de la alternativa considerada.
P_f = Probabilidad de falla del talud, con y sin obras.

C_f = Costo de la falla (consecuencia económica ó pérdida resultante) de la alternativa considerada.

Para cada uno de los árboles elaborados se consideró que el monto de las consecuencias económicas de la alternativa inicial de "no ejecutar obras" es equivalente al valor de los elementos expuestos, calculado a partir de los datos obtenidos durante el inventario de viviendas y a opinión de expertos en avalúos. Para las demás alternativas (que involucran la construcción de obras de estabilización), se consideró tanto el costo de las obras como el monto de la pérdida de los elementos expuestos.

En las probabilidades de falla adoptadas para cada alternativa se consideró que en el momento de la falla del talud se presentan pérdidas tanto en las obras como en los elementos expuestos. Aún así, a pesar de tomar el factor de seguridad más bajo para cada caso (mayor probabilidad de falla), en la mayoría de las alternativas la probabilidad de falla tiende a cero (0) debido a la estabilidad de las obras o a la eliminación de la amenaza a través de la adecuación de las obras.

El costo esperado calculado bajo estas premisas corresponde por lo tanto a la sumatoria de las consecuencias económicas de las condiciones de estabilidad y falla del talud con y sin obras.

10.3 Zona 1

10.3.1 Deslizamiento principal, parte superior de la Zona 1

10.3.1.1 Descripción del problema

Se trata de un deslizamiento compuesto, del tipo rotacional múltiple retrogresivo en la parte superior (hunde el suelo de cimentación de la fachada norte del bloque 16 de la urbanización Altos del Sol), y traslacional en el resto del cuerpo, que presiona contra la casa 51 (ver las **Fotografías 3,4,7 y 8**). El movimiento es lento, como lo denota que la casa mencionada ha podido soportar los efectos de presión lateral del deslizamiento, aunque agrietándose gradualmente (**Fotografía 8**). Se considera que el movimiento de falla abarcó el depósito coluvial que existe sobre arenisca en la corona, por lo cual el edificio 16 (predio 57 de nuestro inventario) quedó apoyado en la roca y por tanto no ha sufrido colapso o graves daños ante el deslizamiento. Como se observa en las **Fotografías 5 a 7**, se ha presentado la rotura del cimiento corrido de muros de cierre o perimetrales, pero las paredes se encuentran en buen estado; sin embargo, están activos los escarpes sucesivos de retrogresión y en cualquier momento pueden ocurrir dos procesos:

a) Hundimiento mayor que el actual, que permita desplazamiento de la fundación y grave asentamiento (o falla estructural parcial) del edificio.

b) Generación de otro escarpe atrás de los existentes que puede llevar a que una mayor área de sustentación de los edificios en hundimiento y mayor probabilidad de que éstos se asienten en exceso y eventualmente fallen.

10.3.1.2 Planteamiento de medidas correctivas

Aunque la descarga en la cabeza y la corona de un deslizamiento rotacional retrogresivo casi siempre es una medida útil, en este caso no puede aplicarse por existir allí los edificios de la urbanización Altos del Sol; por lo tanto, deberá considerarse el desarrollo de obras alternas que tiendan a remediar el proceso de inestabilidad activo en la parte superior de la ladera e impedir que continúe la retrogresión de éste.

En general, las obras remediales por considerar en las diferentes alternativas de mitigación del deslizamiento deben abarcar lo siguiente:

1. Obras de drenaje subsuperficial, tales como drenes horizontales y trincheras drenantes.

   Drenaje profundo, disponiendo baterías de drenes horizontales desde la pata del escarpe antiguo (localizado en la parte posterior del predio 51) y en el talud del tercio inferior de la ladera. Este sistema debe desaguar a canales de concreto construidos en la base del talud que las conduzcan hasta el pozo más cercano de la EAAB por los flancos del deslizamiento. Este medio de drenaje profundo puede complementarse con la construcción de una trinchera drenante en la base del talud del escarpe principal.

2. Recalce de la fundación del edificio o Bloque 16 en la zona afectada y reparación del sistema de acueducto y alcantarillado, medidas que a su vez corrigen factores inestabilizantes.

   El diseño de este recalce se encuentra fuera del alcance del presente estudio y debe basarse en un estudio detallado de las condiciones de fundación y las características estructurales del mismo. Sin embargo, se incluyen algunos esquemas a manera de guía en la **Figura 10-11**. En esta parte se debe incluir la reconstrucción de andenes perimetrales.

3. Construcción de muros de gaviones para contención de materiales.

   Esto se refiere principalmente a la construcción de obras de contención de gaviones o concreto, en la parte media de la ladera (por detrás del predio 51).

4. Reconformación de la ladera.

   La reconformación consisten en el terraceo del escarpe principal y los secundarios y la construcción de un relleno de contrapeso que estabilice la

parte alta de la misma; la construcción de este relleno de contrapeso ayuda a estabilizar el sector y brinda soporte al Bloque 16 de la Urbanización. Esta medida implica la reubicación de la casa existente (predio 51) debido a la necesidad del espacio para adelantar las obras, así como al mal estado de la misma; en cada visita que se ha hecho al sitio de estudio entre los meses de agosto de 2000 y enero de 2001, algunas con espaciamiento de un mes aproximadamente, ha podido observarse el incremento del daño actual; se consideran además las precarias condiciones socio-económicas de los habitantes de dicha casa. Por los mismos motivos probablemente también será necesaria la reubicación de las viviendas 50 y 52. La cobertura vegetal de la zona debe conservarse para utilizarla en la revegetalización del sector.

Como el procedimiento de reconformación implica la necesidad de tumbar los pinos existentes en el lote 51, debe considerarse la arborización como una de las actividades de revegetalización, que además de contribuir a la estabilidad del terreno permite compensar el daño ecológico y mejorar el aspecto ambiental general de la zona.

10.3.2 Deslizamiento inferior de la Zona 1

10.3.2.1 Descripción del problema

Se trata de un deslizamiento traslacional retrogresivo poco profundo en material arcilloarenoso meteorizado. El escarpe principal se encuentra empinado y sometido a degradación por erosión natural y acción antrópica (ver las **Fotografías 9 y 10**). Este deslizamiento está indicado en los planos geológicos y de procesos con unas zonas más activas, especialmente en el flanco derecho y hacia el centro; en la pata, avanza sobre la Carrera 2ª A, sobrepasando un muro de contención con piedra pegada destruido parcialmente (ver la **Fotografía 11**).

10.3.2.2 Planteamiento de medidas correctivas

Las obras correctivas que deben acometerse en esta sección de la ladera deben contemplar:

1. Peinado del escarpe principal y los flancos, dándoles pendiente apropiada.

2. Drenaje subsuperficial mediante drenes horizontales o filtros en forma de espinazo de pescado en las zonas más activas.

   Nos referimos al drenaje profundo, disponiendo baterías de drenes horizontales desde la pata de los escarpes de erosión y filtros en espinazo de pescado a lo largo del tercio medio e inferior de la ladera. Este sistema debe desaguar a canales de concreto construidos en la base del talud que conduzcan las aguas hasta el pozo más cercano de la EAAB por los flancos del deslizamiento.

3. Reconstrucción o reemplazo del muro de la pata de la ladera, localizado al lado del corredor suroriental de la Cra. 2ª A.

4. Reconformación de la zona mediante terraceo.

5. Empradización de toda la zona con manto de cobertura vegetal y arborización en la parte media de la ladera.

10.3.3 Sectores con inestabilidad actual y potencial en el flanco derecho del deslizamiento principal

10.3.3.1 Descripción de los problemas

En la zona vecina al flanco derecho del deslizamiento principal (o superior de esta zona), flanco que tiene unos 10.0 a 20.0 m de ancho, se observan signos claros de flujo de tierras muy lento del terreno y en los tercios medio e inferior, cerca de la vivienda del predio 50 y arriba del lote vacío vecino al predio 48, se encuentran al menos tres escarpes de deslizamiento, de altura variable entre 0.5 y 1.0 m, cóncavos hacia abajo, casi paralelos al flanco descrito, aunque tienden a apartarse hacia el noroccidente.

En el sector intermedio entre el tercio central y el inferior del flanco derecho del deslizamiento principal, y arriba (al sureste) de la casa del predio 49 se encuentran grietas y escalones de movimiento de falla del terreno, así como una zona húmeda en la cual mana agua después de aguaceros fuertes, en el borde superior de una excavación de 1.0 m de profundidad en un área de 5x3 m con destino a la construcción de una casa, proyecto que no se llevó a cabo finalmente. Este sector se halla en condición de flujo de tierras lento y ocasionalmente se producen pequeños flujos de detritos desde escarpes y talud de excavación. El propietario de la casa del predio 49 construyó un muro de ladrillo para proteger su propiedad de los empujes del terreno, no así de los flujos de materiales.

En el lote vacío al oriente del predio 48 el propietario realizó una excavación en la base de la ladera, la cual remató en la parte superior del lote en un corte de 3.0 a 4.0 m de altura, todo esto en arcillolita bastante meteorizada con una delgada cobertura coluvial. En el talud vertical de este corte aflora el sistema de grietas del flanco derecho del deslizamiento de la Zona 1, y se ha producido un ligero avance de la cara de dicho talud y del lado izquierdo de la excavación en el cual los materiales que lo forman presionan contra el muro posterior del patio de la casa del predio 48. Se creó aquí un sector potencialmente inestable que puede causar daños a la casa mencionada y estimular el movimiento de la faja del terreno inmediata al occidente de la vivienda del predio 50.

10.3.3.2 Planteamiento de medidas correctivas (**Figura 10-7**)

Las medidas que se presentan a continuación para estabilizar el sector activo situado al sureste del predio 49 se consideran como la única alternativa de solución del problema:

a) Peinado del talud de excavación para rebanar los 0.5 m superiores del escarpe allí formado, dándole pendiente 1:1. Los materiales resultantes del peinado se deben colocar en la base del mismo escarpe.

b) Construcción de un muro de gaviones de altura variable con un máximo de 4.0 m, la cual disminuye progresivamente hasta empatar con una estructura de contención existente en el extremo oriental de la Cra. 2ª A, próxima a su unión con la Calle 1ª A Sur (muro en el cual hay una persona sentada **Fotografía 12**). Detrás de la nueva estructura debe retirarse en forma escalonada el material movido y reemplazarlo por un relleno compactado.

c) Colocar una batería de tres drenes horizontales (con orientación conveniente indicada en los **Planos 10-1 y 10-2**), de 25.0 m de longitud cada uno.

Los resultados del análisis de estabilidad (bajo condición seca y estática) realizados para esta alternativa de solución se presentan en las **Figuras A6-10** a **A6-12** del **Anexo 6**.

10.3.4 Alternativas de solución de la Zona 1

Se condensan y analizan a continuación las alternativas propuestas, que abarcan en una forma u otra las obras de mitigación planteadas en los numerales 10.3.1 a 10.3.3.

10.3.4.1 Alternativa 1 (**Figura 10-8** - **Plano 10-1**)

10.3.4.1.1 Alcance de la alternativa

Con las obras mencionadas en el numeral siguiente se pretende estabilizar la ladera mediante el drenaje de los materiales (aumento de la resistencia al corte) y la reconformación de la misma mediante terraceo (mejorando las condiciones de equilibrio). Cabe recordar que el rompimiento de la tubería de suministro de agua potable a los edificios de la parte superior pudo ser un factor disparador principal en la inestabilización de la ladera.

10.3.4.1.2 Obras

En este caso será necesario acometer las siguientes obras de mitigación:

- Reubicación de los habitantes de los predios 50, 51 y 52, y demolición de las edificaciones existentes. Aunque durante la evaluación del daño actual (**Figura 8-14**) y la calificación del riesgo actual ante FRM (**Plano 9**) los predios 50 y 52 no presentan daño y se encuentran en una condición de riesgo bajo, es necesaria su reubicación para facilitar la adecuación de las obras planteadas.

- Sellado de grietas en todo el cuerpo del deslizamiento. Se destacan las de la parte superior que se insinúan en las **Fotografías 4 y 7** o se ven en las **Fotografías 6, 8 y 10**. Incluye el rebanado de escarpes (escalones formados al deslizarse porciones del terreno, en la parte superior de éstas) aprovechando los materiales no orgánicos para sellar las grietas que normalmente existen a continuación de la base de los mismos. En las **Fotografías 7 y 9** se aprecian los escarpes mayores.

- Retiro de los materiales deslizados en la parte superior de la ladera. Esto se refiere a la remoción de una capa de espesor variable (se estima entre 0.5 y 1.5 m) de los suelos que se deslizaron en el pasado y hoy en día se encuentran en flujo lento de tierras, por lo general bastante húmedos y blandos. Se localizan principalmente en el sector comprendido entre la base del escarpe principal y la vivienda del predio 51 (**Fotografías 8 y 9**), en el sector vecino al flanco izquierdo del deslizamiento inferior de la zona (**Fotografía 11**) y en la parte media de la faja de terreno vecina al flanco derecho del deslizamiento superior al occidente del predio 50. La remoción de estos materiales hará parte de obras de terraceo que se desarrollarán como reconformación del terreno en el Capítulo 11.

- Instalación de seis baterías de drenaje con 3 drenes horizontales cada una, dispuestas así: tres en la parte media de la ladera (en el talud posterior, costado sureste del lote 51), dos en el talud medio de la ladera, y una en el talud posterior del lote vacío al norte del predio 48. Los drenes tendrán una longitud de 25.0 m

- Construcción de tres muros de gaviones: el superior en la parte media de la ladera, atrás (al sur) del predio 51 (**Fotografía 8**); otro en la mitad izquierda de la pata de la ladera (en reemplazo del muro destruido parcialmente por los habitantes, **Fotografía 11**), y el tercero, en el flanco derecho de la pata, en la parte posterior (o sur) del lote vacío vecino al predio 48.

- Construcción de un filtro en la pata del talud del predio 51, parte inferior del muro de gaviones superior.

- Conformación de un relleno de contrapeso sostenido por el muro de gaviones construido en la base del tercio superior de la ladera (en el terreno ocupado por la vivienda 51).

- Adecuación de canales revestidos con concreto para la conducción de las aguas provenientes de los drenes y en las bermas de conformación.

- Reconformación de la parte media y baja de la ladera mediante la adecuación por corte de dos terrazas principales en la parte inferior, con dimensiones suficientes para aprovecharlas como zonas de recreación y deporte.

- Revegetalización con cespedones de pasto y arborización en la parte central de ladera, en reemplazo de los pinos talados para la realización de las obras.

El análisis de estabilidad para esta alternativa (bajo condición seca y estática) se realizó con base en la sección L-51 (**Figuras A6-5** y **A6-6** del **Anexo 6**), y se obtuvo un Factor de Seguridad variable entre 2.06 a 2.34, y una Probabilidad de falla de 0.00. El análisis para el relleno de contrapeso fue realizado con base en los siguientes parámetros: γ = 1.9 ton/m3, c' = 1.0 ton/m2 y Φ' = 28°.

10.3.4.1.3 Cantidades de obra y presupuesto

Basados en el **Plano 10-1** y la **Figura 10-8**, así como en la recopilación y actualización de precios unitarios (presentado en el **Anexo 7**), se calcularon las cantidades y precios que se incluyen en la **Tabla 10-1**.

Tabla 10-1 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 – Zona 1

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Viviendas	unidad	3.0	$10,000,000	$30,000,000
Drenes horizontales	m	450.0	$132,000	$59,400,000
Estructuras de gaviones	m^3	755.0	$125,000	$94,375,000
Excavación y perfilado del talud	m^3	1,697.8	$10,000	$16,978,000
Rellenos compactados	m^3	1,013.6	$10,000	$10,136,000
Canal de concreto	m	374.0	$70,405	$26,331,470
Descole de concreto	m	5.0	$80,405	$402,025
Filtro con geotextil	m	45.0	$69,400	$3,123,000
Arborización	unidad	5.0	$17,000	$85,000
Revegetalización	m^2	3,808.0	$2,300	$8,758,400
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 1				**$249,588,895**

10.3.4.2 Alternativa 2 (**Figura 10-9** - **Plano 10-2**)

10.3.4.2.1 Alcance de la alternativa

Al igual que en la alternativa anterior, se busca la estabilización de la ladera mediante el drenaje de los materiales (aumento de la resistencia al corte) y la

reconformación de la misma mediante terraceo (mejorando las condiciones de equilibrio).

10.3.4.2.2 Obras

En este caso será necesario acometer las siguientes obras de mitigación:

- Reubicación de los habitantes del predio 51 y demolición del mismo.
- Construcción de un filtro en forma de espinazo de pescado en la parte media e inferior de la ladera.
- Siete baterías de tres drenes horizontales cada una, distribuidas así: cuatro en la parte media del talud (sector posterior al lote 51) con drenes de 25.0 m de longitud; dos en el sector central de la parte baja, de 30.0 m de longitud, y una en la parte posterior del lote vacío vecino al predio 48, con drenes de 25.0 m de longitud.
- Cunetas de concreto para conducción de las aguas de los drenes horizontales y en las bermas de conformación de la ladera.
- Construcción de dos muros de gaviones en la parte media de la ladera y sector posterior al lote vacío vecino al predio 48.
- Un muro de concreto en la parte baja de la ladera.
- Reconformación del terreno (retiro de materiales deslizados, descarga y terraceo).
- Revegetalización con cespedones y arborización.

El análisis de estabilidad para esta alternativa (condición seca y estática) se efectuó también con base en la sección L-51 (**Figuras A6-7** y **A6-8** del **Anexo 6**), en el cual se obtuvo un Factor de Seguridad variable entre 1.04 y 2.39, y una probabilidad de falla variable entre 0.5 y 0.001.

10.3.4.2.3 Cantidades de obra

Mediante el procedimiento descrito para la Alternativa 1, se determinaron las cantidades y valores de la **Tabla 10-2**.

Tabla 10-2 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 2 – Zona 1

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Viviendas	unidad	1.0	$10,000,000	$10,000,000
Drenes horizontales	m	555.0	$132,000	$73,260,000
Estructuras de gaviones	m^3	560.0	$125,000	$70,000,000
Muro de concreto reforzado	m^3	63.5	$366,800	$23,291,800
Excavación y perfilado del talud	m^3	1,240.0	$10,000	$12,400,000
Rellenos compactados	m^3	540.0	$10,000	$5,400,000
Canal de concreto	m	385.0	$70,405	$27,105,925
Filtro con geotextil	m	118.0	$69,400	$8,189,200
Arborización	unidad	5.0	$17,000	$85,000
Revegetalización	m^2	3,968.0	$2,300	$9,126,400
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 2 - ZONA 1				**$238,858,325**

10.3.4.3 Otras alternativas de solución

Dentro de las alternativas de manejo para el deslizamiento de la parte superior de la ladera se consideró la construcción de una pantalla de concreto reforzado, de por lo menos 0.15 m de espesor, anclada al talud actual (en reemplazo de la necesidad de conformar un relleno de contrapeso); esta alternativa es bastante radical en cuanto a sostener el terreno con superficies de falla secundarias originadas en la retrogresión del deslizamiento, sobre parte del cual se construyó el Bloque 16 de la urbanización.

También se consideró la posibilidad de instalar una barrera de pilotes metálicos rellenos de concreto en el terreno ocupado por la vivienda del predio 51, y apoyar sobre aquella un terraplén para dar soporte a un relleno de contrapeso que estabilizara la corona y cabeza del deslizamiento.

Estas dos alternativas fueron descartadas de antemano del análisis económico de alternativas (análisis costo/beneficio), por considerarse extremadamente costosas con respecto a las dos planteadas inicialmente.

10.3.5 Arbol de decisión

El árbol de decisión para la selección de alternativas de la Zona 1, se presenta en la **Figura 10-10**.

De acuerdo con la comparación de costos la alternativa más rentable es la No. 1, la cual además de proporcionar un factor de seguridad más alto a la parte superior de la ladera, al incluir el esquema de reconformación planteado, permite crear amplios espacios para la recreación y el deporte.

10.3.6 Recalce de la fundación del Bloque 16 de la urbanización Altos del Sol (predio 57 del inventario de viviendas del presente estudio).

A continuación se presentan algunas recomendaciones para considerar dentro de una planeación detallada del recalce de la cimentación del Bloque 16; este diseño (actividad que escapa al alcance del presente estudio) debe considerar la instalación de obras de cimentación adicionales en una sola esquina del edificio, junto a la reparación de servicios domiciliarios. Puede incluir lo siguiente:

a) Hacer trincheras de acceso desde la cara norte de la esquina nororiental del bloque 16 (predio 57 del inventario) y desde debajo de las escaleras de acceso al edificio, que permitan entrada de ingenieros y obreros al espacio vacío o cavidad formada bajo la esquina del edificio, y apuntalamiento de la zona afectada.

b) Inspección y reparación o reconstrucción de tuberías de agua potable o de aguas servidas. Captación de escapes o filtraciones constituyendo pozos y colocando tubería PVC (flexible) para desaguar a pozos de la EAAB cercanos.

c) Limpieza y retiro de suelos blandos o húmedos y de terrones o bloques rocosos desprendidos y escombros de construcción que se hallen en la cavidad. Localización de escarpes y grietas; sellado de grietas con lechada de cemento y revestimiento protector de escarpes en roca (si los hay) colocando malla metálica y mortero, dejando tubos PVC o trozos de manguera para drenaje interno, que desagüen al sistema dispuesto en el literal anterior.

d) Construcción de pilares y machones de recalce de concreto ciclópeo o simple, bajo los cimientos corridos de muros perimetrales e internos y en el interior de la cavidad; para esto será necesario excavar apiques en cada sitio (con separación que puede ser de 3.0 a 5.0 m) cuidadosamente hasta dar con la superficie de falla y apoyarlos en terreno firme bajo ésta (**Figuras 10-11 A y B**).

e) Impermeabilización de muros, cimientos y pisos. Reconstrucción de la parte inferior de muros de cerramiento que han quedado sin soporte debido al hundimiento (**Fotografías 5 y 6**).

f) Sellado de grietas y del escarpe principal con arcilla-cemento apisonada (**Figura 10-12)** y reconstrucción de andenes perimetrales o exteriores, impermeabilizando juntas con los muros frontales.

g) Construir un canal revestido con concreto en la corona del deslizamiento, al lado exterior y paralelo al camino perimetral de acceso a los edificios, (camino de losas de concreto que se ve en la **Fotografía 3**).

10.4 Zona 2

10.4.1 Descripción del problema

Se trata de la zona del frente de una antigua explotación minera que permite el afloramiento de un grueso estrato de arenisca fracturado, que sobreyace a una arcillolita meteorizada A partir de este escarpe rocoso los propietarios del terreno han ido conformando un relleno extenso y de espesor apreciable, con el fin de adecuar un área para construcción de viviendas (**Fotografías 13 a 15**). En el sitio se presenta problema de infiltración por discontinuidades y lavado de finos que quita soporte a los bloques de arenisca provocando su caída o desplome, como se puede observar en la **Fotografía 13**.

10.4.2 Alternativas de estabilización

Aunque el terreno de la Zona 2 actualmente se encuentra vacío y por lo tanto representa una zona de riesgo potencial, se plantean a continuación algunas alternativas de manejo del talud para evitar que en un futuro, cuando la zona sea urbanizada, las condiciones de estabilidad del mismo se conviertan en un factor de amenaza para sus habitantes. A pesar de que las obras no serán ejecutadas por la DPAE debido al carácter privado del terreno, se recomienda establecer oficialmente el registro de que la alternativa seleccionada u otra similar, sea ejecutada por el propietario como requisito para obtener la licencia de construcción.

Estas alternativas consideran básicamente el retiro de bloques sueltos del estrato de arenisca que constituye la parte superior del talud y la protección del estrato arcilloso susceptible de erodarse, por ser esta pérdida de material de soporte la causa principal de la caída de bloques de la arenisca.

10.4.2.1 Alternativa 1 (**Figura 10-13** - **Plano 10-1**)

10.4.2.1.1 Alcance de la alternativa

Con esta alternativa se busca proteger el nivel arcilloso y evitar su degradación para de esta forma eliminar el desprendimiento y caída de bloques por pérdida de soporte. En la mitad derecha de las **Fotografías 14 y 15** se aprecia muy bien que el frente del estrato de arenisca queda prácticamente en voladizo ante la meteorización y erosión de la arcillolita.

10.4.2.1.2 Obras

En este caso será necesario acometer las siguientes obras de mitigación:

- Desprendimiento manual y retiro de bloques sueltos o susceptibles de caer.

- Perfilado del talud de arcillolita, sobre todo en su mitad inferior, para darle una superficie escalonada.

- Preparación para la fundación de un relleno compactado, mediante el retiro de los materiales con los cuales se ha ido conformando el relleno de la zona hasta una profundidad mínima de 2.0 m, a lo largo de una faja de longitud igual a la del talud (45.0 m) y un ancho variable entre 5.0 y 11.0 m, en dirección perpendicular a éste. Compactar el material del fondo y colocar posteriormente material uniforme compactado en capas de 0.3 m hasta alcanzar nuevamente la cota original del relleno heterogéneo existente.

- Construcción de un relleno de protección compactado, con pendiente 1.5H:1.0V hasta 2.0 m por encima del contacto arcillolita-arenita. Al mismo tiempo se irá colocando un lecho filtrante de 0.4 m de espesor contra el talud natural perfilado. Para el filtro se deberá utilizar material granular gradado, limpio y durable.

- Construcción de una trinchera drenante en la pata del relleno de protección, y de una cuneta de concreto en la parte superior del relleno (en el contacto con el nivel arenoso).

- Empradización del relleno.

El análisis de estabilidad para esta alternativa fue realizado con base en la sección B de la Zona 2 (**Figuras A6-13** y **A6-14** del **Anexo 6**). Se obtuvo un Factor de Seguridad de 1.75 y una Probabilidad de falla de 0.07.

10.4.2.1.3 Cantidades de obra y presupuesto

Basados en el **Plano 10-1** y la **Figuras 10-13**, se calcularon las cantidades y precios que se incluyen en la **Tabla 10-3**.

Tabla 10-3 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 – Zona 2

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	50.6	$34,200	$1,730,520
Excavación y perfilado del talud	m^3	380.7	$10,000	$3,807,000
Lecho drenante	m^3	205.8	$50,900	$10,475,220
Rellenos compactados	m^3	1,208.3	$10,000	$12,083,000
Filtro con geotextil	m	95.0	$69,400	$6,593,000
Estructuras de gaviones	m^3	63.0	$125,000	$7,875,000
Canal de concreto	m	140.0	$70,405	$9,856,700
Descole de concreto	m	7.0	$80,450	$563,150
Manto de cobertura vegetal	m^2	512.6	$7,700	$3,947,020
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 2				**$56,930,610**

10.4.2.2 Alternativa 2 (**Figura 10-14** - **Plano 10-2**)

10.4.2.2.1 Alcance de la alternativa

En esta segunda alternativa se pretende, al igual que con la alternativa anterior, proteger el nivel arcilloso con un relleno en la base, pero a diferencia de la primera se busca el sostenimiento de bloques sueltos mediante pernos de anclaje y el recubrimiento del nivel arenoso con una malla metálica como las utilizadas para la construcción de gaviones.

10.4.2.2.2 obras

- Desprendimiento manual y retiro de bloques sueltos o susceptibles de caer.
- Perfilado del talud de arcillolita.
- Preparación para la fundación de un relleno compactado, mediante el retiro de los materiales con los cuales se ha ido conformando el relleno de la zona hasta una profundidad mínima de 2.0 m, a lo largo de una faja de longitud igual a la del talud (45.0 m) y un ancho variable entre 5.0 y 11.0 m, para compactar el material del fondo y colocar posteriormente material seleccionado compactado en capas de 0.3 m hasta alcanzar nuevamente la cota original del relleno.
- Colocación de un lecho filtrante contra el talud perfilado.
- Construcción de un relleno compactado con pendiente 1.5H:1.0V hasta el contacto arcillolita-arenita.
- Construcción de una trinchera drenante en la pata del relleno.
- Anclaje de los bloques de arenita con pernos (varilla de acero corrugado de Φ=1" y L=4.0 m).
- Recubrimiento del nivel arenoso con malla para gavión.
- Empradización del relleno.

Con el análisis de estabilidad para esta alternativa se obtuvo un Factor de Seguridad de 1.9 y una Probabilidad de falla de 0.05

10.4.2.2.3 Cantidades de obra

Tabla 10-4 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 2 – Zona 2

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	50.6	$34,200	$1,730,520
Excavación y perfilado del talud	m^3	205.7	$10,000	$2,057,000
Lecho drenante	m^3	155.0	$50,900	$7,889,500
Relleno compactado	m^3	636.7	$10,000	$6,367,000
Filtro con geotextil	m	105.0	$69,400	$7,287,000
Pernos de anclaje	m	270.0	$105,000	$28,350,000
Malla para gavión revestida con PVC	m^2	225.0	$22,000	$4,950,000
Canal de concreto	m	155.0	$70,405	$10,912,775
Descole de concreto	m	5.0	$80,450	$402,250
Manto de cobertura vegetal	m^2	270.0	$7,700	$2,079,000
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 2 - ZONA 2				**$72,025,045**

10.4.3 Arbol de decisión

En la **Figura 10-15** se presenta el árbol de decisión para la selección de alternativas de la Zona 2.

De acuerdo con la comparación de costos, se considera que la mejor alternativa de solución es la No. 1.

10.5 Zona 3

10.5.1 Descripción del problema

Al igual que en la Zona 2, el antiguo frente de una explotación minera permite el afloramiento de un estrato de arenisca fracturada subyacido por lodolitas meteorizadas. El desprendimiento y caída de los bloques de arenisca provocado por la pérdida de soporte causada por la erosión del estrato débil, amenaza seriamente a las viviendas localizadas en la pata del talud, y en varias ocasiones en algunas de éstas se ha presentado la destrucción total o parcial de las habitaciones posteriores de las mismas (ver las **Fotografías 16 a 18**).

10.5.2 Alcance de las alternativas planteadas

Con las diferentes alternativas para el manejo de la amenaza en esta zona, se busca proteger la arcillolita de los agentes erosivos para eliminar así la causa principal de desprendimiento y caída de bloques de arenisca.

Además, se pretende aumentar el factor de seguridad del talud al perfilarlo y mejorar su pendiente, así como la recuperación ambiental del sector mediante la revegetalización de los taludes.

10.5.3 Factor de seguridad y probabilidad de falla

Como se mencionó anteriormente (numeral 10.2.2.), para las diferentes alternativas de manejo que se proponen a continuación se adoptó una probabilidad de falla igual a cero (0), pues se considera que mediante la protección de la lodolita contra la meteorización que se busca en cada una de ellas, se elimina la posibilidad de caída de los bloques de arenita desprendidos.

10.5.4 Alternativas de solución

A continuación se presentan diferentes alternativas para asegurar la arenisca y proteger la lodolita subyacente, medidas con las cuales se pretende eliminar o, por lo menos, minimizar el problema de caída de rocas que afecta seriamente a los moradores de este sector; estas alternativas fueron analizadas y adoptadas o descartadas de acuerdo con su costo o dificultad de construcción. Al final se presenta el análisis costo/beneficio de algunas de ellas, y la selección de la que se considera es la mejor opción para proteger a los habitantes del sector y sus viviendas (**Fotografía 18**).

En cada una de ellas se considera indispensable (por seguridad) la colocación de una barrera de protección temporal construida con tablones y llantas, que se va llevando a todo lo largo de la pata del talud en la parte posterior de las viviendas, para evitar que los materiales desprendidos de la parte alta o los que estén siendo removidos durante las actividades de perfilado del talud puedan ocasionar daño a los moradores o a sus pertenencias; también se considera necesario perfilar el talud en su totalidad tanto para obtener una pendiente estable antes de iniciar cualquier obra de protección, como para retirar los bloques de arenita que se encuentren en voladizo o muy susceptibles de desprenderse y caer.

La recomendación sobre el perfilado del talud está basada en los análisis que al respecto plantean E. Hoek & J.W. Bray (Rock Slope Engineering) y con los que demuestran la disminución del factor de seguridad entre taludes rectos, cóncavos y convexos, tal como se ilustra en la **Figura 10-16**; por consiguiente, esta actividad es necesario realizarla especialmente hacia los extremos del talud y en la convexidad del talud de la parte posterior de los predios 32 a 34 (**Fotografía 16**), tanto para garantizar la estabilidad del mismo, como para permitir la limpieza de la faja estrecha en la parte posterior de los lotes (junto a la pata del talud) y la construcción del canal para el drenaje de aguas lluvias.

La probabilidad de falla de las siguientes alternativas, en las cuales se busca proteger el talud contra el proceso de erosión, se asume como cero o muy cercana

a cero, pues se está eliminando el problema que produce la caída de bloques, tal como se indicó en el numeral 10.2.2.

10.5.4.1 Alternativa 1: Escalonamiento del nivel arenoso y recubrimiento de la parte superior del nivel lodolítico (**Figura 10-17** - **Plano 10-1**).

Una medida de mitigación que ha sido empleada exitosamente en varios sectores de la ciudad que presentan el mismo problema de desprendimiento y caída de bloques arenosos apoyados sobre niveles blandos (arcillolitas o lodolitas), consiste en alejar el afloramiento del nivel arenoso de la cara del talud mediante la conformación de una berma en el contacto material blando – arenita y recubrir con malla – mortero tanto la berma como la parte superior del talud en material blando.

Para el caso del barrio Buenos Aires se plantea la conformación de dos bermas o escalones de la siguiente forma:

a) Berma superior: Es en esencia la plataforma natural formada por el estrato de arenita, que tiene su borde exterior sobre las casas de los predios 19 a 34, y que está limitada en su interior por la pata del talud empradizado que desciende desde la cara sureste de la urbanización Altos del Sol (**Fotografías 15 y 17**). En esta berma se harán labores de limpieza y uniformización de la superficie con pendiente general hacia el extremo suroeste de la zona, y cunetas o canales de drenaje superficial.

b) Berma inferior: Se excavará un escalón de 2.0 m de ancho a lo largo del contacto arenita – lodolita dándole una ligera pendiente hacia el interior, para drenaje.

La berma inferior debe recubrirse con malla – mortero en su totalidad abarcando con esta cubierta desde la parte media del nivel arenoso (1.0 m por encima del nivel de la berma) y hasta por lo menos 2.0 m sobre el talud de lodolita, con el fin de eliminar el proceso de erosión diferencial en la base del nivel competente; este recubrimiento formará un canal para el drenaje de agua de escorrentía hacia la parte interior del talud, del ancho de la berma inferior, el cual desaguará en un descole de concreto en el extremo suroccidental de la zona (en dirección al lote que sirve de garaje – parqueadero, predio 1). La parte del talud de lodolita que no quede protegida con el recubrimiento debe empradizarse con un manto de cobertura vegetal.

En la base el talud (parte posterior de la viviendas) es necesario construir una cuneta de concreto que entregará en una caja construida hacia el extremo norte de la Cra. 2ª A.

Para adelantar estas obras debe adecuarse inicialmente el acceso de maquinaria a la parte superior del talud (por la plataforma existente) mediante el terraceo del montículo existente en la parte posterior de los predios 32 a 34 (en el límite con la

Zona 2, **Fotografías 15 y 16**), obra que empalma con la solución planteada para el sitio del relleno. El perfilado general del talud puede realizarse simultáneamente con la conformación de la berma interior a lo largo del contacto arenita – lodolita.

Esta medida, además de elevar considerablemente el factor de seguridad del talud, ayuda al mejoramiento del paisaje del barrio y surte un efecto positivo en los habitantes al retirar (alejar del borde del talud) los bloques de arenisca que les han amenazado desde años atrás.

10.5.4.1.1 Cantidades de obra y presupuesto

Tabla 10-5 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 - Zona 3

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Barrera de protección temporal	global	1.0	$300,000	$300,000
Excavación y perfilado del talud	m^3	2,788.0	$10,000	$27,880,000
Recubrimiento con malla-mortero	m^2	495.0	$48,720	$24,116,400
Canal de concreto	m	162.0	$70,405	$11,405,610
Descole de concreto	m	10.5	$80,450	$844,725
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Revegetalización con cespedón	m^2	640.0	$2,300	$1,472,000
Manto de cobertura vegetal	m^2	1,306.0	$7,700	$10,056,200
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 3				**$76,336,535**

10.5.4.2 Alternativa 2: pernos pasivos (**Figura 10-18** - **Plano 10-2**)

Consiste en lo siguiente:

a) Instalación de pernos: Otra de las medidas con las que se puede minimizar en buen grado la caída de bloques consiste en la instalación de anclajes o pernos pasivos con varillas de acero corrugado de 1” de diámetro y por lo menos 4.0 m de longitud, con las cuales se pueden unir y sostener de 2 a 3 bloques en profundidad, según el tamaño de éstos; los pernos deben quedar con una inclinación hacia abajo de por lo menos 15° con la horizontal. La separación lateral entre cada perno debe ser en promedio de 2.0 m, de acuerdo con la distancia entre diaclasas.

b) Barrera de protección: A lo largo del contacto lodolita – arenita es indispensable colocar una barrera de protección de malla – mortero o concreto contra la socavación que genera la pérdida de material de soporte y la consecuente caída de bloques.

c) Perfilado y revegetalización: Para garantizar la estabilidad de la obra es indispensable perfilar el talud en su totalidad y revegetalizarlo con un manto de

cobertura; en la base del mismo debe construirse un canal de concreto para evacuar aguas lluvias.

10.5.4.2.1 Cantidades de obra

Tabla 10-6 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 2 - Zona 3

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Barrera de protección temporal	global	1.0	$300,000	$300,000
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	225.0	$34,200	$7,695,000
Perfilado manual del talud	m^3	540.0	$42,896	$23,163,840
Canal de concreto	m	162.0	$70,405	$11,405,610
Descole de concreto	m	8.0	$80,450	$643,600
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Pernos de anclaje	m	400.0	$105,000	$42,000,000
Manto de cobertura vegetal	m^2	3,604.0	$7,700	$27,750,800
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 2 - ZONA 3				**$113,220,450**

10.5.4.3 Alternativa 3: revestimiento del nivel lodolítico con malla – mortero anclada con taches (**Figuras 10-19 y 10-19 A**)

Considerando que el desprendimiento de bloques es debido a la pérdida de soporte por erosión del material blando subyacente, esta alternativa consiste en protegerlo contra la lluvia, principal agente degradacional, mediante la instalación de una malla – mortero anclada con taches de varilla de ¾" e instalando un buen número de "lloraderos" para disminuir la presión de poros y la acción erosiva de aguas infiltradas, especialmente las que salen en el contacto arenita/lodolita. Es indispensable perfilar el talud en su totalidad antes de acometer la obra y construir en la base del talud un canal de concreto para evacuación de aguas lluvias.

10.5.4.3.1 Cantidades de obra

Tabla 10-7 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 3 - Zona 3

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Barrera de protección temporal	global	1.0	$300,000	$300,000
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	225.0	$34,200	$7,695,000
Perfilado manual del talud	m^3	540.0	$42,896	$23,163,840
Canal de concreto	m	162.0	$70,405	$11,405,610
Descole de concreto	m	8.0	$80,450	$643,600
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Revegetalización	m^2	2,039.5	$7,700	$15,704,150
Recubrimiento con malla-mortero	m^2	718.2	$48,720	$34,990,704
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 3 - ZONA 3				**$94,164,504**

10.5.4.4 Alternativa 4: Protección del nivel arenoso con malla metálica anclada (**Figura 10-20**)

a) Malla metálica y pernos pasivos: Otra de las medidas adoptadas en varios sectores de los cerros orientales de la ciudad para reducir los efectos producidos por el desprendimiento y caída de grandes bloques de arenita es instalar un recubrimiento de malla metálica de la utilizada en gaviones, anclada al talud en el extremo superior e inferior con pernos pasivos similares a los descritos en el numeral 10.5.4.2.

b) Recalce del estrato de arenita ("concreto dental"): Para eliminar o reducir considerablemente el efecto de "socavación" o erosión en el contacto lodolita - arenita (acción que produce el desprendimiento de bloques) es necesario hacer un recalce de concreto o con malla mortero en la base del nivel arenoso; este procedimiento debe acometerse antes de instalar la malla.

c) Perfilado y drenaje del talud: Al igual que en las alternativas anteriores, se considera indispensable perfilar el talud y construir un canal de concreto en la base del talud.

10.5.4.4.1 Cantidades de obra

Tabla 10-8 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 4 - Zona 3

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Barrera de protección temporal	global	1.0	$300,000	$300,000
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	225.0	$34,200	$7,695,000
Perfilado manual del talud	m^3	540.0	$42,896	$23,163,840
Canal de concreto	m	180.0	$70,405	$12,672,900
Descole de concreto	m	6.0	$80,450	$482,700
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Pernos de anclaje	m	300.0	$105,000	$31,500,000
Malla para gavión revestida con PVC	m^2	539.0	$22,000	$11,858,000
Concreto ciclópeo	m^3	5.0	$366,800	$1,834,000
Revegetalización	m^2	2,039.0	$2,300	$4,689,700
Manto de cobertura vegetal	m^2	718.0	$7,700	$5,528,600
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 4 - ZONA 3				**$99,986,340**

10.5.4.5 Otras alternativas de solución

También se consideró la alternativa de construir un entramado de concreto reforzado (celosía) para dar soporte al estrato arenoso y aprovechar el espacio libre entre vigas y columnas para la recuperación paisajística y ambiental de la zona. Debido a los elevados costos de esta alternativa y a la dificultad constructiva de la misma, decidió descartarse del análisis costo/beneficio final.

10.5.5 Arbol de decisión

En la **Figura 10-21** se presenta el árbol de decisión para la selección de alternativas de mitigación de la Zona 3.

Con base en esta comparación de costos se considera que la mejor alternativa para el manejo del riesgo es la No. 1, la cual adicionalmente favorece el mejoramiento paisajístico del talud.

10.6 Zona 4

10.6.1 Descripción del problema

El costado norte de la zona está enmarcado por un talud de roca empinado, sometido a flujos de tierra y lodo locales (especialmente por salida de aguas servidas provenientes, al parecer, de la urbanización localizada en la parte alta), y eventuales desprendimientos de bloques de arenita (**Fotografía 19 y 20**).

Hacia el extremo oriental de esta zona (el cual limita con la Zona 3) se encuentra un amplio lote utilizado como garaje y parqueadero; se sabe, por información suministrada por los habitantes, que en períodos lluviosos las construcciones del extremo sur del mismo han sufrido la acción de flujos de agua proveniente del talud de arenita – arcillolita (que afecta a los habitantes de la Zona 3). Con la alternativa de solución adoptada para esta última se resuelve dicho problema, pues las aguas lluvias serán captadas por cunetas de concreto y conducidas por un descole hasta una caja en la pata del talud y llevada por tubería enterrada a lo largo del lote hasta la caja más cercana de la Cra. 3ª.

En la parte intermedia del talud se han presentado problemas de desprendimiento y caída de bloques de arenisca los cuales, si bien no han llegado hasta las construcciones de la pata (predios 1 a 4 del inventario), sí representan un peligro latente para éstas y sus habitantes. Por lo tanto, las medidas de mitigación deben enfocarse al sostenimiento o retención de los bloques de los niveles arenosos y a la conformación de una barrera arbórea que limite un área de protección del talud para evitar que la construcción de los predios sea extendida hasta la pata de éste.

El sector occidental de la zona está afectado por flujos locales de lodo y tierra, especialmente en una especie de cañada poco profunda donde el talud tiene un cambio de dirección de este – oeste a noreste – suroeste, favorecidos especialmente por la emanación permanente de aguas servidas. Este fenómeno ha provocado la formación de una cavidad de la cual se han desprendido y deslizado detritos de arenisca y arcillolita; en inviernos fuertes en este sector se han producido varios flujos de lodo (**Fotografía 21**). Cuando el agua del talud alcanza el nivel del lote vacío, sigue por una zanja a lo largo de la cual se han

formado áreas húmedas y pantanosas que han favorecido el crecimiento de pasto y arbustos en forma notoria. El manejo de la amenaza en este sector debe, por lo tanto, encaminarse a la captación del agua que sale del terreno y a la protección y recuperación de la ladera, así como a la delimitación del área que pude ser utilizada por el propietario del predio en el momento en que éste decida construir alguna edificación; esta última medida debe ser adoptada para evitar que durante el proceso de limpieza y adecuación del lote sean intervenidos los taludes norte y occidental y se ponga en peligro la estabilidad de las viviendas existentes en la parte alta.

Al comienzo del estudio causó preocupación la notoria grieta del muro occidental de la habitación posterior del predio 1 (taller de mecánica), pues se temía un proceso de remoción importante en la pata del talud norte de esta zona; luego de la observación y análisis de los procesos del sitio y de la edificación, pudo concluirse que dicho agrietamiento fue causado por las pequeñas excavaciones realizadas por en propietario alrededor de la construcción y por el asentamiento diferencial del concreto ciclópeo de cimentación.

10.6.2 Medidas correctivas (**Figura 10-22** - **Plano 10-1**)

La proximidad de los edificios de Altos del Sol al borde el talud, la pendiente del mismo y la existencia de viviendas en la pata, reducen la posibilidad de plantear medidas de intervención como el tendido o disminución de la pendiente del talud; por lo tanto, se propone el siguiente programa de obras para el manejo de la zona:

a) Drenaje: Construcción de estructuras de drenaje como canales de concreto a lo largo de la parte alta del talud.

b) Instalación de una malla metálica empleada para gaviones, anclada a los niveles arenosos con pernos pasivos de Φ=1" y L=3.0 m.

c) Para solucionar el problema de salida de aguas es necesario recoger las aguas en un trincho de gaviones a manera de pie de amigo que simultáneamente ayude al relleno de la cavidad y sostenimiento del talud; el agua recogida debe conducirse mediante una tubería de PVC hasta el pozo de la EAAB en la Cra. 3ª más cercano.

d) Conformación de una barrera arbórea en la pata del talud norte y de una zona de protección en el talud occidental para evitar que los propietarios de los predios excaven en la pata de los taludes y comprometan la estabilidad de las edificaciones de la parte alta.

e) Colocación de un manto de cobertura vegetal en el sector oriental del talud (hacia la Zona 3) para reforzar el manto vegetal que mantiene estable esta porción de la ladera.

f) Igualmente, es indispensable que se revisen y reparen las tuberías de acueducto y alcantarillado en el conjunto residencial Altos del Sol.

Para el análisis de estabilidad de las obras planteadas se consideró que no existe probabilidad cinemática de movimiento que genere caída de bloques, y que los pequeños flujos de lodo y detritos que se generan por la presencia de agua quedan estabilizados por la presencia de obras de drenaje; adicionalmente, la delgada capa de material que actualmente se ve afectada por fenómenos de remoción será retirada durante la adecuación de las obras.

10.6.2.1 Cantidades de obra y presupuesto

Tabla 10-9 Cantidades de obra y presupuesto alternativa única de manejo Zona 4

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Estructuras de gaviones	m^3	22.0	$125,000	$2,750,000
Lecho drenante	m^3	15.6	$50,900	$794,040
Tubería de desagüe	m	50.0	$15,000	$750,000
Canal de concreto	m	110.0	$70,405	$7,744,550
Descole de concreto	m	12.0	$80,450	$965,400
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Pernos de anclaje	m	120.0	$105,000	$12,600,000
Malla para gavión revestida con PVC	m^2	375.0	$22,000	$8,250,000
Concreto ciclópeo	m^3	4.3	$366,800	$1,577,240
Arborización	unidad	20.0	$17,000	$340,000
Manto de cobertura vegetal	m^2	600.0	$7,700	$4,620,000
VALOR TOTAL ALTERNATIVA DE MANEJO ZONA 4				**$40,652,830**

10.7 Conclusiones

- Para facilitar el planteamiento, análisis y selección de alternativas de mitigación, se asumieron las mismas áreas en que se dividió la zona desde el comienzo del estudio, y para cada una de éstas se determinó el tipo o tipos de amenaza presente.

  - La Zona 1 se encuentra afectada por fenómenos de movimiento de materiales (depósitos masivos y suelos), a tasas moderadas.

  - Las Zonas 2 y 3 están afectadas por un tipo de amenaza similar, desprendimiento y caída de bloques rocosos, pero las condiciones de vulnerabilidad en cada una de ellas difieren considerablemente, debido a la existencia o no de elementos expuestos; dichas diferencias definieron el carácter de las obras de mitigación, pues mientras que en la Zona 2 son eminentemente preventivas, las de la Zona 3 son en esencia correctivas.

- En la Zona 4 se presentan fenómenos de desprendimiento y caída de bloques hacia el extremo oriental y flujos de lodo y de tierras hacia el costado occidental; además el grado de vulnerabilidad varía a lo largo de ella de acuerdo con la existencia de edificaciones.

- El planteamiento de alternativas de mitigación o manejo de riegos se enfocó hacia la reducción de la amenaza y no hacia la intervención de la vulnerabilidad física de los elementos expuestos, pues se consideró más viable y menos costoso lo primero, como resulta por lo general en áreas pobladas en nuestro medio.

- En términos generales, las obras propuestas pretenden impedir el movimiento de masas de terreno y proteger las diferentes zonas contra la degradación ambiental.

11 DISEÑO DETALLADO DE LAS OBRAS DE MITIGACION RECOMENDADAS

Se presentan en este capítulo la descripción y dimensionamiento de las obras que deben adelantarse en cada zona para mitigar el riesgo por fenómenos de remoción en masa en los alrededores de la Urbanización Altos del Sol, barrio Buenos Aires. Las cantidades de obra total y el presupuesto de la alternativa de manejo para cada zona de estudio se presentan en el **Anexo 7**.

11.1 Zona 1

11.1.1 Alternativa seleccionada

Para el tratamiento de la zona norte del área de estudio, la alternativa seleccionada consiste principalmente en el drenaje, la reconformación de las laderas en los sitios con problemas de estabilidad retirando materiales de la capa superficial (ya sean cuerpos de antiguos deslizamientos o rellenos antrópicos con materiales de desechos de las ladrilleras que existían en el sector) y la construcción de dos rellenos de contrapeso de material compactado, uno en la pata del escarpe principal (talud posterior del predio 51) y otro en la parte posterior del lote vacío al oriente del predio 48; en la base de cada uno de estos rellenos deberá construirse un filtro. Estos rellenos serán soportados por muros de gaviones.

Se construirán tres muros de gaviones: uno en la parte media de la ladera (en el terreno ocupado por el predio 51), otro en la base de la ladera paralelo a la Cra. 2ª A (entre el predio y la esquina de la Calle 2 Sur, y otro desde la parte posterior del lote vacío vecino del predio 48 hasta la esquina de la Cra. 2ª A y la Calle 1ª A Sur.

11.1.2 Descripción detallada de las obras de mitigación para la Zona 1

11.1.2.1 Actividades previas al sistema correctivo

Como prerrequisito de las obras recomendadas, antes de iniciar la construcción se deben reparar tuberías de agua potable y aguas servidas del edificio del predio 57 afectado por el movimiento, o en su defecto localizar la fuente (escapes o roturas de cañerías y conductos), captarlas y conducirlas en canales revestidos y tubería PVC hasta el pozo de alcantarillado más cercano, localizado frente a los Bloques 13 y 14, junto al andén de acceso a los edificios.

11.1.2.2 Descapote

Retirar la capa superficial del terreno en espesor de 0,2 a 0,3 m, conservando la cobertura de pasto en forma de cespedones, los cuales se deberán almacenar en las vecindades, y regar al menos cada 3 días. Debido a la magnitud del área por conformar, el material resultante del descapote puede alcanzar volúmenes importantes de difícil manejo; por lo tanto se debe disponer en zonas destinadas para tal fin en proximidad a la urbanización.

11.1.2.3 Reconformación del cuerpo de deslizamientos, muros de contención y rellenos de contrapeso

La estabilización del sector del deslizamiento principal o superior de la Zona 1, se puede lograr mediante el retiro en etapas de una parte de los materiales que forman el cuerpo del deslizamiento, en el sector posterior del predio 51 realizando excavaciones escalonadas de profundidad tal que se llegue al terreno firme existente debajo de la superficie de falla (arcillolita meteorizada), verificando que el terreno de fundación que se encuentre sea estable y firme. Esta reconformación se planeó para lograr un incremento efectivo en el factor de seguridad global de sectores afectados por el deslizamiento, y al mismo tiempo garantizar que los taludes donde se haga una descarga, sean estables; además, se cuida que el retiro de materiales que se propone no constituya eliminación de soporte para terrenos situados en la parte superior de cada sector de la zona.

La reconformación busca dar al terreno una configuración de taludes de corte y bermas; deberá empezar en el costado occidental (vecindad del flanco izquierdo) de la parte inferior del deslizamiento, sobre el costado sur de la carrera 2ª A. Incluye las siguientes actividades:

a) Retirar materiales orgánicos, basuras y restos de estructuras de contención antiguas, hasta obtener una faja rectangular para la construcción de un muro de gaviones que se indica a continuación.

b) Excavar una “caja” de dimensiones mínimas de 4,0 m de ancho por 19,0 m de longitud (esta dimensión paralela a la Cra. 2ª A), y de profundidad tal que el

fondo de la excavación o piso de fundación del muro de gaviones inferior quede a 1.0 m por debajo del nivel de la rasante de la Cra. 2ª A (**Figuras 11-1** y **11-3**)

Este muro, y todos los demás que se recomiendan en el presente estudio, deberá tener el espaldar inclinado hacia atrás con una pendiente 1H:10V, de manera que tenga el "cargue" conveniente por razones de estabilidad al volcamiento.

c) Retirar materiales deslizados en el sector vecino al espaldar del muro, realizando una excavación ligeramente escalonada (**Figura 11-1**), en tramos de 3.0 m de ancho (medidos en dirección paralela a la del cuerpo del muro). Luego se procederá a construir un relleno compactado en el espaldar del muro y sobre el terreno de fundación escalonado. Se repetirá este proceso en otros tramos del ancho mencionado. En el **Anexo 7** se incluyen las especificaciones de calidad de los materiales de relleno y del proceso de compactación.

d) Se continúa la excavación a partir de la cota 2655 m, dejando una berma inferior de 10.0 m de ancho y 23.0 m de longitud, con taludes de corte de 1H:1V de 3.0 m de altura. Se conformará una segunda berma (superior) también de 10.0 m de ancho y 30.0 m de longitud (en dirección transversal al deslizamiento), llegando a la parte media de la zona en proximidad de la vivienda del predio 51.

Las bermas superior e inferior localizadas en proximidad al flanco izquierdo del movimiento, se han diseñado de tal forma que puedan ser utilizados para recreación pasiva; por lo tanto, terminada la construcción o adecuación de todas las obras se deben revegetalizar en su totalidad con los cespedones retirados al iniciar las obras.

e) Demoler la vivienda que se acaba de mencionar (51), retirando por completo restos de materiales de construcción y los suelos blandos y húmedos que allí se encuentren. Se formará en este sector de la casa otra berma de 5.0 m de ancho.

f) A partir del borde sur de la última berma, se hará una excavación de 5.0 m de ancho, 35.0 m de longitud y 1.0 a 1.5 m de profundidad, hasta encontrar la roca meteorizada que subyace al cuerpo del deslizamiento (en este sector se realizó la perforación 1, en la cual se encontró la arcillolita a 1.2 m). Esta excavación deberá tener en planta una forma ligeramente en arco, tal como se indica en el **Plano 11**.

g) En la excavación anterior se deberá construir un muro de gaviones y un filtro, que quedará en el frente de la pata del muro (**Figura 11-1**).

Dicho filtro tendrá una longitud de 45.0 m, ancho de 0.8 m y profundidad promedio de 1.5 m; deberá construirse en dos ramales a partir del eje central de la reconformación, de manera que desagüe hacia ambos flancos, para entregar las aguas de cada ramal a una cuneta que irá en el borde interno (sur) de la berma de 10.0 m de ancho que se indicó en el literal (e). El filtro se construirá con geotextil de las especificaciones dadas en el **Anexo 7**, y tendrá material granular y tubo de desagüe interno. En la **Figuras 11-6 A y B** y **11-7** se presentan algunos detalles del proceso constructivo de filtros.

h) El muro de gaviones superior, tendrá un ancho en la base de 4.0 m, alcanzará 4.0 m de altura, 36.0 m de longitud y las demás condiciones de construcción que se representan en las **Figuras 11-1** y **11-4**; adicionalmente debe dársele el "cargue" recomendado de 1H:10V. Se estima que la corona del muro quedará a la cota 2665 m.

i) Terminada la construcción del muro de gaviones superior, deberá procederse a efectuar un escalonamiento de la faja inferior del escarpe principal del deslizamiento, excavando escalones verticales de 0.5 a 1.0 m de altura (contrapaso) y ancho de 1.0 m a 2.0 m. Este terraceo o escalonamiento de la fundación deberá hacerse un descenso desde la cota 2669 hasta la parte interna de la pata del muro, como se indica en la **Figura 11-1**. Sobre el terreno escalonado se colocará un relleno compactado de recebo areno arcilloso con gravas y rajón, que cumpla las especificaciones del **Anexo 7**. La superficie del relleno tendrá una pendiente 2H:1V e irá hasta la cota 2669, donde se prevé una plataforma de 4.5 m de ancho. El relleno se debe colocar en capas de 0.3 m de espesor y compactarlo con equipo portátil hasta una densidad igual o mayor al 90% de la máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado.

j) Conformar cunetas de concreto en el borde interior de las bermas del terraceo o reconformación.

k) En el costado oriental (flanco derecho del deslizamiento), en el lote vacío localizado al oriente del predio 48 se proyecta la construcción de un tercer muro de gaviones de 22.0 m de longitud de altura variable entre 2.0 y 4.0 m, para que empate con un muro de contención que ya existe sobre el andén del lado occidental de la Cra. 2ª A. (**Plano 11** y las **Figuras 11-2 y 11-5**). Recordar que este muro deberá tener el cargue 1H:10V; su corona quedará a la cota 2658.

l) Una vez terminado el muro deberá descapotarse y escalonar la superficie de la ladera empinada que se eleva al sur del muro, en el sector comprendido entre la cota 2662 y la base del muro, como se indica en la **Figura 11-2**. Sobre el terreno escalonado se colocará un relleno compactado que servirá de contrapeso para la estabilización de los deslizamientos sucesivos que existen en la zona intermedia del flanco derecho del deslizamiento principal, área vecina al occidente del predio 50. Dichos deslizamientos pudieron haberse

intensificado por la excavación antitécnica para la construcción de una vivienda en el lote vacío vecino al predio 48.

m) Continuando en forma ascendente sobre dicho flanco derecho, se construirán dos bermas de 3.0 y 5.0 m de ancho hasta alcanzar el borde superior de la ladera, y bermas de 3.0 m de ancho a las cotas 2662 y 2664.20, cortando en la ladera con taludes 1.5H:1V. La segunda de dichas bermas irá parcialmente en relleno y tendrá la función de confinar un pozo de inspección del alcantarillado.

n) Hacia arriba de la berma del pozo deberá descargarse y suavizarse el terreno mediante corte y retiro de materiales en un espesor de 1.0 a 2.0 m, con taludes 2H:1V y bermas intermedias de 3.0 m de ancho a la cota 2667, y de 4.0 m de ancho a la cota 2669, como se indica en la **Figura 11-2**.

11.1.2.4 Rebanado de escarpes y sellado de grietas

Se debe proceder a suavizar la pendiente de los escarpes principal y secundarios localizados a la altura del predio 57 (Bloque 16 de la urbanización), mostrados en la **Fotografías 4 y 7**, de manera que quede cercana a 2H:1V; para ello deberán hacerse las siguientes actividades:

a) En una faja de terreno centrada en cada escarpe y de ancho igual a 2 veces la altura del escarpe, retirar y almacenar en las vecindades la cobertura de pasto en forma de cespedones.

b) Limpiar las grietas que se encuentran en la base de los escarpes para retirar materiales sueltos, restos de vegetación, basuras, etc.

c) Rebanar la parte alta de cada escarpe utilizando simultáneamente los materiales para ir rellenando las grietas, introduciéndolos en éstas hasta la mayor profundidad posible con pisones (varas) de madera y compactándolos al mismo tiempo. Terminada esta etapa se colocarán de nuevo los cespedones de pasto que hayan sido retirados.

11.1.2.5 Obras de drenaje profundo

Con el fin de lograr una estabilidad completa y confiable, se deberán instalar en los taludes ya conformados y tratados con las obras descritas en el numeral anterior, seis baterías de drenes horizontales, con tres drenes cada una. Las perforaciones para éstos deben tener una pendiente del 10% con la horizontal y longitudes de 25.0 m en los sitios que se indican en el **Plano 11**. Los detalles del proceso constructivo de drenes horizontales se presentan en las **Figuras 11-8 A y B**. Las características de las diferentes baterías son las siguientes:

a) Instalar 3 baterías de drenaje a partir de la cresta del muro de gaviones superior a la cota 2665, y atravesando el relleno de contrapeso del escarpe principal, como se indica en la **Figura 11-1**.

b) Construir 2 baterías de drenaje a partir de la berma situada en la cota 2656, hacia el costado sur del predio 49.

c) Instalar una última batería de drenaje en el talud del relleno del muro de gaviones del flanco derecho de la zona (en la parte posterior del lote vacío vecino al predio 48).

Se busca con estos drenes penetrar en capas de arenisca que se espera encontrar bajo la cresta del deslizamiento. Los drenes conducirán sus aguas a canales o cunetas revestidos de concreto (**Figura 11-9**) y estos a su vez a cajas de inspección antes de entregar al sistema de aguas lluvias del barrio.

11.1.2.6 Revegetalización

La revegetalización se utiliza en los sitios en donde los movimientos de tierra y la clase del terreno pueden favorecer procesos de erosión que comprometan la estabilidad parcial de la obra.

Para la reconformación del terreno es necesario remover casi en su totalidad la capa vegetal, que en algunos sectores se hace escasa, incluyendo la tala de los árboles existentes los cuales presentan condiciones precarias debido al movimiento del terreno; por lo tanto se hace necesario acometer un programa de revegalización y arborización de la zona teniendo en cuenta el uso de cada uno de los sectores.

Una vez terminadas las obras correctivas de la Zona 1 ya descritas se procederá a la colocación de una capa de tierra negra con fertilizantes y sobre ésta se deben reacomodar los cespedones retirados en la fase inicial de construcción. Los árboles talados para la reconformación de la zona deben reponerse sembrando cerezos (Prunus Serotina), falso pimiento (Schinus Molle) o pino romerón (Retrophyllum Rospigliosii)

11.1.3 Cantidades de obra y presupuesto

El cálculo de cantidades de obra y presupuesto de las obras de mitigación descritas en numerales anteriores, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11-1 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 – Zona 1

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Viviendas	unidad	3.0	$10,000,000	$30,000,000
Drenes horizontales	m	450.0	$132,000	$59,400,000
Estructuras de gaviones	m^3	755.0	$125,000	$94,375,000
Excavación y perfilado del talud	m^3	1,697.8	$10,000	$16,978,000
Rellenos compactados	m^3	1,013.6	$10,000	$10,136,000
Canal de concreto	m	374.0	$70,405	$26,331,470
Descole de concreto	m	5.0	$80,405	$402,025
Filtro con geotextil	m	45.0	$69,400	$3,123,000
Arborización	unidad	5.0	$17,000	$85,000
Revegetalización	m^2	3,808.0	$2,300	$8,758,400
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 1				**$249,588,895**

11.2 Zona 2

11.2.1 Descripción general de la alternativa seleccionada

La Zona 2, localizada a lo largo de un antiguo escarpe de explotación minera en el costado oriental de la zona, presenta desprendimiento y caída de bloques de arenita por pérdida de soporte al meteorizarse el nivel arcilloso inferior; adicionalmente, en la base del escarpe se está formando actualmente un relleno con materiales heterogéneos (principalmente desechos de construcción) con el fin de adecuar el área para su futura urbanización.

De las dos alternativas de manejo para esta zona, presentadas en el numeral 10.4.2, se seleccionó la número 1, que consiste en la colocación de un relleno compactado que llega hasta 2.0 m por encima del contacto arenisca/arcillolita, el cual no solo protege a la arcillolita contra la meteorización, sino que también sirve de soporte para los bloques de arenita que puedan estar desprendidos y que no se hayan retirado manualmente; en el tope del relleno quedará una berma de 2.0 m de ancho.

11.2.2 Descripción detallada de las obras de mitigación para la Zona 2

11.2.2.1 Retiro manual de bloques sueltos

Con el propósito de eliminar situaciones potencialmente peligrosas, deberán retirarse del frente del escarpe rocoso los bloques sueltos o susceptibles de caer, o aquellos donde las diaclasas que los separan del macizo rocoso presenten una abertura notable en la parte superior.

Se estima que habrá que retirar bloques rocosos de una faja de altura igual al espesor del estrato de arenita, es decir 3.0 m en promedio, ancho de 0.5 a 1.0 m

medidos en dirección perpendicular a la cara del estrato, y longitud aproximada igual a la mitad de la del escarpe de esta zona, es decir 22.5 m; esta actividad debe realizarse especialmente hacia la parte norte del talud.

Se considera que el desprendimiento y tumbado de bloques podrá hacerse a mano, sujetando los obreros con lazos y arneses de seguridad a puntos resistentes adecuados como postes de concreto o metálicos hincados a distancia conveniente desde la cara del talud.

Los bloques resultantes podrán utilizarse para relleno de gaviones o para los lechos filtrantes que se mencionan más adelante.

11.2.2.2 Preparación de la fundación del relleno

Dado que el relleno de protección del talud tendrá que apoyarse en el relleno heterogéneo y de densidad baja a media que se ha ido construyendo en la zona, es necesario garantizar para el primero unas condiciones de soporte adecuadas. Con tal propósito, deberán realizarse las siguientes actividades:

a) Retirar los 2.0 m superiores del relleno heterogéneo en la franja correspondiente a la base del relleno de protección, de tal manera que se excavará una "caja" de 53.0 m de longitud paralela al escarpe, de ancho variable entre 5.0 y 11.0 m medidos desde la base del escarpe en forma perpendicular y horizontal a éste, y de 2.0 m de profundidad. Bien puede ocurrir que en algunos sectores se encuentre la arcillolita en sitio, que subyace al relleno heterogéneo, a una profundidad menor que los 2.0 m; en estos casos se llevará la excavación solo hasta encontrar dicha roca y formar el escalonamiento que se acostumbra para mejorar las condiciones de fundación de rellenos y que se describe en el literal siguiente.

b) Escalonar la superficie de la arcillolita que se encuentre tanto en el fondo de la caja como en la pared interna de la misma, es decir, en la base del escarpe. Se deberán formar escalones de altura y ancho que fluctúan entre 0.5 y 1.0 m (**Plano 11** y **Figura 11-10**).

11.2.2.3 Lecho drenante

Con el fin de permitir el drenaje fácil de las aguas que afloren a la cara del escarpe, principalmente en el contacto arenita/arcillolita, deberá colocarse una capa de material filtrante con un espesor de 0.4 m, formada por guijarros, grava y arena gruesa cuya curva granulométrica se ajuste a la especificación que se da en el **Anexo 7**.

El lecho drenante desaguará por medio de una tubería plástica perforada de 4" de diámetro colocada a 0.2 m de la base del relleno (o fondo de la caja de fundación) y en el centro del lecho, de manera que haya 0.15 m de material filtrante a cada

lado de la tubería. Hacia la parte norte del talud este lecho drenante empatará con un filtro con geotextil y material granular limpio y durable de 2.0 m de profundidad y 1.0 m de ancho, construido en forma paralela al muro de bloques que separa los predios de la urbanización Altos del Sol del lote vacío de esta Zona 2; en la base de este filtro (el cual no forma parte directa de las obras de estabilización del talud, sino que es una obra complementaria) debe existir una tubería de desagüe (que empate con la del lecho filtrante), tal como se indica en el **Plano 11**; la gradación de los agregados y características del geotextil se especifican en el **Anexo 7**. El sistema debe entregar sus aguas a un pozo localizado en la calle 1ª Sur.

El lecho filtrante deberá ser construido paralela y simultáneamente con el relleno de protección separando los dos materiales por medio de un geotextil no tejido del tipo PAVCO NT2000 o similar, que impida el transporte de finos del relleno compactado al lecho filtrante.

11.2.2.4 Relleno de protección

Se construirá un relleno compactado con material seleccionado con pendiente 1,5H:1V desde el fondo de la caja de mejoramiento de la fundación, el cual llegará hasta las cotas 2682 m (en el extremo sur) y 2679 m (en el extremo norte); la longitud aproximada es de 53.0 m. La pata de este relleno deberá protegerse mediante una fila de gaviones de 2x1x1 colocada sobre el nivel de la superficie actual del relleno heterogéneo.

El nuevo relleno servirá tanto de protección de la sucesión de estratos de arcillolita contra la degradación impuesta por los agentes atmosféricos, como de confinamiento del estrato de arenisca de la parte superior del escarpe. El tope del relleno deberá quedar, como ya se dijo, por lo menos a la mitad del espesor del estrato de arenisca, nivel al cual deberá formarse una berma de 2.0 m de ancho (**Figura 11-10**).

El material por utilizar para el relleno de protección será un recebo arenoarcilloso que cumpla las especificaciones de material de subbase para carreteras que se dan en el **Anexo 7**. El relleno se debe colocar en capas de 0.3 m de espesor y compactarlo con equipo portátil hasta obtener una densidad igual o mayor al 90% de la máxima resultante en el ensayo Proctor Modificado. Como se dijo atrás, la superficie tendrá una pendiente 1.5H:1V, aceptable por razones de estabilidad para que no facilite construcciones ni circulación de personas o semovientes sobre el mismo.

En el frente de la fila de gaviones de la base del relleno se construirá una cuneta revestida con concreto, la cual se continuará sobre el filtro convencional que desagua el lecho filtrante, descrito en el numeral 11.2.2.3, para finalmente entregar al pozo de la carrera 1ª Sur (**Plano 11** y **Figura 11-7**)

11.2.2.5 Obras de drenaje complementarias

En el borde interno de la berma del tope del relleno de protección se deberá construir una cuneta revestida con concreto del tipo representado en la **Figura 11-9**, adosada a la arenisca. Esta cuneta conducirá sus aguas a un descole colocado en el extremo norte del relleno. Debe garantizarse la impermeabilidad en el contacto de la cuneta con la arenisca del escarpe para evitar filtraciones de agua hacia el relleno de protección.

11.2.2.6 Revegetalización

Tanto la berma superior como el talud del relleno de protección deberán protegerse contra erosión mediante la empradización con pasto Kicuyo (Pennisetum Clandestinum), pasto Ryegrass (Tetralite Perenne) o Trébol Blanco (Trifolium Sp.); este proceso de empradización debe realizarse mediante el sistema de manto de cobertura vegetal.

11.2.3 Cantidades de obra y presupuesto

En la siguiente tabla se presentan las cantidades de obra y el presupuesto estimado para la mitigación de riesgos en la Zona 2.

Tabla 11-2 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 – Zona 2

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Remoción manual de bloques sueltos	m^3	50.6	$34,200	$1,730,520
Excavación y perfilado del talud	m^3	380.7	$10,000	$3,807,000
Lecho drenante	m^3	205.8	$50,900	$10,475,220
Rellenos compactados	m^3	1,208.3	$10,000	$12,083,000
Filtro con geotextil	m	95.0	$69,400	$6,593,000
Estructuras de gaviones	m^3	63.0	$125,000	$7,875,000
Canal de concreto	m	140.0	$70,405	$9,856,700
Descole de concreto	m	7.0	$80,450	$563,150
Manto de cobertura vegetal	m^2	512.6	$7,700	$3,947,020
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 2				**$56,930,610**

11.3 Zona 3

11.3.1 Descripción general de la alternativa seleccionada

El escarpe de esta zona, de taludes casi verticales, presenta problemas de desprendimiento de fragmentos de roca de arenisca de la parte superior, ocasionado por la pérdida de soporte por la meteorización de la capa subyacente de lodolita.

Se adoptó la alternativa número 1 que contempla como aspecto central retirar del talud el nivel arenoso mediante la conformación de una berma en el contacto lodolita - arenita; adicionalmente, y aprovechando la existencia de una amplia plataforma en la parte superior del talud, se realizará una adecuación general de la zona para mejorar no solo la estabilidad, sino también el entorno.

11.3.2 Descripción detallada de las obras por mitigación

11.3.2.1 Barrera móvil de protección

Como obra inicial en esta zona es necesario construir una barrera de protección de madera y llantas usadas para evitar que el impacto de los materiales que puedan caer del talud durante su reconformación, pueda afectar a las viviendas de la pata del talud o a sus habitantes. Esta barrera se irá desplazando en la base del talud a medida que avance la construcción de las bermas.

La barrera consistirá de una estructura provisional con un tablero de madera soportado por vigas de madera, con dimensiones aproximadas de 5.0 m de altura y 10.0 a 20.0 m de longitud. Cuando ésta vaya a desplazarse de un lado a otro, se harán unos huecos en la base del talud en los cuales se insertarán los parales que la sostienen dispuestos de manera que los parales penetren al menos 1.0 m dentro de los huecos (**Figura 11-11**).

11.3.2.2 Adecuación del acceso a la parte superior del talud

La adecuación del talud mediante la conformación de las bermas debe iniciarse desde el extremo oriental de la zona (en el límite con la Zona 2), donde existe un promontorio o saliente de talud vertical, que deberá rebajarse en alto grado. En este sector, y debido al empinamiento del escarpe, los volúmenes de corte serán de mayor magnitud que en el resto de la zona; por lo tanto, se ha diseñado la berma superior con un ancho mínimo de 5.0 m (que corresponde a la parte más angosta de la berma), arriba y frente a los predios 29 al 33. El corte se iniciará en la cota 2684 hasta conformar un talud de una altura de 6.0 m hasta la cota 2679, donde irá la berma de 5.0 m (**Plano 11**). La inclinación de los taludes de corte arriba y abajo de dicha berma será 1H:1,5V, inclinación que surgió del análisis de estabilidad (**Anexo 6**) efectuado para este sector de acuerdo con las características de los materiales existentes (**Figura 11-12**).

Durante la ejecución de esta obra es necesario intervenir un área de la urbanización Altos del Sol, motivo por el cual debe retirarse parte de la malla de cerramiento e instalar un cerramiento temporal. Una vez terminada la adecuación de las zonas 2 y 3 será instalado el cerramiento de forma tal que éste quede como se encontraba inicialmente.

11.3.2.3 Excavación de las bermas

Una vez terraceado el promontorio del extremo oriental, se procederá a la adecuación de la berma superior de ancho variable entre 6.0 y 10.0 m y pendiente longitudinal de 15%, en la plataforma natural que existe a todo lo largo de la zona; el descenso de la misma es en sentido noreste - suroeste.

La adecuación de que se habla consiste simplemente en la limpieza de la plataforma y la uniformización de su pendiente. El talud superior a ésta, estable, con inclinación menor de 30° y completamente cubierto por pasto, corresponde a la urbanización Altos del Sol y no será intervenido en forma alguna con movimientos de tierra.

Paralelo al escarpe en proximidad a su borde, se proyecta la construcción de la berma intermedia la cual tendrá 2.5 m de ancho y una pendiente longitudinal, también con descenso hacia el suroeste, del 15%. El corte necesario para formar el escalón tendrá una pendiente 1H:1,5V y una altura de 2.0 m. Esta altura corresponde realmente a la profundización de la excavación desde la berma superior, de tal manera que buena parte del piso de la berma intermedia quedará en la lodolita, o muy cerca del contacto arenisca/arcillolita. Esta berma deberá quedar adicionalmente con una leve inclinación hacia el interior de la misma para propósitos de drenaje de aguas de escorrentía.

La excavación de la berma intermedia se debe realizar en forma cuidadosa debido a la existencia de bloques de roca que hacen parte del estrato de arenita y que podrían caer sobre personal y equipos o sobre las casas de la pata. La barrera móvil descrita en el numeral 11.3.2.1 tiene la función de proteger personas y casas ante esta eventualidad.

Tanto la berma superior como la intermedia, así como la adecuación de la parte inferior del talud, se deben realizar en forma progresiva hacia el sur, hasta llegar al lote 18, donde la berma intermedia estará a la cota 2664 m y la superior a la cota 2668, esta última en proximidad al lote 19.

11.3.2.4 Retiro de los materiales

El retiro de los materiales excavados se hará simultáneo con el avance de la adecuación del escarpe. Dichos materiales se debe disponer en la Zona 2 para utilizarlos en la construcción del relleno de protección.

11.3.2.5 Recubrimiento con malla-mortero

Una vez concluida la reconformación del talud, la berma intermedia (de 2.5 m de ancho), la cual en su mayor parte quedará en lodolita, debe ser protegida de la erosión mediante un recubrimiento con malla-mortero fijada al terreno con taches

de varilla de 0.5 m de longitud y 0.75" de diámetro, insertados en las discontinuidades o intersticios de la roca.

Este recubrimiento abarcará el ancho total de la berma, más 1.0 m de altura sobre ella en la base del talud que la separa de la berma superior, y 2.0 m descolgados sobre el talud inferior a la berma intermedia, como se indica en la **Figura 11-13**.

Durante la instalación de este recubrimiento debe garantizarse la impermeabilidad del contacto entre el talud del estrato arenoso y la malla-mortero, con el fin de evitar la infiltración de agua lluvia que a largo plazo erosione y socave el nivel lodolítico y el problema se vuelva a reactivar.

Dado que la berma intermedia se debió excavar con una ligera pendiente hacia su interior, al construir el recubrimiento de malla mortero se conformará una cuneta de todo el ancho de la berma, y de tipo similar al de la **Figura 11-9 A**.

La malla-mortero deberá cumplir con las especificaciones de construcción descritas en el **Anexo 7**.

11.3.2.6 Obras de drenaje complementarias

Además de la cuneta conformada por el recubrimiento de la berma intermedia, se debe construir un canal revestido con concreto (**Figura 11-9 B**), en la pata del escarpe (parte posterior de las viviendas). Este canal terminará en una caja de inspección que se debe construir en el extremo norte de la Cra. 2ª A, entre los predios 17 y 19; de está se conducirán sus aguas hasta el pozo de inspección del sistema de aguas lluvias más cercano sobre la Calle 5ª Sur (**Plano 11**).

Se construirá otro canal revestido con concreto en el borde interno de la berma superior (**Plano 11**), el cual bordeará la pata del talud que desciende sobre dicha berma desde la Urbanización Altos del Sol.

La cuneta y canal de las bermas deberán desaguar a un descole (**Figura 11-14**) que se construirá en el extremo sur de la Zona 3 hacia el extremo norte del garaje - parqueadero limitado por los predios 4 a 18; dicho descole tendrá una longitud de 15.0 m en descenso desde la cota 2667 y conducirá las aguas a una caja de inspección que se deberá construir en la pata del talud. De esta caja saldrá una tubería enterrada que llevará las aguas recogidas a la caja de inspección construida en el extremo occidental de la Carrera 2ª A (frente a los predios 17 y 19).

11.3.2.7 Revegetalización

En los taludes de corte se recomienda la colocación de un manto de cobertura vegetal del tipo “Agrotextil” o "Biomanto" (similar al recomendado para la Zona 2),

que proteja el material expuesto a procesos de erosión que comprometan su estabilidad; este manto se ilustra en las **Figuras 11-18 A y B**.

La protección con el manto incluye la colocación bajo éste de una capa de tierra orgánica con fertilizantes y semillas o estolones de pasto Kicuyo (Pennisetum Clandestinum), pasto Ryegrass (Tetralite Perenne) o Trébol Blanco (Trifolium Sp.); el conjunto se sostendrá temporalmente por medio de estacas o grapas unidas por cuerdas. De acuerdo con la pendiente de los taludes de corte, se deben utilizar como mínimo 16 grapas por metro cuadrado de área por revegetalizar.

En la berma superior se debe hacer la revegetalización con cespedones.

11.3.3 Cantidades de obra y presupuesto

El cálculo de cantidades de obra y presupuesto para adelantar las obras de esta alternativa se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 11-3 Cantidades de obra y presupuesto Alternativa 1 - Zona 3

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Barrera de protección temporal	global	1.0	$300,000	$300,000
Excavación y perfilado del talud	m^3	2,788.0	$10,000	$27,880,000
Recubrimiento con malla-mortero	m^2	495.0	$48,720	$24,116,400
Canal de concreto	m	162.0	$70,405	$11,405,610
Descole de concreto	m	10.5	$80,450	$844,725
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Revegetalización con cespedón	m^2	640.0	$2,300	$1,472,000
Manto de cobertura vegetal	m^2	1,306.0	$7,700	$10,056,200
VALOR TOTAL ALTERNATIVA 1 - ZONA 3				**$76,336,535**

11.4 Zona 4

11.4.1 Descripción general de la alternativa seleccionada

Como se recordará, existe en esta zona un escarpe con pendiente moderada, en el cual afloran estratos intercalados de arcillolita y arenisca, y que presenta condiciones de estabilidad aparentemente buenas. A la altura de la cota 2663, en proximidad al predio 1, se encuentra una filtración de agua, que ha formado una cavidad en el talud y escurre hacia vecindades del predio mencionado; de acuerdo con los vecinos, en periodos de lluvia incrementa su caudal, aunque por su olor y apariencia puede asociarse a fuga de aguas servidas, tal vez proveniente de algún alcantarillado en mal estado.

Para la estabilización de esta zona solamente se estudió una alternativa que se consideró factible, teniendo en cuenta la proximidad de los edificios del sur de la

Urbanización Altos del Sol y el estado del talud entre los edificios y la malla de cerramiento de la urbanización, cuyo trazado coincide con la corona del talud de esta zona. La solución adoptada incluye un tratamiento con malla anclada en los estratos del sector más empinado de la zona y perfilado de los taludes aledaños a la filtración para obtener taludes 1H:1V y 1H:2V; en este sector se plantea además la construcción de una estructura de gaviones a lo largo del talud, la cual deberá apoyarse en un cimiento de concreto ciclópeo o de gaviones. Adicionalmente para evitar la ampliación de la construcción de nuevas viviendas contra la base del escarpe se recomienda colocar una zona arbustiva o barrera arbórea con vegetación nativa, entre la parte posterior de los predios 1 a 4 y la base del talud (**Plano 11**).

11.4.2 Descripción detallada de las obras de mitigación

11.4.2.1 Recubrimiento con malla anclada

En la faja del talud comprendida entre las cotas 2655 y 2665 y hacia el oriente de la cavidad de la filtración se deberá efectuar el retiro controlado de bloques de arenisca sueltos o en proceso de caída, y dar un perfilado al talud para uniformizar en lo posible su pendiente. Después se procederá a colocar en este sector un recubrimiento con malla de triple torsión revestida en PVC, anclada con pernos pasivos formados por varillas de 1" de diámetro. En las **Figuras 11-15** a **11-17** se presentan los detalles y recomendaciones de construcción.

11.4.2.2 Estructuras de drenaje

En la cañada existente en la parte media de la zona, y en la cual se encuentra la cavidad formada por la filtración de aguas, se deberán ejecutar las siguientes obras:

a) En el terreno de la base del talud, al fondo de la cañada que desciende desde la cavidad hasta la pata del talud se deberá hacer una excavación que tendrá 1.5 m de profundidad, 2.0 m de ancho y 2.0 m de longitud. En el interior de la excavación se colocará material de filtro y un tubo de desagüe de PVC de 4" de diámetro que entregará hacia el sudoeste. Luego se construirá en esta zanja un prisma de sección triangular de concreto ciclópeo que servirá como zapata de una estructura de gaviones. Después se construirá hacia arriba la estructura sencilla que se detalla en la **Figura 11-19** sobre un lecho drenante de 0.3 m de espesor en una zanja de sección rectangular de 1.0 m de ancho y 1.0 m de profundidad. Dicha estructura incluirá gaviones dispuestos longitudinalmente a la zanja a lo largo de la pendiente del talud, con algunos atravesados. La longitud total de la estructura de gaviones, medida en la dirección paralela a la pendiente, será de 12.0 m.

b) Limpieza de la cavidad para retirar materia orgánica y basura que pueda encontrarse. Luego se procederá a rellenarla colocando en el interior un relleno

de grava y arena gruesa que llene el tercio interno del volumen de la cavidad; desde este relleno inicial hasta enrasar con la pendiente general del talud en la boca de la cavidad se colocará en un espesor de 0.3 m material granular grueso, guijarros y grava, y finalmente guijarros y cantos rodados en la boca de la cavidad (**Figura 11-19**). Este relleno deberá llenar por completo la cavidad y quedará contenido en la boca de la cavidad por dos gaviones de 2x1x1 m que se apoyarán sobre la estructura longitudinal de gaviones.

c) La tubería de desagüe del sistema de filtro saldrá por detrás de la base de la estructura de gaviones y seguirá por el lindero occidental del predio 1 hacia una caja de inspección que se construirá en vecindad del frente de dicho predio, de la cual se conducirán la aguas finalmente al sistema de aguas lluvias de la Cra. 3ª.

11.4.2.3 Revegetalización

Para ejecutar esta actividad se ha dividido la Zona 4 en dos subzonas: una superior, por encima de la cota 2665 donde se proyecta la colocación de un manto de cobertura vegetal (agrotextil) siguiendo el mismo procedimiento descrito en el numeral 11.3.2.7.; sin embargo, por ser el talud menos empinado que el de la Zona 3, y de acuerdo con las especificaciones dadas para este ítem, se requerirá tan solo de 9 a 12 grapas por metro cuadrado para sujetarlo (**Figura 11-18**).

La subzona inferior se localiza entre la cota 2665 y el área plana vecina a la base del talud; como tiene una pendiente mas baja, se recomienda implantar vegetación del tipo arbustivo que presente unas condiciones adecuadas para esta zona. Esta medida contribuirá a controlar la ampliación de la construcción de viviendas hacia el talud, y así evitará la excavación de cortes que afecten su estabilidad.

Adicionalmente, es indispensable conformar una barrera arbórea en la parte posterior de los predios 1 a 4, utilizando para ésta cerezos (Prunus Serotina), falso pimiento (Schinus Molle) o pino romerón (Retrophyllum Rospigliossi).

11.4.3 Cantidades de obra y presupuesto

El cálculo de las cantidades de obra y presupuesto de esta alternativa se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 11-3 Cantidades de obra y presupuesto alternativa única de manejo Zona 4

ITEM	UNIDAD	CANTIDAD	Vr. UNITARIO	Vr. TOTAL
Estructuras de gaviones	m^3	22.0	$125,000	$2,750,000
Lecho drenante	m^3	15.6	$50,900	$794,040
Tubería de desagüe	m	50.0	$15,000	$750,000
Canal de concreto	m	110.0	$70,405	$7,744,550
Descole de concreto	m	12.0	$80,450	$965,400
Cajas de inspección	unidad	2.0	$130,800	$261,600
Pernos de anclaje	m	120.0	$105,000	$12,600,000
Malla para gavión revestida con PVC	m^2	375.0	$22,000	$8,250,000
Concreto ciclópeo	m^3	4.3	$366,800	$1,577,240
Arborización	unidad	20.0	$17,000	$340,000
Manto de cobertura vegetal	m^2	600.0	$7,700	$4,620,000
VALOR TOTAL ALTERNATIVA DE MANEJO ZONA 4				**$40,652,830**

11.5 Tratamiento de sitios específicos

En desarrollo del estudio se dio atención particular a dos aspectos colaterales o secundarios, que pueden en un momento dado incidir en la situación general de manejo de riesgos en el área. Fueron ellos:

a) Salida permanente de agua desde un relleno contenido por un pequeño muro de mampostería situado al final de la calle de acceso a la Urbanización, poco antes de la caseta de la portería (**Fotografía 1**).

b) Política a seguir en el caso de la construcción iniciada por el propietario del lote vecino al predio 48, en preparación de la cual se hizo una excavación en la parte trasera del lote, contra un talud en el cual remata el flanco derecho del deslizamiento principal o superior de la Zona 1.

11.5.1 Recomendaciones

a) Filtración vecina a la portería: para este tipo de problemas lo obvio sería localizar la fuente del agua, en un escape de alguna tubería domiciliaria u otras posibilidades, pero esto ya ha sido investigado por otros sin resultado favorable, por lo cual se acude aquí mas bien a conducir el agua en forma controlada.

   Se recomienda colocar detrás del muro, en una excavación hecha al efecto, un geodrén del tipo PAVCO o AdvanEDGE o similar, de 2.0 m de longitud y 0,50 m de altura, como se indica en la **Figura 11-20**.

   La tubería de desagüe del geodren podrá prolongarse por el borde interno del corredor (o andén) hasta entregar a tuberías de aguas lluvias que se

encuentre, o si lo permiten las normas urbanas, pasar en una regata a través del andén y entregar a la calle.

b) Las recomendaciones técnicas para el problema de activación de deslizamiento en el lote vecino al predio 48, se incluyeron entre las pertinentes a la Zona 1, en el numeral 10.3.3. del Capitulo 10 y el numeral 11.1. del presente capítulo.

En relación con la inquietud de la DPAE acerca de autorizar o no que prosiga la construcción (la cual fue suspendida por el mismo propietario ante las manifestaciones de la inestabilidad), se considera que una vez realizadas las obras planteadas en este estudio, en especial el muro de gaviones y el drenaje profundo, será posible construir una vivienda en el resto del lote.

11.6 Conclusiones

- Se procuró acudir a obras de fácil ejecución y que resultan más económicas, teniendo en cuenta facilidades de acceso, limitaciones de recursos financieros conocidas, experiencia de constructores y cierta "cultura" respecto de las obras de estabilización de taludes entre nuestra gente, que aprecia el alto grado la contención, los rellenos y el drenaje (en este orden). Como ilustración puede verse la **Fotografía 2**.

- Entre las obras de mitigación se incluyó la evacuación de los habitantes y la demolición de 3 casas, las correspondientes a los predios 50, 51, y 52. La decisión de llevar a cabo esta demolición se basa en el estado muy precario de las construcciones, con grietas y asentamientos notables, y en la necesidad del espacio que ocupan para desarrollar en forma expedita y comprensiva las obras de mitigación. Por otra parte, se estableció en el estudio que los habitantes actuales son arrendatarios y personas de muy bajos ingresos; al adquirir para demoler, o al indemnizar, es lógico que todo se gestiona con el propietario de cada predio. Estos consultores ignoran como se atiende a las condiciones del arrendatario que va a quedar sin vivienda y sin medios para trastear y establecerse en otra parte. Se recomienda a la DPAE contemplar dentro de sus actividades y decisiones en el área estudiada, y con base en sus programas de beneficio social, el dar apoyo y orientación a dichas familias. Como se mencionó en el capítulo 10 (numeral 10.3.4.1.2) , los predios 50 y 52 no presentan daño actual ni se encuentran en condición de riesgo alto, pero su reubicación es indispensable tanto por los argumentos que se presentaron en las líneas anteriores, como por la necesidad del espacio para adecuar las obras propuestas.

- En líneas generales el esquema básico del presente estudio coincidió con el enfoque("framework") del proceso de manejo de riesgos por deslizamientos

planteado por Fell y Hartford (1997), que comprende básicamente las tres componentes ilustradas en la **Figura 11-21** (Análisis – Evaluación – Manejo).

En cuanto a la primera componente el análisis de frecuencia fue reemplazado por el análisis pobabilístico, mientras que el análisis de consecuencia se realizó prácticamente como algo rutinario en nuestras evaluaciones geotécnicas de zonas inestables.

En lo referente a la segunda componente, evaluación del riesgo, puede decirse que lo de aceptación del riego, (o riesgo tolerable), que apunta ante todo a la comunidad (elementos expuestos) que se pudo detectar, los valores son altos como lo demuestra el hecho de que han construido viviendas hasta dar contra el talud prácticamente, como ocurre en la Zona 3, y han convivido con la amenaza de caída de bloques de arenita a tal grado que se convierten en algo anecdótico los eventos en que uno de tales bloques penetró en una vivienda y causó cierto daño o cosas por el estilo. En otro sector el propietario excavó un talud de altura apreciable en la pata de una parte de la masa en movimiento, (caso del vecino al predio 48), muy seguramente por ignorancia sobre las condiciones de inestabilidad del terreno, quizás fincada (la ignorancia) en falta de conocimiento, y en la tasa muy baja de movimiento.

De estas reflexiones se deriva la recomendación a la DPAE de acompañar a la ejecución de obras de mitigación, una campaña informativa sobre los fenómenos de remoción en masa para la cual sirve como texto muy adecuado la “Guía de Prevención” elaborada por Alfonso y Millán (1999) para la Dirección. Estos consultores ofrecen su colaboración para exponer los resultados del estudio o las recomendaciones ante la comunidad afectada.

Las opciones y análisis de alternativas que alimentan a la segunda componente, fueron tratadas en el Capitulo 10.

Finalmente, en lo tocante a la tercera componente, manejo del riesgo, que abarca la mitigación, se han descrito y cuantificado en el presente capítulo las obras correspondientes a las alternativas que se encontraron más adecuadas en el análisis costo/beneficio. Queda por realizar en el futuro inmediato el monitoreo del terreno y las obras, labor que se recomienda a la DPAE ejecutar y que revierte conocimiento y comprobación de la bondad de las obras puestas en práctica, de acertado de los análisis y suposiciones, y, en especial, tratándose de corregir problemas de inestabilidad de taludes, en los cuales hay tantas fuentes de incertidumbre, la detección oportuna de necesidades de cambio o complemento de las obras que se acometieron.

Para el monitoreo topográfico que puede efectuarse quedan 3 puntos de referencia cuya localización se indica en el Plano No. 1. Con ayuda de representantes de la comunidad, o miembros de Juntas de Acción Comunal u otras, puede organizarse una revisión periódica del terreno para verificar si

aparecen nacederos de agua que por su olor y apariencia indiquen la fuente, o que señalen funcionamiento deficiente o interrumpido de los medios de drenaje instalados.

- En la Zona 2 debe esperarse una gran presión por construir viviendas en el extenso relleno que se ha ido formando. Las obras de mitigación recomendadas y diseñadas aquí tienen importancia en cuanto a evitar problemas relacionados con el escarpe rocoso que limita a dicho relleno por el occidente, pero no tocan lo relacionado con la variedad de condiciones de capacidad portante y asentamientos que pueden enfrentar las construcciones sobre el relleno. Dado que resulta muy complicado evitar la expansión urbana en áreas como esa, la DPAE podría considerar la posibilidad de establecer unas normas mínimas de construcción en el relleno que abarquen aspectos como los siguientes:

  – Retiro de un determinado espesor del relleno heterogéneo y reemplazo por relleno seleccionado y adecuadamente compactado a lo largo de la base de los cimientos previstos.

  – Uso de vigas de cimentación de concreto reforzado que rigidicen el sistema de fundación y trabajen en puente sobre áreas blandas o de baja densidad.

  – Calidad de uniones o empates de tuberías de agua potable y alcantarillado, con miras a evitar fugas que aporten agua al relleno.

Bogotá, D.C., Enero 26 de 2001.

MOYA Y GARCIA LTDA.

Ing. MANUEL GARCIA LOPEZ
Director del estudio

Ing. JULIO E. MOYA BARRIOS
Gerente

Nota: En el desarrollo del presente trabajo han participado los Ing. Hugo E. Acosta M., Mabel C. Lesmes G., Albert Cabrejo y Giovanny Alvarado, así como el Geólogo Mauricio Díaz S., bajo la dirección del Ing. Manuel García López. Como asesor en Evaluación de Riesgos se ha contado con la colaboración del Ing. Flavio Soler.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Cantillo, Carlos (1998) “Propuesta Metodológica para la Evaluación de Riesgos por Movimientos en Masa a Escala Local”. Universidad de Los Andes, Bogotá.

Cruden, D.M. y Fell, R., Eds. (1997). “Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment”. Honolulu, Hawaii, EUA. Publicado por A.A. Balkema, Rotterdam.

Einsten, H.H. (1997). “Landslide risk – Systematic approaches to assessment and management”. En Cruden D.M. y Fell R. Eds. En “Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment”. Honolulu, Hawaii, EUA. Publicado por A.A. Balkema, Rotterdam.

Fell, R. y Hartford D. (1997). “Landslide risk management”. En Cruden y Fell, Eds. Op. Cit.

Flageollet J.C. (1999). "Landslide Hazard - A Conceptual Approach in Risk Viewpoint", Cap 1 de Casale R y Margottini C. Eds. "Floods and Landslides", Springer - Verlag, Berlín.

Flageollet J.C. y Weber D. (1996) "Fall".

González G., A.J. (1999). Asesoría Geotécnica para el estudio de zonificación por fenómenos de remoción en masa en el oriente y suroriente de la Sabana de Bogotá. Realizado para la UPES por INGEOCIM Ltda, Bogotá.

González G., A.J. (1999). “Avalanche risk evaluation of Utica, Colombia”. 1° simposio internacional sobre sensores remotos y sistemas de información geográfica. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

González G, A.J. y Millán, J.A. (1999) "Procedimiento para la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia". XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica", ISSMGE, Foz de Iguazú, Brasil.

González G., Alvaro J. y Millán L, Javier A. (1999). “Resultados de la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en Santafé de Bogotá, Colombia”.

Harr, M.E. (1987). “Reliability – based Design in Civil Engineering”. Dover Publications, N.Y.

Hoek E. & Bray J.W. (1977) Rock Slope Engineering. Second Edition.

IUGS – Working Group on Landslides, Committee on Risk Assessment (1997). “Quantitative risk assessment for slopes and landslides – The state of the art”. En: Cruden D.M. y Fell, R. Eds. Op. Cit.

Leone, F. (1996) Concept de vulnerabilite appliquée L’evaluation des risques generes par les phenomenes de mouvements de terrain. Tesis de doctorado, Universidad J. Fourier, de Grenoble.

Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Ingeominas – Universidad de Los Andes. 1997.

Millán, Javier (1998) "Lineamientos Metodológicos para la Evaluación de la Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa". Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá.

Morgenstern, N.R. (1997). “Toward landslide risk assessment in practice”. En Cruden D.M. y Fell R. Eds., Op. Cit.

Rosenblueth (1975). "Design Philisophy: Structures". citado por Harr M.E. (1987). "Reliabiliy Based Design in Civil Engineering", Dover Publications Inc. Nueva York.

Rosenblueth (1975). "Point Estimates for Probability Moments", citado por Harr M.E. (1987). "Reliabiliy Based Design in Civil Engineering", Dover Publications Inc. Nueva York.

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

Soler S., F. F., et al (1999) "Metodología para Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa en Santafé de Bogotá". XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, ISSMGE, Foz de Iguazu, Brasil.