D P A E

ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACION DE ALTERNATIVAS DE MITIGACION Y DISEÑOS DETALLADOS DE LAS OBRAS PARA ESTABILIZAR ANTIGUO ESCARPE DE EXPLOTACIÓN BARRIO SOTAVENTO II SECTOR, LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR.

INFORME FINAL

INGENIERIA Y DESARROLLO AMBIENTAL LTDA.

Indesa Ltda.
Ingenieria y Desarrollo Ambiental Ltda.

ABRIL DEL 2000

INFORME FINAL

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1

1.	**INTRODUCCIÓN**	**1**
1.1	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL ESTUDIO	1
1.2	ORGANIZACIÓN DEL INFORME	2
1.3	PROPUESTA DE EJECUCIÓN	3
1.3.1	RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE	3
1.3.2	Visita de Reconocimiento	3
1.3.3	Elaboración De Cartografía Base Y Temática	4
1.3.4	Investigación del Subsuelo	5
1.3.5	Análisis Geotécnico	6
1.3.6	Zonificación de Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa	7
1.3.7	Análisis de Vulnerabilidad y Riesgo	8
1.3.8	Evaluación de Mitigabilidad y Análisis de Costo/beneficio	9
1.3.9	Diseño, Especificaciones y Presupuesto de las Obras Recomendadas	9
1.3.10	recomendaciones Paisajísticas	9

CAPITULO 2

2.	**DIAGNOSTICO**	**1**
2.1	LOCALIZACIÓN	1
2.2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1

CAPITULO 3

3.	**ESTUDIOS BÁSICOS**	**1**
3.1	TOPOGRAFÍA	1
3.1.1	Levantamiento Topográfico	1
3.1.2	Procedimiento Cartográfico	3
3.2	GEOLOGÍA	3
3.2.1	Geología Regional	4
3.2.2	Geología Local	5
3.3	GEOMORFOLOGIA	11
3.3.1	Geomorfología Regional	11

3.3.2	Geomorfología Local	11
3.4	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	13
3.4.1	Exploración del Subsuelo	13
3.4.2	Ensayos de Laboratorio	14
3.4.3	Características del Subsuelo	15
3.5	ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO	30
3.5.1	Precipitación	32
3.5.2	Precipitación de corta duración – Curva de intensidad – Duración – Frecuencia	33
3.5.3	Relación de Precipitación Crítica - Duración que Disparan Movimientos en Masa	37
3.6	INVENTARIO DE VIVIENDAS	38

CAPITULO 4

4.	**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE AMENAZA ACTUAL**	**1**
4.1	ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA	1
4.2	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	3
4.2.1	ANÁLISIS CINEMÁTICO	3
4.2.2	Análisis Estático	5
4.3	EVALUACIÓN DE AMENAZA ACTUAL	15

CAPITULO 5

5.	**VULNERABILIDAD Y RIESGO ACTUAL**	**1**
5.1	VULNERABILIDAD SOCIAL	2
5.2	VULNERABILIDAD FÍSICA	4
5.2.1	Índice de Exposición	4
5.2.2	Índice de Resistencia (IR)	6
5.2.3	Índice de Vulnerabilidad Física	14
5.3	RIESGO ACTUAL	16

CAPITULO 6

6.	**MEDIDAS CORRECTIVAS**	**1**
6.1	EVALUACIÓN DE AMENAZA FUTURA	1
6.2	VULNERABILIDAD FUTURA	15
6.3	EVALUACIÓN DE RIESGO Y SISTEMAS DE DECISIÓN BAJO INCERTIDUMBRE	15

CAPITULO 7

7.	**DISEÑO DETALLADO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA**	**1**

CAPITULO 8

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 1
8.1 CONCLUSIONES 1
8.2 RECOMENDACIONES 2
8.2.1 Obras de Infraestructura Urbana y Control 2

ANEXOS

ANEXO 1 CARTOGRAFIA

ANEXO 2 TOPOGRAFÍA

ANEXO 3 GEOTECNIA

ANEXO 3A COLUMNAS ESTRATIGRAFICAS

ANEXO 3B REGISTROS DE EXPLORACION

ANEXO 3C INVENTARIO DE PROCESOS

ANEXO 3D LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL

ANEXO 3E RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 3F INVENTARIO DE VIVIENDAS

ANEXO 3G ANÁLISIS CINEMATICO

ANEXO 3H ANÁLISIS PARAMETRICO

ANEXO 3I ANÁLISIS DE ESTABILIDAD SIN MEDIDAS

ANEXO 3J ANALISIS DE ESTABILIDAD CON MEDIDAS

ANEXO 4 HIDROLOGIA

ANEXO 5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ANEXO 6 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 3

No	NOMBRE	Pág.
TABLA 3.1	CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA DE SANTA MARIA DE USME	**16**
TABLA 3.2	INVENTARIO DE VIVIENDAS	**22**

CAPITULO 4

TABLA 4.1	RESUMEN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CINEMATICO PARA LOS TALUDES DOMINANTES BARRIO SOTAVENTO	**4**

CAPITULO 5

TABLA 5.1	DETERMINACIÓN DE LAS DISTANCIAS DE VIAJE DE LAS MASAS POTENCIALMENTE INESTABLES	**2**
TABLA 5.2	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESLIZAMIENTO	**8-9**
TABLA 5.3	VALORES ASIGNADOS PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS	**12**
TABLA 5.3A	VALORES ASIGNADOS PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS	**13**
TABLA 5.3B	RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE DAÑO Y EL ÍNDICE DE DAÑO	**13**
TABLA 5.4	GRADO DE VULNERABILIDAD	**14**
TABLA 5.5	DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE RIESGO ACTUAL	

CAPITULO 7

TABLA 7.1	CANTIDADES DE OBRA	**6**
TABLA 7.2	PRESUPUESTO	**7**

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

No	NOMBRE	PAGINA
FIGURA 2.1	LOCALIZACIÓN GENERAL	**2**

CAPITULO 3

FIGURA 3.1	POLIGONAL	**2**
FIGURA 3.2	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA	**5**
FIGURA 3.4	ANÁLISIS ESTRUCTURAL SOTAVENTO	**18**
FIGURA 3.5	ANÁLISIS ESTRUCTURAL SOTAVENTO	**19**
FIGURA 3.6	ANÁLISIS ESTRUCTURAL SOTAVENTO	**20**
FIGURA 3.7	ANÁLISIS DE FRECUENCIA FAMILIA DIACLASAS D2 (REGIONES 1 y 2)	**22**
FIGURA 3.8	ANÁLISIS DE FRECUENCIA FAMILIA DIACLASAS D3 (REGION 1)	**23**
FIGURA 3.9	ANÁLISIS DE FRECUENCIA FAMILIA DIACLASAS D4 (REGION 1)	**24**
FIGURA 3.10	PRECIPITACIÓN MENSUAL MULTIANUAL – ESTACIÓN SANTA MARIA DE USME	**29**
FIGURA 3.11	CURVAS GENERALIZADAS IDF	**30**
FIGURA 3.12	RESUMEN DE HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN TOTAL Y EFECTIVA	**32**

CAPITULO 4

FIGURA 4.1	ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN A-A´	**8**
FIGURA 4.2	ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN D-D´	**9**
FIGURA 4.3	ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA DE TRACCIÓN - SECCIÓN E-E´1	**10**
FIGURA 4.4	ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA DE TRACCIÓN - SECCIÓN F-F´4	**11**

FIGURA 4.5 ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN H-H´ **12**

FIGURA 4.6 ANÁLISIS PARAMETRICO – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN J-J´ **13**

FIGURA 4.7 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LA ARCILLOLITA **15**

FIGURA 4.8 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA LA ARENISCA METEORIZADA Y PLANOS DE DISCONTINUIDAD **16**

FIGURA 4.9 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA EL MACIZO – FORMACIÓN BOGOTA **17**

FIGURA 4.10 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA EL DEPÓSITO FLUVIO-GLACIAL (Qfg) **18**

FIGURA 4.11 DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA EL CONGLOMERADO Y ROCA TRITURADA **19**

FIGURA 4.12a DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA EL DEPÓSITO ANTRÓPICO (Qad) **20**

FIGURA 4.12b DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA PARA EL DEPÓSITO ANTRÓPICO (Qad) **21**

FIGURA 4.13 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL SECCIÓN A-A´ **23**

FIGURA 4.14 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL SECCIÓN D-D´ **24**

FIGURA 4.15 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN SECCIÓN E-E´ **25**

FIGURA 4.16 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN SECCIÓN F-F´ **26**

FIGURA 4.17 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL SECCIÓN H-H´ **27**

FIGURA 4.18 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL SECCIÓN J-J´ **28**

FIGURA 4.19 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLA POR DESLIZAMIENTOS ROTACIONALES **30**

FIGURA 4.20 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE FALLA PLANAR CON GRIETA DE TRACCIÓN **31**

CAPITULO 5

FIGURA 5.1 FACTORES QUE DETERMINAN LA VULNERABILIDAD SOCIAL **3**

FIGURA 5.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS QUE CONDICIONAN LA VULNERABILIDAD SOCIAL **5**

FIGURA 5.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIVIENDAS **10**

FIGURA 5.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DEL ÍNDICE DE EXPOSICIÓN E ÍNDICE DE RESISTENCIA **11**

FIGURA 5.5 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA E ÍNDICE DE RIESGO **15**

CAPITULO 6

FIGURA 6.1 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN – SECCIÓN E-E´1 **4**

FIGURA 6.2 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN – SECCIÓN F-F´1 **5**

FIGURA 6.3 MODELO DE FALLA ROTACIONAL CON TERRACEO DEL TALUD SECCIÓN H-H´ **6**

FIGURA 6.4 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN A-A´4 **7**

FIGURA 6.5 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN D-D´4 **8**

FIGURA 6.6 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN A-A´4 **9**

FIGURA 6.7 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN D-D´4 **10**

FIGURA 6.8 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN – SECCIÓN E-E´1 **11**

FIGURA 6.9 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA PLANAR CON GRIETA A TRACCIÓN – SECCIÓN F-F´1 **12**

FIGURA 6.10 FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA – MODELO DE FALLA ROTACIONAL – SECCIÓN J-J´ **13**

FIGURA 6.11 MODELO DE FALLA ROTACIONAL CON ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN EN LA PATA **14**

ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN DE DESLIZAMIENTOS – ZONA LAFE 1 – **17**

FIGURA 6.12 SECCIÓN DE ANÁLISIS E-E´

FIGURA 6.13 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN DE DESLIZAMIENTOS – ZONA LARE 1 – SECCIÓN DE ANÁLISIS H-H´ **18**

FIGURA 6.14 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN DE DESLIZAMIENTOS – ZONA LADE[1] – SECCIÓN DE ANÁLISIS J-J´ **19**

CAPITULO 7

FIGURA 7.1 CALCULO DE VOLUMEN DE PERFILADO ZONA LARE (1:0H : 2.0V) **2**

FIGURA 7.2 CALCULO DE VOLUMEN DE PERFILADO ZONA LAFE (1:0H : 3.0V) **3**

FIGURA 7.3 CALCULO DE VOLUMEN DE PERFILADO ZONAS LNME y LNMD (1:5H : 1.0V) **4**

FIGURA 7.4 CALCULO DE VOLUMEN DE PERFILADO ZONA LAFE (1:0H : 2.0V) **5**

LISTA DE PLANOS

No	NOMBRE
1	Mapa base
2	Geología regional
3	Geología local
4	Geomorfología
5	Exploración del subsuelo
6	Regiones estructurales
7	Zonas homogéneas
8	Mapa de amenaza actual por falla planar con grieta a tracción
9	Mapa de amenaza actual por falla rotacional
10	Mapa de amenaza actual
11	Codificación y tipología de viviendas
12	Mapa de exposición
13	Vulnerabilidad física actual
14	Mapa de riesgo actual
15	Medidas correctivas
16 A, B y C	Detalles
17	Urbanismo y paisajismo

RESUMEN EJECUTIVO

La DPAE suscribió entre el FONDO PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS e INGENIERÍA Y DESARROLLO AMBIENTAL Ltda. – INDESA LTDA, un contrato para elaborar el estudio para evaluación de los riesgos por remoción en masa, las alternativas de mitigación y los diseños detallados de las obras para estabilizar un antiguo escarpe de explotación en el barrio Sotavento II sector, localidad Ciudad Bolívar.

Con este estudio se pretende obtener un instrumento para la planificación integral del sector, evaluar la condición actual de estabilidad de los taludes que entallan la zona de explotación y los cortes perimetrales, estructurar árboles de decisión que facilitaran la selección de alternativas con relación beneficio-costo aceptable y diseñar las obras de mitigación y control para reducir los niveles de riesgo, efectuando los respectivos estimativos de precios unitarios, cantidades de obra, presupuestos y especificaciones técnicas.

El informe se organizó de forma secuencial efectuando los siguientes pasos: a- Descripción del problema, b- Elaboración de estudios básicos, c- Análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza d- Determinación de la vulnerabilidad y del riesgo actual, e-determinación y descripción de las medidas correctivas factibles y, finalmente, diseño detallado de las mismas y conclusiones y recomendaciones del estudio.

Los taludes que integran el antiguo frente de explotación minero objeto del estudio, hacen parte de un sistema de cerros alineados que corresponden a la prolongación noroeste del cerro Dona Juana. La zona se localiza entre los cuadrángulos 93950 m N a 94300 m N y 93300 m E a 93550 m E. y pertenece a los barrios Sotavento y Casa de Teja, de la localidad de Ciudad Bolívar, y ocupa un área aproximada de 4.2 Has, enmarcada entre las calles 73ª sur y 74B sur, y las carreras 16ª y 17 Bis.

Se efectuó un levantamiento topográfico del sector estudiado que permitiera presentar los diseños de las obras de protección recomendadas (escala 1:500) y los mapas de zonificación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Se establecieron los niveles litológicos en términos de unidades de roca y suelo con su ubicación espacial, los principales rasgos estructurales y la morfodinámica. Se hizo énfasis en la determinación de la geología estructural del macizo rocoso, los espesores y grados de alteración de los materiales depositados, la presencia de suelos residuales, las evidencias de actividad tectónica reciente y la potencialidad de movimientos en masa.

Para la evaluación del estudio geotécnico básico se efectuó la identificación y delimitación de los diferentes procesos de inestabilidad, activos o potenciales, que se encuentran en el sitio en estudio, definiendo el alcance del programa de exploración geotécnica requerido para determinar los parámetros necesarios con el fin de acometer su análisis. Cada proceso se registró en una ficha técnica y cartográfica, en la cual se consignó toda la información concerniente al mismo (clasificación del proceso, magnitud, eventos detonantes y contribuyentes, frecuencia de movimiento, actividad, tendencia a la propagación, daños producidos, geología estructural, morfometría del talud, etc.).

Con base en los resultados del levantamiento geológico y del inventario de procesos se efectuó el programa de exploración. Estas actividades permitieron definir: los afloramientos para el levantamiento estructural, los sitios de mayor concentración de la investigación del subsuelo (bien fuera por el tamaño del área afectada por un movimiento, o por su grado de actividad); los puntos para la toma de muestras del material rocoso y de los planos de discontinuidad; y el tipo de ensayos de laboratorio a realizar.

Se efectuó el inventario de viviendas en el que para cada residencia se consignó información concerniente a: su localización, propietario, número de habitantes, estructura, daños y sus causas, servicios públicos de que dispone, condiciones del suelo de fundación, estabilidad del mismo y recomendaciones.

El estudio hidrológico tuvo como objetivo describir el régimen temporal y espacial de la precipitación media anual y

determinar el comportamiento de aguaceros de corta duración, este último elemento prioritario para calcular los caudales máximos esperados, con el fin de diseñar las obras de drenaje para la estabilización del talud. Se evaluó la precipitación; se determinaron las isoyetas medias mensuales y anuales, las curvas de intensidad-duración-frecuencia de lluvias máximas y la relación de precipitación crítica (duración que dispara movimientos en masa).

Para la investigación del subsuelo se hizo un levantamiento detallado de los afloramientos rocosos, identificando tipo, espesores y condición local de la roca (esta tarea facilitó la formulación del modelo geológico en la zona), y los levantamientos estructurales que permitieron concluir sobre la influencia tectónica y sobre el papel de las discontinuidades en la estabilidad de los cortes existentes. También se recurrió a la exploración directa mediante sondeos mecánicos o barrenos, con el fin de definir los principales patrones geométricos de los depósitos inconsolidados recientes. Los sondeos se complementaron con ensayos de campo de penetración estándar. El tipo de ensayos dependió de las condiciones (tipo, estado) de las muestra y del material. Así por ejemplo, la caracterización del material rocoso se realizó sobre muestras de bloque las cuales fueron sometidas a ensayos de peso unitario, carga puntual, compresión inconfinada y corte directo. La clasificación y caracterización del material de los depósitos cuaternarios. Se llevó a cabo mediante la realización del ensayo de penetración estándar.

Con base en la investigación de campo, en los ensayos de laboratorio y en algunos principios básicos de la geología estructural se elaboraron modelos (aproximados) del subsuelo para la zona de estudio, que destacan la secuencia estratigráfica, la disposición estructural del macizo y los parámetros geomecánicos obtenidos para cada horizonte de suelo o roca. Se empleó durante la elaboración de este ejercicio, la base cartográfica obtenida del levantamiento topográfico, escala 1:1.000. La sección estratigráfica se levantó en el mismo sentido del azimut de buzamiento de la estratificación promedio, de tal manera que tanto el buzamiento, como los espesores de la secuencia estratigráfica se aprecian en verdadera magnitud. Igualmente, para cada proceso de inestabilidad se planteó un modelo geotécnico, donde se muestro la secuencia estratigráfica, parámetros geomecánicos y posición probable de la superficie de falla. Este modelo es de gran importancia para el desarrollo del análisis paramétrico y de estabilidad.

La definición de las zonas homogéneas se realizó contemplando variables como: material (unidad de roca y tipo de suelo), condición estructural y propiedades físico-mecánicas. Para este último tópico se recurrió a la clasificación del macizo por ser éste el principal ambiente de formación (y trabajo) en la zona. Se formuló, gracias al trabajo de levantamiento estructural, una clasificación del sector en regiones estructurales con base en el número y características de las familias de discontinuidades.

Para efectuar el análisis Paramétrico (Caracterización Geomecánica) se realizaron varios análisis de estabilidad con el fin de obtener factores de seguridad iguales a la unidad y se le superpusieron los valores fisicomecánicos (c,ϕ) reportados por el laboratorio, para diferentes taludes de la zona en estudio y condiciones de las variables (endógenas y exógenas),

En cuanto a los análisis de estabilidad con los resultados de los trabajos previamente efectuados, se procedió a realizar para el mecanismo de falla más importantes por zona estructural, los análisis de estabilidad contemplando las condiciones actuales y futuras. Se realizaron en una primera etapa, análisis direccionales de los modos de falla a lo largo de los planos de debilidad estructural y determinación de los modos probables de falla a partir de la aplicación del análisis cinemático y la teoría del bloque crítico. En una segunda etapa, se modelaron con ayuda de los métodos de equilibrio límite, los modos de falla observados en campo, entre ellos: deslizamientos rotacionales, y falla de bloque con y sin grieta de tracción.

Los análisis de estabilidad se efectuaron para las diferentes condiciones esperadas, variando los parámetros de resistencia entre los valores mínimo y máximo esperados (funciones de densidad de probabilidad), teniendo en cuenta la ocurrencia o no de lluvias y sismos, y para las diferentes alternativas de mitigación planteadas (subdrenaje, perfilado, etc).

Como resultado de la evaluación de la susceptibilidad y de los eventos detonantes, del inventario de fenómenos de remoción en masa, de la determinación de la magnitud, estado de actividad y tendencia a la propagación de los actuales procesos de inestabilidad, se estimaron los niveles de amenaza actuales y futuros del sector. En escala 1:1000 y al nivel de detalle que se esperaba obtener de la investigación geotécnica, se usó de un método cuantitativo (técnica determinística) para la evaluación de la Amenaza.

De esta manera la amenaza se modeló como función de múltiples factores (internos o externos) los cuales se expresan como variables aleatorias. En este sentido, de acuerdo con la funciones de probabilidad de las fuentes de incertidumbre (o variables aleatorias como por ejemplo: parámetros de resistencia, aceleración sísmica y nivel de agua) se efectuaron diferentes análisis de estabilidad que permitieron obtener las curvas de densidad de probabilidad del factor de seguridad, soporte para estimar la probabilidad de falla. A partir de los resultados del análisis de amenaza y de las observaciones de campo, se identificaron y localizaron los elementos en riesgo (viviendas). Una vez identificados, se procedió a determinar su grado de vulnerabilidad, entendido este último como una función de las pérdidas esperadas ante la ocurrencia de un evento determinado.

Para la vulnerabilidad social, se tomaron en cuenta el nivel de ingresos, los daños sufridos por las viviendas, las recomendaciones para medidas urgentes y el cubrimiento de servicios públicos, con el fin de cualificar la conciencia de los pobladores ante los eventos amenazantes y su capacidad para reconstruirse. Aspectos como la edad y área de construcción, estructura de techo, cubierta, tipo de sistema estructural, calidad de la construcción y daños en la misma, fueron los utilizados para estimar el índice de vulnerabilidad física.

La vulnerabilidad social se definió en forma cualitativa con base en las apreciaciones del experto en riesgos; mientras el modelo empleado en la evaluación del índice de vulnerabilidad física se basó en adaptaciones a las propuestas realizadas por Léone (1996) y por Ingeocim (1998). En este último sentido se determinó con base en la composición orgánica y estructural de las residencias y de la longitud potencial de viaje de las masas inestables, las zonas de afectación directa o indirecta para cada mecanismo de inestabilidad, los índices de exposición (IE) y de resistencia (IR). Estos elementos fueron el soporte para la determinación del índice de vulnerabilidad física. (IVF)

El índice de exposición (IE) se estimó como la relación entre área afectada del predio (Aaf) y el área total del mismo (At). Por su parte el índice de resistencia se calculó a partir de la contribución de la resistencia de los diferentes materiales del sistema estructural de las viviendas como son: la cubierta, la estructura de techo y el tipo de sistema estructural. A las variables mencionadas se les asignará un aporte de forma cualitativa, intentando describir su contribución como elemento reductor de la energía cinética de las masas inestables. Con los índices de resistencia y exposición hallados anteriormente, se calculó finalmente el índice de vulnerabilidad física (IVF).

Finalmente, analizada tanto la amenaza como la vulnerabilidad, se llevó a cabo la integración de estas dos variables para definir el riesgo. Para ello se determinaron los costos probables de falla a partir de los escenarios de afectación, el índice de vulnerabilidad física y los costos iniciales de los elementos expuestos (entendidos por ejemplo para el caso de las viviendas como la suma del costo comercial de la vivienda y del valor de los enseres). El riesgo se obtuvo como el producto de la probabilidad de falla por el costo de falla.

Con base en la evaluación de amenaza, en los resultados de los análisis de vulnerabilidad y riesgo actual y de sus zonificaciones, se identificaron para cada sector las alternativas de mitigación viables técnica y económicamente. La selección de la mejor alternativa en cada zona se efectuó con base en un análisis de costo/beneficio, elaborado mediante la metodología de árboles de decisión (Wu et. al., 1994), para lo cual se hizo un análisis probabilístico de los taludes con la incorporación de los elementos de contención o las medidas de mitigación (Amenaza Futura) y la respuesta de los elementos (viviendas) bajo este nuevo marco de acción (vulnerabilidad futura). Así, se obtuvo el costo esperado para

cada alternativa, el menor de los cuales determinó la mejor opción. Esta tarea permitió concluir sobre qué áreas poseen riesgo mitigable y no mitigable, y en dónde es conveniente reducir el nivel de amenaza, es decir llevar a cabo obras de contención o mitigación y cuál es la mejor alternativa (obra) y, en donde es mejor evadir el problema o sea, reducir el nivel de vulnerabilidad (reubicar).

A medida que se definieron las obras de mitigación, se procedió a su diseño, elaboración de cantidades de obra, presupuestos y especificaciones de construcción de las mismas, teniendo en cuenta las acciones a que estarán sometidas, garantizando así su durabilidad. Como resultado de esta etapa, se entregan los respectivos planos de construcción a escala 1:500 y las cantidades de obra, presupuestos y especificaciones de construcción. Con el objeto de garantizar que los terrenos estabilizados tendrán un uso adecuado por parte de la comunidad, se recomiendan obras paisajísticas a nivel de bocetos de las obras urbanísticas complementarias, tales como demoliciones, empradización, reforestación, etc., los cuales se presentan en planos a escala 1:1000.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La estructura urbana de la zona de estudio descansa sobre macizos rocosos pertenecientes a las Formaciones Bogotá (Tpb) y Regadera (Ter); el espesor promedio de cada nivel varía entre 1.0 y 3.0 m.. Estos afloramientos se encuentran altamente afectados por fallas; se destaca la presencia de procesos acentuados de fracturamiento, replegamiento y acuñamiento de las unidades litológicas, relacionados con un lineamiento de falla. Los depósitos producto de deslizamientos en el sector están ubicados en la zona baja del talud. El comportamiento geotécnico de las laderas está regido por las propiedades de los macizos.

Los procesos morfodinámicos más relevantes son la erosión en surcos y cárcavas, la movilización y caída de bloques, y los derrubios. Existen además evidencias del mecanismo de falla que controla la caída de bloques, ya que existen grietas de tracción claramente definidas en la parte superior del talud, posiblemente controlada por una familia de diaclasas. Los fenómenos de remoción en masa afectan los sectores oeste y la franja central del área de estudio.

En el costado Oeste de la zona se han producido movimientos de moderado volumen (pequeños conos de acumulación), detonados probablemente por la acción tanto del agua de infiltración como del hombre, esta última expresada en los trabajos de conformación del mismo talud en actividades de construcción de vivienda y explotación artesanal de material.

La intervención antrópica ha sido uno de los agentes de la ocurrencia de los fenómenos de remoción en masa, lo cual se ve reflejado en actividades como el vertimiento de aguas servidas (el cual ha contribuido paralelamente a la erosión y a la infiltración ocasionando la pérdida de resistencia de los materiales que componen la ladera), el uso intenso del sector, el cual era una cantera que aún hoy día es explotada (aunque de manera muy puntual). Este marco de influencia, matizado por una condición cualitativa de moderada y localmente alta amenaza y un moderado a alto grado de vulnerabilidad de las viviendas, producto del tipo de estructura y de la calidad de la construcción de las mismas (de regular a pobre) resaltan el nivel de riesgo en la zona.

Los escenarios de riesgo están centrados en el límite inferior al costado norte y centro del escarpe, producto de la invasión del mismo y donde los procesos de erosión acentuados, originan focos de inestabilidad, los cuales tienen especial repercusión en la permanencia de las viviendas. El número total de residencias involucradas puede alcanzar las treinta y siete unidades, de las cuales 8 viviendas se encuentran adosadas a la pata del talud en el principal escenario de exposición. 8 corresponden a viviendas de recuperación cimentadas en arcillolita y pueden sufrir daños severos por efecto de cualquier tipo de fenómeno de remoción en masa, el 80% restante son viviendas construidas con materiales y bajo normas de construcción y calidad moderadas.

Por su parte la condición de amenaza actual, entendida como probabilidad de falla, es de baja a media. Esto encuentra explicación por las pocas evidencias morfológicas como: cicatrices, grietas de tracción, escarpes de falla, etc. de inestabilidad, especialmente en los costados este y oeste del frente de explotación, que permiten concluir que pueden desarrollarse algunas fallas locales o generales, y afirmar de antemano que la probabilidad de falla de estos sitios se encuentra entre 0.5 y 1.

La vulnerabilidad se puede considerar como moderada, aunque en la parte central del frente de explotación la cualificación es alta debido al importante grado de exposición de las viviendas de recuperación dispuestas en este sector. En las franjas este y oeste de la cantera el grado de vulnerabilidad se reduce porque las viviendas se encuentran en el límite de la zona de exposición directa, además cuentan con una mejor calidad de conformación que las observadas en la zona central.

El sector se caracteriza por presentar un moderado a alto nivel de riesgo, producto de la alta condición de exposición de algunas viviendas, personas y líneas vitales que se encuentran en la inmediata vecindad al cuerpo central de la ladera y por la acción del hombre como agente detonante de los movimientos.

2. TOPOGRAFÍA

Como elemento fundamental en la formulación de la cartografía geológica, geomorfológica, geotécnica, y para efectos del análisis y diseño de las obras correctivas se realizó un levantamiento topográfico detallado, escala 1:1000. Con él se pretendió registrar lo más preciso posible la morfometría del frente de explotación, las franjas críticas de estabilidad, las unidades residenciales (vulnerables o no ante potenciales desastres), y todo tipo de estructura física presente en el sector de estudio (postes de alumbrado, pozos de inspección, caminos peatonales, vías, etc).

3. GEOLOGÍA

El relieve del barrio está desarrollado en rocas del terciario, pertenecientes a la Formación Bogotá (Tpb) y a la Formación Regadera Superior (Trs), y depósitos cuaternarios asociados tanto a actividad antrópica (rellenos del antiguo frente de explotación) como a procesos hidrogravitacionales, caídas de rocas, deslizamientos, y depósitos fluvioglaciares. S levantaron seis (6) columnas estratigráficas, tomadas a lo largo del talud en los lugares de mejor exposición de la secuencia, se llevó un control estructural detallado y un análisis de estructuras encontradas dentro de los sitios de interés**.**

La zona de estudio indica claras diferencias en el proceso de sedimentación entre el Este y Oeste, donde se evidencia un claro dominio de bancos de arenisca friables que corresponden a la Formación Regadera (zona este y norte) y un dominio netamente arcilloso en el sector oeste que corresponde a la Formación Bogotá (Tpb) y abarca la mayor parte del área de estudio.

El proceso de formación del marco estratigráfico unido a la actividad tectónica, dan lugar desde ya a la división del área de estudio en tres regiones, donde los límites de división están demarcados por los lineamientos de falla, las dos primeras regiones diferenciadas por su ambiente de sedimentación y disposición estructural, esculpen los costado occidental (región 2) y oriental (región 1) del frente de explotación; están separadas por una franja altamente fracturada, acuñada entre dos trazas de falla., denominada zona de falla.

Adicionalmente se encuentran depósitos Cuaternarios como Fluvioglaciares (Qfg), Suelos residuales (Qsr), Derrubios (Qd), Depósitos antrópicos (Qa), Depósitos coluviales (Qcl) y Depósitos de relleno (Qr), que cubren parcialmente el área de estudio.

La estratificación en la zona de estudio tiene dos direcciones de buzamiento diferentes, NW para los sedimentos

pertenecientes a la Formación Regadera (Ters) y NE para las Formaciones Guaduas (Ktg) y Bogotá (Tpb), este cambio de dirección está determinado por la presencia de una falla que tiene un rumbo similar a la falla del Mochuelo y que corre al este del área regional de estudio afectando la zona de estudio local objeto del presente estudio.

El patrón de diaclasamiento de la zona está compuesto por cuatro (4) familias de discontinuidades, caracterizadas por presentar persistencias de baja a media, espaciamiento 3 o 4; la presencia del patrón de diaclasamiento es más notorio en las zonas norte y sur de la cantera, que en la zona central.

Los sistemas identificados fueron:

D1: N42°W/41°NE – N67°W/71°NE

D2: N87°E/88°NW – N88°E/85°SE

D3: N 3°E/88°SE

La estratificación en las areniscas es mediana a gruesa, y tiene una azimut de buzamiento que varía entre N15°/90°S y N15°E-65°S; N15°E/90°N – N15°E/65°N en el costado noreste de la zona de estudio. N2°E/32°S y N2°E/53°S; N25°E/32°S – N60°E/82°S en el costado sureste de la zona de estudio. La mayor variación se encuentra en la zona norte.

En la zona central y norte del frente de explotación en arcillas, que pertenecen a la Formación Bogotá (Tpb), se presenta un alto grado de fracturamiento y replegamiento, el cual está asociado a la acción de la falla que se encuentra en la parte superior del talud. En estas arcillas se evidencia que el movimiento de la falla (debido a la observación de las estructuras sinsedimentarias presentes, sentido de los pliegues, fracturamiento de las capas, etc.), es hacia el este y está levantando estos sedimentos sobre los pertenecientes a la Formación Regadera (Ters) los cuales afloran en la parte alta del talud en la zona norte y este.

4. GEOMORFOLOGIA

La unidad de origen acumulativo agrupa los depósitos generados por la acción fluvial y su posterior depositación en los bordes de los taludes (depósitos de pendiente) y por la acción antrópica (depósitos de basuras y terraplenes). Los primeros están compuestos principalmente por arenas, arcillas y cantos de arenisca, de formas subredondeadas a subangulares; estos depósitos son escasos y presentan poco espesor, debido a la alta pendiente y a la intensa actividad antrópica que remueve los restos de estos depósitos. Los depósitos de origen antrópico son frecuentes y corresponden a:

1- Bloques caídos como producto de la explotación de la antigua cantera existente en el área.
2- Material granular que conforma dos terraplenes de vías existentes y un terraplén conformado para la cancha de microfútbol, y
3- Basuras (orgánicas e inorgánicas) y residuos de antiguos hornos para la elaboración de ladrillo.

Se aprecia a todo lo largo del antiguo frente de explotación de arcillas una erosión moderada a alta con desarrollo de surcos y cárcavas; tanto el depósito fluvio-glacial como las unidades terciarias son muy susceptibles a la erosión tanto por características intrínsecas de éstas (tipo litológico y grado de litificación), como por el alto grado de fracturamiento derivado de la traza de la falla de Mochuelo que disecta la zona cizallando las unidades. La acción del agua es muy notoria en el sector, especialmente en las zonas próximas a la traza de la falla principal; se observan allí zonas altamente meteorizadas, lo que contribuye a la formación de depósitos de relleno; surcos y muchos canales de escurrimiento por lo que se lava la capa superficial de suelo haciendo que el sector presente un moderado a alto grado de erosión.

En cuanto a los procesos morfodinámicos se tiene:

- Erosión en surcos y cárcavas: La susceptibilidad de los depósitos fluviotorrenciales es particularmente alta a este tipo de procesos.

Las caídas de bloques se localizan exclusivamente en la zona más fracturada dentro del frente de explotación (50-70m al norte de la cancha de microfútbol); este tipo de proceso se produce al ser removido (sin ningún tipo de técnica) el material arcilloso que sirve de base y soporte del cuerpo fluviotorrencial el cual se fractura y cae siguiendo una superficie de discontinuidad. Este tipo de evento es extremadamente rápido y en gran parte del trayecto es de caída libre, los bloques caídos se localizan muy cerca de la pata del talud (1-5m de distancia) y son de tamaño considerable (mayores de 2m de diámetro y de forma subangular).

Los deslizamientos y flujos afectan principalmente depósitos poco consolidados, no cubres áreas extensas y se producen luego de periodos invernales fuertes, cuando se infiltra el agua de escorrentía siguiendo las líneas de flujo natural. Se reconocieron 2 eventos principales y que afectan cuerpos constituidos con material diferente entre sí, el primero está localizado en la zona norte del frente de explotación y actúa sobre un relleno antrópico que corresponde al material estéril de la explotación de arcillolitas (mezcla de arcillas con material arenoso tamaño arena fina a bloques); el segundo se identificó en el sector correspondiente a la zona de microfútbol sobre un depósito de origen antrópico el cual no presenta compactación suficiente, este proceso se evidencia por presentar grietas en la parte superior (cancha de fútbol) y es por donde se infiltra el agua de escorrentía.

5. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

El tipo de investigación geotécnica fue en su totalidad establecido por las características de la zona estudiada; los barrios se erigieron en el dominio de un potente macizo rocoso, por espacios descubierto, enmarcado por cortes cuasi verticales hasta de 13 m de altura, que permiten observar la secuencia estratigráfica en toda la longitud del frente de explotación y en áreas aledañas. Todo este conjunto desvirtuó la necesidad de los métodos de exploración indirecta. Reveló la poca utilidad que tendrían las perforaciones frente a la mayor cantidad de información y claridad de interpretación que se podía obtener con el levantamiento de columnas estratigráficas detalladas, máxime, si se toma en consideración la dominante influencia tectónica en la caracterización estructural de la zona y en el comportamiento del macizo rocoso.

La investigación del subsuelo involucró dos actividades: la exploración directa mediante trincheras (columnas estratigráficas) apiques, sondeos mecánicos; y levantamientos estructurales durante el levantamiento estructural se tomó información de las familias de discontinuidades, identificando orientación, separación, abertura, tipo de relleno, rugosidad y persistencia de las familias principales y secundarias. Con estos elementos se determinaron parámetros como el índice del tamaño del bloque, el control volumétrico de diaclasas (Jv), el RQD y el JRC, importantes en el estudio del comportamiento del macizo. Esta última investigación reveló como rasgos característicos de la ladera: el similar patrón estructural, expresado en la clara definición de las familias de diaclasas; el comportamiento relativamente homogéneo del patrón estratigráfico y por ende la casi directa correlación entre las trincheras.

Relacionado con la caracterización del material rocoso y los depósitos cuaternarios y la estimación de la resistencia al corte en los planos de discontinuidad, y a la clasificación del macizo rocoso. La caracterización del material rocoso se llevó a cabo sobre muestras irregulares de bloque, que fueron sometidas a pruebas índice de peso unitario, carga puntual, corte directo y compresión inconfinada. Los testigos corresponden a unidades de roca de los bancos de arenisca y arcillolita. Los valores del índice de carga comprendido entre 0.16 kg/cm^2 y 4.88 Kg/cm^2 muestran una banda amplia del esfuerzo a compresión simple desde 4 kg/cm^2 hasta 117 kg/cm^2 que confirman los bajos niveles de resistencia del

material rocoso.

En dicho estudio se tomó como plano de movilización el de la diaclasa D_3: 320/78, para el cual se obtuvieron como parámetros básicos c=0 ton/m^2 30°≤ Ø ≤45°. No obstante, en el presente proyecto se adoptó como rango confiable de variación del ángulo de fricción 30°≤ Ø ≤ 38°. Por otra parte los ensayos de corte en los materiales de la Formación Bogotá se efectuaron en muestras inalteradas de arenisca y arcillolita, a niveles del esfuerzo normal similares al de campo y a condiciones de humedad cercanas al contenido natural. Los testigos arrojaron como parámetros de resistencia al corte: 0.0 ton / m^2 ≤ c ≤ 1.0 ton / m^2 y 22.4 ≤ ∅ ≤ 25 en la primera, y c ≤ 4.0 ton / m^2, 8.8 ≤ ∅ ≤ 15 para la segunda.

Para la determinación de las discontinuidades de un macizo rocoso se empleo la información obtenida de afloramientos, tomando como base los procedimientos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM - 1981. Se obtuvieron en total de 104 polos con una cobertura de 4 estaciones. Este proceso encuentra explicación en la necesidad de definir claramente los patrones de algunas familias de discontinuidades. Los resultados de las mediciones se presentan utilizando la red de proyección equiarial. El procesamiento de los datos estructurales se llevó a cabo gracias a la aplicación del método del círculo flotante para concentraciones entre 1% y 15%.

El heterogéneo contexto en la posición y distribución de continuidades, obtenido en el diagrama general de frecuencias, sumado a la influencia de la tectónica local ejercida por los lineamientos de falla en la zona, permitieron suponer que el frente de explotación no pertenecía a una sola región estructural. Se zonificó el área de estudio en dos regiones estructurales; la primera región constituye en esencia la zona norte del antiguo frente de explotación en la que el área de influencia del lineamiento de falla de la zona central le sirve como límite. La segunda región estructural se identificó en el borde sur y occidental del frente de explotación y, si bien tiene un patrón geométrico de diaclasas similar al de la región 1, la orientación de la estratificación da lugar a la división entre éstas.

Las familias de diaclasas para las dos regiones estructurales, se caracterizan por presentar en promedio baja persistencia de 1 m. a 5 m., espaciamiento clasificado como moderado a bastante próximo (entre 0.10 m y 1.0 m), abertura desde cerrada hasta parcialmente abierta (0.1 cm a 1.0 cm.) y el relleno es principalmente arenoso. La clasificación geomecánica de los macizos rocosos, está basada en la cualificación de diferentes características tanto de la masa en general como del material rocoso. Su objetivo fundamental consiste en estimar los parámetros de comportamiento del macizo. Las características tomadas en consideración para la clasificación del macizo fueron: el RQD, la resistencia a compresión simple del material rocoso, el espaciamiento y las condiciones de las discontinuidades y la influencia del agua subterránea. El macizo presenta Índices de Resistencia Geológica (GSI) equivalente al $RMR_{(76)}$ que oscila entre 59 para las exposiciones mas alteradas y fracturadas, pertenecientes esencialmente a la región estructural 2, y desde 60 hasta 70 para las más sanas, región 1.

Los suelos suelos corresponden a niveles de depósitos de ladera recientes, fluvio-glaciares, y depósitos de basuras ó rellenos heterogéneos. Debido a la hetereogénea constitución de los suelos, su caracterización geotécnica es compleja. Dado esta dificultad se acudió al ensayo de penetración estándar con el fin de caracterizar dichos materiales, especialmente los que tienen incidencia en la permanencia de construcciones aledañas; caso particular de los materiales de brecha de falla y del relleno del límite sur del área de estudio. Los resultados de los análisis efectuados indican como parámetros efectivos en el manto de origen hidrogravitacional, Qfg, c=0 y ϕ = 36; y en el cuerpo antrópico, Qad, c' = 0.21 ton/m^2 y ϕ' = 26.8.

6. ANÁLISIS HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

La zona de estudio está ubicada al sur occidente de Santa Fe de Bogotá, en la parte baja de la Quebrada La Trompeta. Como efecto de la precipitación en el sector del Barrio Sotavento se han generado procesos erosivos sobre la cara frontal del talud que han creado zonas de acumulación de material hacia la parte baja, así mismo este material es transportado por las aguas de escorrentía sin ningún tipo de control, ya que no existen obras de drenaje para el manejo adecuado de las aguas.

En cuanto a precipitación la zona se presenta un régimen de precipitación caracterizado por lluvias de baja intensidad y larga duración, que obedece a la formación de cinturones de nubes generados por la condensación del aire húmedo procedente de la Amazonia, durante el movimiento regular de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT: sector de la parte tropical donde convergen las masas de aire o corrientes de aire húmedo provenientes de los hemisferios norte y sur), y de otro lado por las Ondas del Este, procedentes del océano Atlántico Venezolano y noreste colombiano (Catatumbo), lo que sucede especialmente hacia los meses de Julio, Agosto y Septiembre.

En el barrio Sotavento la precipitación promedio multianual alcanza un valor de 663.9 mm con una distribución temporal que tiene su primer período húmedo entre los meses de Marzo, Abril y Mayo. Los meses de Octubre y Noviembre corresponden al segundo período de lluvias. La temporada de sequía cubre dos períodos, el más seco de ellos comprendido entre Diciembre y Febrero, y donde Enero es el mes más seco, con 15.5 mm de precipitación media mensual multianual.

En cuanto a la relación precipitación critica - duración, se encontró que el sector de estudio corresponde a la zona sur occidental obteniéndose una precipitación critica de 263.4 mm y una duración de 30 días. De acuerdo con esos resultados, se puede concluir que los fenómenos de remoción en masa que ocurren en el sector no tienen como factor detonante principal la precipitación, ya que la probabilidad de ocurrencia de la precipitación critica es muy baja, tan solo en 3.3 %.

7. INVENTARIO DE VIVIENDAS

Se realizó dentro de la zona de estudio, un inventario de viviendas para la evaluación de la vulnerabilidad; la información contemplada en el formato incluye, entre otros, datos sobre: área del lote, área construida, valor estimado de los bienes y enseres, valor del predio, estado actual de la construcción, sistema estructural, daños, ingresos familiares y cobertura de servicios. Todos tendientes a establecer la exposición y la resistencia de las construcciones y la capacidad de reacción de los habitantes en caso de presentarse algún proceso de inestabilidad que afecte sus viviendas.

El inventario contempló 59 predios, de los cuales sólo 15 ocupan las áreas de mayor percepción de riesgo. El 13 % de las viviendas (8) son de recuperación y el porcentaje restante está integrado entre construcciones de uno y dos pisos, bien con sistema estructural aporticado o con muros divisorios. La cobertura de servicios públicos básicos es muy deficiente, reflejo de ello es que el 59 % de las residencias carecen de alcantarillado y cerca del 24 % de los habitantes no poseen servicio de agua potable; además el100% de las unidades residenciales no cuentan con servicio de gas y sólo el 19 % tiene línea telefónica.

8. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE AMENAZA ACTUAL

Con las características anteriores se llegó a la valoración de los análisis de estabilidad y amenaza a la división del terreno en unidades de trabajo con características en conformación y comportamiento similares (zonas homogéneas). Se consideró pertinente clasificar las laderas según la influencia del hombre en el medio físico como: Antrópicas (LA) y Naturales (LN).

La condición estructural indica el indiferente papel de la estratificación en los procesos de inestabilidad, y la presencia de tres grandes áreas tectónicas a saber: el perímetro nororiental marco de exposición de la Formación Regadera (R.E.1),

la zona de falla y el cinturón suroccidental (R.E.2). El parámetro áreas de aporte, entendido como las superficies de evacuación de la escorrentía superficial y demarcada por las expresiones topográficas, facilitó junto con los fenómenos de inestabilidad, la subdivisión de franjas donde el comportamiento de las variables anteriores fue muy similar. Para la variable procesos morfodinámicos se establecieron bien por las evidencias de campo o bien por el tipo probable de deslizamiento a desarrollarse, tres grandes fenómenos de importancia:

– Deslizamientos traslacionales en suelo, que semejan falla planar con grieta de tracción.
– Deslizamientos rotacionales en sucesiones rocosas homogéneas de la Formación Bogotá, y en materiales altamente cizallados (zona de falla).
– Deslizamientos compuestos en rellenos antrópicos.

Se obtuvieron 7 zonas homogéneas:

LARE	Ocupa el entalle de la brecha de falla, en el costado nororiental del área de estudio, con laderas antrópicas conformadas por macizos rocosos, relevancia arenosa, de moderada a alta meteorización, y con procesos de erosión pluvial moderados y cizallados. Los depósitos de pie de ladera son delgados y espacialmente dejan al descubierto el macizo; y los procesos de inestabilidad que se espera tengan lugar son deslizamientos rotacionales.
LAFE	Ubicada en el cuerpo central del frente de explotación, y encierra laderas de origen antrópico, integradas superficialmente por depósitos de origen fluvio-torrencial, que descansan en niveles arcillosos, tectónicamente influenciados, retrabajados por procesos de erosión acentuados y, fenómenos de remoción en masa locales activos y potenciales de tipo traslacional, que semejan mecanismos de falla planar con grieta de tracción.
LNME	Circunscribe el marco más suroriental de explotación, está compuesto por superficies de modelado natural desarrolladas en macizos rocosos de la Formación Bogotá, altamente meteorizados y depósitos de origen fluvio-glaciar; afectados por erosión acentuada y procesos potenciales de falla rotacional.
LNMD	Corresponden a depósitos fluvio-glaciares y macizos rocosos dominantemente arcillosos localizados al sur del área de estudio. Los procesos de erosión son moderados y los fenómenos de remoción en masa son antiguos, de pequeña magnitud y de actividad dormida.
LNMR	Describe la porción plana del frente de explotación, dibujada por rocas areno-arcillosas influenciadas por erosión pluvial moderada.
LADE	Corresponde al relieve del cinturón sur del barrio Sotavento, constituido por rellenos heterogéneos influenciados por erosión pluvial moderada y donde es posible ocurran deslizamientos compuestos.
LARS	Localizado en la porción nororiental del frente de explotación, dominado por areniscas de resistencia media-baja, intensamente explotadas, y por ende muy marcadas por erosión (antrópica y pluvial).

En el análisis cinemático se evaluaron los modos probables de falla para múltiples orientaciones de las laderas naturales entallados principalmente en roca (zonas homogéneas LNME, LNMD, LARE y LARS. De esta forma, se consideraron en

los taludes del límite sur (Región Estructural 2) orientaciones entre N21W / 35SW y N25E / 70NW. Y para los cortes del costado norte rumbos promedio N-S y buzamientos entre 70° y 82° al NW.

Bajo las condiciones geométricas mencionadas para los taludes, los cuales representan las superficies libres de movilización, y del patrón estructural, el análisis cinemático permite concluir que para la mayor parte de las laderas no existe configuración de falla planar o en cuña.

Las laderas con orientaciones cercanas a la N – S (N04°W y N05°E) e inclinaciones muy fuertes (desde 70° hasta 82°), son las únicas superficies que presentan posibilidad cinemática de falla planar por el plano D_3 = 267/61 o en cuña y por las intersecciones 257/66, si se trata de la región estructural 2, o 359/70 y 92/37.

De otra parte, para estas últimas laderas existe configuración cinemática de falla por volteo a lo largo de los planos 275/88 y 178/85. Este mecanismo de falla, empero, presenta serios inconvenientes para su formación. El primero de ellos está relacionado con la baja persistencia modal de las discontinuidades; y el segundo, parte de las expresiones tectónicas en la zona, las cuales han dado lugar a un macizo altamente fracturado.

En cuanto al análisis estático los taludes en condiciones de estabilidad marginal entallan las zonas homogéneas LAFE, LARE y LADE pertenecientes a la región estructural 2. Los mecanismos de falla semejan bien modelos de falla en bloque, o bien deslizamientos rotacionales y los materiales involucrados son: depósitos – friccionantes bien litificados, Qfg, para el primer caso macizos superficialmente meteorizados y altamente fracturados o rellenos antrópicos para el segundo (zona homogénea: LARE y LADE).

En la franja central del frente de explotación, se aprecian bloques potencialmente inestables en la más amplia exposición del cuaternario (Qfg), cuyo mecanismo de falla no responde a la relación geométrica entre las discontinuidades y las orientaciones de los taludes. Los deslizamientos en estos cortes no está controlado por una familia de discontinuidades. En este caso el puente (es decir, el desplazamiento) se realiza por el material rocoso, en ángulos entre 26 y 34 grados, según las evidencias (y mediciones) obtenidas en campo.

La altura de los cortes (**H**) varía desde 5.7 m. Hasta 7.1 m., en algunos cortes, así como la pendiente de la cara del talud (**Yf**) es del orden de los 88º, con ángulos en el tope (**Ys**) cercanos a los 14º. El buzamiento del plano de movilización (**Yp**) oscila entre 26° y 34°. Las grietas de tracción muestran orientación promedio N30E a N35E, están separadas de la cara del talud entre dos y tres metros (2.25 m. < **b** > 3.5 m.) y sus profundidades, **Z**, oscilan desde los 3.50 m. hasta los 4.00 m.

Para las laderas circunscritas en las otras zonas homogéneas (zonas homogéneas LNMD, LNME y LNMR), se supuso que el modelo probable de falla a desarrollarse era circular con el ánimo de corroborar esta apreciación y estimar su probabilidad de falla, basado en el patrón de la secuencia estratigráfica, conformada por rocas blandas, areniscas y arcillolitas, sobre la contrapendiente estructural, y las características geomecánicas de los materiales.

Definidos los tipos de falla por estudiar, se formuló un análisis paramétrico para cada uno de los taludes en estudio. El efecto seudoestático de sismicidad y la respuesta de las presiones hidrostáticas fueron evaluadas considerando diversos niveles de aceleración y de posición de la tabla de agua. Al superponer los parámetros de resistencia, tanto de las discontinuidades como del material rocoso prefallado, y de las curvas de los análisis paramétricos, se puede apreciar que la condición de estabilidad para algunas secciones es aceptable. El comportamiento de la porción del frente de explotación para las seccióne E-E'y F-F', muestra estabilidad relativa aún cuando la grieta esté parcialmente llena y haya sismo. La movilización tendría lugar para cualquier nivel de la aceleración, sí y sólo sí el nivel del agua en la grieta supera la mitad de su profundidad.

La ladera del corte J-J' resalta la posibilidad de activación con el depósito parcialmente saturado o bajo la estimulación de cualquier efecto sísmico. En ese caso sus consecuencias serian severas, por la proximidad de las viviendas aledañas. De estos análisis surgen dos alternativas de tratamiento que son: reubicar las unidades o el modelo estratigráfico densificarlo.

9. EVALUACIÓN DE AMENAZA ACTUAL

Si bien el análisis en principio se realizó para los casos individuales, la probabilidad condicional de falla obtenida en cada uno fue elemento fundamental en la definición de las curvas de probabilidad de falla de la zona de estudio por tipos de mecanismo de falla.

Las variables aleatorias o fuentes de incertidumbre para los mecanismos de rotura seleccionados, están relacionadas con los cambios espaciales de los materiales geológicos, coeficientes de resistencia al corte; y con las condiciones ambientales, aceleración del terreno para un sismo dado y el nivel del agua en la grieta de tracción. La función de densidad de probabilidad para mecanismo de falla planar con grieta de tracción se definió por la profundidad del agua en la grieta y se ajustó a una distribución exponencial truncada, donde el valor promedio es equivalente a la mitad de la altura de la misma: para las fallas rotacionales se consideró una función de probabilidad similar donde el valor promedio corresponde a un grado de saturación del 30% estimado a partir de las condiciones del terreno según el criterio del geotecnista. Por último, la frecuencia de ocurrencia del sismo fue tomada de la curva de recurrencia sísmica de Colombia y presentada en el Manual de Amenaza Sísmica, donde se adoptaron valores de aceleración sísmica entre 0 y 0.1 ya que involucran periodos de recurrencia correspondiente a la vida útil de las obras (Tr=60 años).

Fijos los comportamientos de las fuentes incertidumbre, las funciones de probabilidad de las variables se constituyeron en elementos fundamentales para la determinación de la función de probabilidad de falla de cada unos de los taludes potencialmente inestables. En este sentido se realizaron múltiples corridas, contemplando sólo los valores de las variables en el intervalo $\mu_x - \sigma_x$ y , $\mu_x + \sigma_x$, con el fin de determinar el factor de seguridad, (en cada caso).

Con los factores de seguridad (F.S) obtenidos se calcularon las curvas de densidad, a partir de las cuales se obtuvo la probabilidad de falla. Definida como la relación entre el área bajo la curva para niveles del F.S menores a la unidad, y el área total de la curva. De los resultados obtenidos, se pude apreciar que la probabilidad de falla de los taludes A-A' y D-D' varía desde el 13% (con c=2 ton/m2 y ϕ=27°) hasta el 22%, para c=2 ton/m2; ϕ =22°, lo que representa un nivel de amenaza medio a bajo.

El corte H-H', para la misma combinación de parámetros de los taludes A-A' y D-D', posee una probabilidad condicional de falla del 18%; este resultado pone de manifiesto la influencia de la traza de falla en el detrimento de la resistencia del macizo y el aumento por tanto del nivel de amenaza. El comportamiento de las laderas para la sección E-E' y F-F' muestra un valor de amenaza intermedio a alto. La probabilidad condicional de falla oscila desde 37% hasta 52%, según sea el abanico de parámetros contemplados (espectros). Basados en los resultados mencionados, se resalta la apremiante condición de movilización de los taludes E-E' y F-F', razón por la cual se sugiere el retiro de los bloques potencialmente inestables.

Con el ánimo de determinar la probabilidad de falla para cualquier talud del frente de explotación según el tipo de proceso de remoción en masa, conocido su factor de seguridad, se estimó la mejor interpolación entre las dos variables. Para ello se calculó el factor de seguridad de los taludes con el valor medio de las variables aleatorias al que se le asignó la probabilidad condicional en el ambiente actual. Con ayuda de las curvas de probabilidad y conocida la composición estratigráfica y geotécnica de cada ladera de estudio y las distancias de viaje de las masas potenciales, se obtuvieron los Mapas de Zonificación por Amenaza.

En este sentido el área de estudio quedó dividida en tres zonas, clasificadas a partir del factor de seguridad y catalogadas como de amenaza: baja, F.S $\leq$ 1.1 - Categoría I; media, 1.1 < F.S $\leq$1.9 - Categoría II; y alta, F.S > 1.9 - Categoría III. Lo anterior, con base en una adaptación realizada a la categorización de amenaza relativa planteada por González y Millán (1998) para el estudio de Zonificación de Santa Fe de Bogotá.

El Mapa destaca la baja posibilidad de falla de un amplio sector del frente de explotación. Por esta razón surge como conclusión de la evaluación de amenaza actual la necesidad de implementar una serie de medidas más el manejo ambiental (paisajísticas) que permitan la reducción de los niveles de probabilidad de movilización.

10. VULNERABILIDAD Y RIESGO ACTUAL

La evaluación de vulnerabilidad, tiene como objetivo analizar la respuesta de los elementos amenazados, y junto con la evaluación de amenaza ver el tratamiento por adelantar. La evaluación se realizó teniendo como base la encuesta elaborada en cada vivienda. Aspectos como la edad y área de construcción, estructura de techo, cubierta, tipo de sistema estructural, calidad de la construcción y daños en la misma, fueron importantes para estimar el índice de vulnerabilidad física. La vulnerabilidad social fue estudiada y definida en forma cualitativa con base en las apreciaciones del experto en riesgos; mientras el modelo empleado en la evaluación del índice de vulnerabilidad por deslizamiento consistió en una adaptación de la propuesta realizada por Léone (1996).

10.1 VULNERABILIDAD SOCIAL

La vulnerabilidad social se evaluó cualitativamente a partir de la información colectada, pues para la escala de trabajo no existen aún las herramientas necesarias para cuantificarla. Del análisis efectuado es claro que las condiciones de vulnerabilidad socioeconómica son similares para toda la población. Es decir no constituye un aspecto discriminante para el tratamiento del sector, por lo cual puede incorporarse como una constante en la evaluación de riesgo. Aun que no se cuenta, en este proyecto, con elementos comparativos para cualificar la vulnerabilidad social, se estima que ella oscila desde media baja hasta baja, básicamente por la incapacidad de la comunidad de sobrellevar un desastre y de recuperar su condición de vida actual, posterior a su ocurrencia.

10.2 VULNERABILIDAD FÍSICA

La vulnerabilidad física se puede evaluar tomando en consideración aspectos sobre especificación de las viviendas, la cobertura de servicios públicos y calidad de la construcción, en este último aspecto se puede incluso hablar de "mantenimiento de la construcción". Con fines prácticos, para la elaboración de este trabajo, se optó por evaluar la vulnerabilidad de las viviendas a partir del grado de exposición de éstas ante el fenómeno amenazante (Índice de exposición IE) y del comportamiento de las construcciones en tal circunstancia (Índice de Resistencia IR).

La determinación del índice de exposición involucra conocer el tipo de fenómeno a estudiar y su distribución espacial; en este último sentido todo movimiento está compuesto por tres grandes zonas que son: La Zona de Influencia Directa (ZID) definida como aquella área en la que se da lugar el movimiento, la Zona de Influencia Indirecta (ZII) que corresponde a aquella que puede estar afectada por la masa deslizada y una última denominada Zona de Influencia Nula (FZI), en donde no se espera ningún tipo de afectación.

De la evaluación geotécnica y, con base en los fenómenos de remoción en masa que afectan los elementos físicos del barrio Sotavento (deslizamientos rotacionales y traslacionales), se determinaron las zonas de afectación directa (ZID) e indirecta (ZII) o no afectadas (FZI), para cada mecanismo**.** En él se observa que existen dos viviendas (A_5 y A_6), en la Zona de Influencia Directa de los procesos de inestabilidad (ZID), mientras que dentro de la Zona de Influencia Indirecta (ZII) se localizan las viviendas A_3, Q_{11}, Q_{12} y $\tilde{N}_1$ y fuera de las zonas anteriores, es decir, lejos del alcance de las masas

inestables, se encuentran las demás que corresponden a la mayoría.

El límite externo de la zona de influencia indirecta se obtuvo con base en la distancia de viaje de las masas inestables que fue determinada a partir del patrón geométrico de los taludes estudiados (secciones A-A´ a J-J´). Finalmente, con base en las diferentes zonas de exposición se pudo establecer el área de afectación para cada vivienda. Además, con el dato del área por predio que se obtuvo del levantamiento topográfico (comparada con la información de catastro), fue posible estimar el índice de exposición (IE), como la relación entre área afectada del predio (Aaf) y área total del predio (At), así:

$$IE = Aaf/At$$

El índice de resistencia se midió a partir de algunas componentes de la estructura de las viviendas como son: la cubierta, la estructura de techo y el sistema estructural. Estos componentes fueron seleccionados puesto que en la Zona de Influencia Indirecta las solicitaciones recaen sobre ellos. En FZI se adoptó que todo el aporte es del sistema estructural. Sin embargo, vale la pena mencionar que el mejor parámetro de resistencia debería obtenerse de ensayos in-situ, pero este tratamiento elevaría el costo del estudio.

En la zona de influencia indirecta de los deslizamientos, a las variables mencionadas, se les asignó un grado de contribución a la resistencia mediante criterios adoptados con base en la experiencia del experto así:

- En lo referente al tipo de cubierta, se consideró un aporte de 20 % de la resistencia de la vivienda. En el barrio Sotavento predominan las cubiertas en teja y zinc y en un menor porcentaje se encuentran las de asbesto cemento.

- El material de la estructura de techo fue incluido como elemento aportante en un 20% de la resistencia total. La estructura de mayor predominio en Sotavento es la de madera seguida de concreto reforzado.

- El tipo de sistema estructural, siendo éste el elemento considerado con mayor aporte, 60%. La mayor parte de las viviendas están conformadas con sistemas aporticados con tabiques y con muros portantes.

El aporte de cada tipo de material para los componentes estructurales se realizó de forma cualitativa. Los valores fueron asignados entre 0 y 1 (de peor a mejor respuesta), intentando calificar su contribución como elemento reductor de la energía cinética de las masas inestables. Las unidades construidas en concreto reciben las mayores calificaciones 0.85, y las de recuperación escasamente contribuyen con 0.10. Los resultados del análisis con este índice indican un valor modal de 0.75, lo que puede traducirse en una resistencia media de las viviendas.

Con los índices de resistencia y exposición hallados anteriormente, se calculó el índice de vulnerabilidad física (IVF), para lo cual se buscó una ecuación que cumpliera con las siguientes condiciones:

- Cuando IE = 0, IVF = 0.
- Cuando IE = 1, IVF = 1.
- Para cualquier valor de IR e IE, $1 \geq IVF \geq 0$. Para cualquier valor de IR e IE, $1 \geq IVF \geq 0$.

Según el procedimiento anterior se concluye que en el sector estudiado las viviendas presentan en general una vulnerabilidad física baja. Sin embargo, existen algunas viviendas con un grado de vulnerabilidad entre medio y alto, considerados casos particulares por tratarse de un porcentaje bajo del total de viviendas en la zona de estudio. Entre los casos particulares se encuentran las viviendas A_3, A_4, A_5, A_7, Q_{11}, Q_{12} y $Ñ_3$ localizadas en los costados norte y sureste del sector.

11. RIESGO ACTUAL

Para el presente trabajo las pérdidas potenciales corresponden a las pérdidas directas en viviendas y enseres, las cuales se pueden calcular multiplicando los costos de capital por el índice de vulnerabilidad física. El riesgo, entendido como una aproximación a valor índice, queda de esta manera; definido en términos de pesos. Si bien es claro que la mayor parte del área se encuentra en categoría de riesgo bajo; el porcentaje de pérdidas de capital, sin considerar vidas humanas, ni costos de reubicación, amerita el tratamiento de los taludes con obras de control, estabilización y mitigación.

12. MEDIDAS CORRECTIVAS

Se realizó un análisis de la probabilidad de falla futura, que contempló diferentes tipos de medidas correctivas. Las soluciones estudiadas fueron preseleccionadas para cada zona homogénea de acuerdo con el tipo de fenómeno de remoción en masa dominante en ellas, teniendo en cuenta que el costo de inversión física por zona no superará el valor neto del programa de reubicación para el escenario crítico; y que la obra física tuviera posibilidad de ejecución. Fueron definidas como alternativas de medidas de control: el perfilado de los taludes, la construcción de sistemas de drenaje superficial y subsuperficial y de estructuras de contención (muros de gaviones), la reubicación de viviendas y el eludir el problema.

13 EVALUACIÓN DE AMENAZA FUTURA

El primer paso para establecer la bondad de cualquier medida de mitigación o estabilización consiste en simular (o en algunos casos cualificar) el comportamiento de las laderas (o taludes) antes de su aplicación. El proceso de simulación encadena: la definición del comportamiento de las variables aleatorias, parámetros de resistencia y condiciones ambientales, y de sus funciones de probabilidad (sí se estiman presentan cambios radicales antes y después de la incorporación de las obras de estabilización); la formulación del análisis de estabilidad (estático y dinámico) y la determinación de la probabilidad de falla.

En primera instancia los mecanismos de falla, y por ende las funciones de probabilidad ilustradas en el Capítulo 4; se asumen válidos en el dominio de participación de las medidas correctivas. En este sentido las bandas (elipses) de variación de los parámetros de resistencia contemplados en el análisis estático y el comportamiento de las variables aleatorias, c, aceleración sísmica (a) y nivel de agua mantienen vigencia en el análisis de amenaza futura.

Dadas las especiales características de conformación de las zonas homogéneas y la notoria diferencia entre los procesos de inestabilidad, actuales o potenciales, para cada una de ellas, se deduce que las soluciones deben ser del tipo particular, lo cual implica que el árbol de decisiones se realizará de manera independiente para cada zona y que por lo tanto, los resultados no podrán ser extrapolados a las demás áreas.

En éste orden de ideas, las posibles medidas correctivas planteadas fueron:

- LNME y LNMD (secciones A-A´ y D-D´):
  - Perfilado con talud 1.5H : 1.0V
  - Instalación de un sistema de drenaje superficial
  - Eludir el problema

- LAFE (secciones E-E´ y F-F´)
  - Retiro de bloques inestables
  - Perfilado con corte 1.0H : 3.0V

- Construcción de un sistema de drenaje superficial
- Eludir el problema

- LARE (sección H-H´)
  - Perfilado con talud 1.0H : 2.0V
  - Implementación de estructuras de contención, como muros de gaviones
  - Construcción de un sistema de drenaje superficial
  - Reubicación de algunas de las viviendas
  - Eludir el problema

- LADE (sección J-J´)
  - Construcción de un sistema de drenaje subsuperficial (trinchera drenante)
  - Compactación
  - Hincado de pilotes
  - Reubicación de viviendas
  - Eludir el problema

El perfilado posee aceptable efectividad en la mayor parte del área de estudio, la reducción en la posibilidad de falla oscila entre 15% y 20%, como se aprecia al comparar los valores de la probabilidad para las secciones E-E´, F-F´ y H-H´ antes y después de aplicar la medida. De forma similar, en los cortes E-E´ y F-F´ (zona homogénea LAFE) los registros descienden de 0.37 y 0.52 a 0.18 y 0.30, respectivamente; y para la sección H-H´ la probabilidad condicional pasa de 0.18, en situación actual, a 0.03 con la nueva configuración geométrica. Sin embargo, la conformación actual de la cantera hace contradictoria su ejecución ya que requiere de la reubicación de las viviendas Q11 y Q12 y de la movilización de un apreciable volumen de material, además de dejar una amplia superficie del material expuesto a la acción degradante de los agentes atmosféricos

Las excepciones a este comportamiento se encuentran en las regiones LNME y LNMD, pues la efectividad de la medida es en el mejor de los casos de 5%, ello encuentra explicación en el bajo ángulo de los taludes en las zonas. El mayor beneficio relativo se halla en la sección D-D' (Z. H: LNMD), en ésta el grado de amenaza desciende de 0.16 a 0.11 .

De otro lado, al considerar la implementación de un sistema de drenaje eficiente, que impida para los casos de falla planar (zona homogénea LAFE), que el nivel de la tabla de agua en la grieta de tracción supere la mitad de la profundidad de ésta, o que reduzca el papel degradante en el resto del área, da lugar a una considerable mejoría en las condiciones de estabilidad de los taludes y del valor de amenaza, máxime si se tiene en cuenta la razón obtenida con el perfilado. La probabilidad de falla en estos casos desciende entre un 10 % y un 33 %. El mejor desempeño del sistema de drenaje se obtendría para el talud del corte F-F´. La probabilidad de falla disminuye en 33 %, al pasar de 52 % a 19%.

Similar rendimiento se obtiene con la implementación de sistemas de drenaje en la zona homogénea LADE (sección J-J'), donde el nivel de amenaza desciende de la condición crítica ($c = 0$, $\phi = 33°$), hasta el 15 %. La conjugación de las medidas de perfilado y drenaje, aunque son complementarias, posee un patrón de comportamiento equivalente, en la reducción de la probabilidad condicional de falla de las laderas, al del sistema de drenaje solo. El trabajo de las estructuras de contención como los muros en gaviones en la zona LARE o pilotes en la región LADE, no conduce a una mayor reducción del porcentaje de falla frente a las otras medidas.

Basados en los resultados mencionados, se concluye que las medidas planteadas arrojan el mismo porcentaje de reducción en la probabilidad condicional de falla, por lo tanto, su discriminación se encuentra en el costo y en la facilidad de ejecución física de éstas. De forma consecuente, puede afirmarse que para las zonas homogéneas LNMD y LNME, es conveniente la ejecución de obras de drenaje; en las regiones LARE y LAFE la combinación perfilado – drenaje

podría arrojar los mejores resultados, aunque, la estructura de gaviones puede ser una medida conveniente en el sector de brecha de falla (LARE).

A pesar de que el análisis cinemático en la zona LARS (Laderas L14, L15 y L17) arroja resultados negativos en cuanto a falla planar, cuña o volteo, se recomienda establecer un jarillón interceptor que inhiba daños, en caso de eventual caída de rocas, sobre elementos o personas que transiten por esa vía.

13.1 VULNERABILIDAD FUTURA

Si bien los escenarios antes o después de la ejecución de obras, para medidas como los sistemas de contención como muros de gaviones y tablestacados son diferentes, no sucede lo mismo con las restantes medidas de solución. Para dichas soluciones las zonas de exposición se modificarían y darían lugar a un cambio (posiblemente disminuyéndolas) en el índice de vulnerabilidad física. Este cambio no se considera significativo por lo tanto se asumirá, por simplicidad durante la toma de decisiones, vigente el índice de vulnerabilidad física actual.

13.2 EVALUACIÓN DE RIESGO Y SISTEMAS DE DECISIÓN BAJO INCERTIDUMBRE

Se implementó un modelo de decisión probabilístico, entre múltiples alternativas de solución. Para el caso en estudio, la evaluación de probabilidad de falla, para cada tipo de fenómeno y solicitación. Por su parte, el costo de falla, se consideró como:

$$Cf = I.V.F. * Co$$

Donde:

I.V.F.:	Índice de vulnerabilidad física de la unidad expuesta
Co:	Valor inicial del elemento expuesto

El costo inicial corresponde a la suma del valor comercial del predio y de los enseres encontrados en él. Estos costos fueron tomados de la información entregada por los propietarios en las encuestas realizadas para el inventario de viviendas. Se puede afirmar que las alternativas que involucran los menores costos de inversión para obtener un valor de riesgo aceptable son: la instalación de sistema superficial de drenaje en la zona homogénea LAFE; el perfilado en la región LARE y la reubicación en la región LADE.

Los costos de falla calculados corresponden, en el caso de que no se presente un evento de inestabilidad, al valor de la obra civil; en el caso contrario, se supone una de las dos opciones siguientes cuyos costos son muy semejantes (se adopta en todo caso, la más desfavorable):

a) El valor de falla de la mitad de la obra (lo que involucra otro tanto de mantenimiento) adicionada a un porcentaje de las viviendas a reubicar, o
b) El costo de una falla menor de la obra (amplificada por 2 dada la necesidad de reconstrucción) más el costo total de reubicación.

El planteamiento de convivir con el problema para las zonas LAFE y LARE aunque involucra el menor costo asumido, trae consigo la desatención social a la comunidad y por ende de su vulnerabilidad. Las labores de perfilado y perfilado con drenaje poseen costos más o menos similares pero probabilidades de falla muy disímiles, para la zona LAFE, con diferencias cercanas al 26% mientras que con costos bien inferiores, se consiguen condiciones de amenaza muy aceptables con la puesta en marcha del sistema de drenaje. Empero mejorar las condiciones ambientales del sector

requiere de la recuperación de las superficies expuestas. Esta misma situación no se conserva para el modelo del talud H-H´ en la zona LARE en el que el tratamiento conjunto (perfilado con drenaje) no solo involucra niveles de riesgo asumido bajos sino reducción en las condiciones de amenaza notables.

En cuanto a la zona LADE aunque el sistema de subdrenaje parece la de mayor riesgo asumido, esto se desmiente ante el hecho de que las alternativas restantes no contemplan el tratamiento de las aguas superficiales de las áreas aferentes, elemento importante para la permanencia de estos taludes, por lo tanto y apoyado en las premisas anteriores, se concluye que se requiere adelantar una recuperación lo más completa posible de las laderas en el entorno de cierre del barrio. Esto incluye la reconformación de los taludes con pendientes desde 1.5H:1.0V en las zonas LNMD y LNME hasta 1.0H:3.0V en las zonas LAFE acompañada por estructuras de drenaje superficial y empradización.

14. DISEÑO DETALLADO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Con base en los análisis efectuados, especialmente con las evaluaciones presentadas en el Capítulo 6, se efectuó el diseño de las obras de estabilización, control y manejo para cada zona homogénea, que son:

1. Perfilado de Taludes: Esta obra corresponde al corte y reconformación de los taludes de las zonas LARE (1.0H:2.0V), LAFE (1.0H:3.0V), LNME y LNMD (1.5H:1.0V).

2. Relleno de Taludes: Este relleno se hará con el fin de obtener taludes simétricos y homogéneos que serán revegetalizados.

3. Reubicación y Demolición de Viviendas: Las viviendas identificadas como Q11 y Q12.

4. Obras de Subdrenaje: Corresponden a la construcción de un filtro de 0.8*0.5 m de material filtrante y 0.2-0.5 m de relleno en material común.

5. Obras de drenaje: Constituidas por cunetas rectangulares y triangulares y por descoles.

6. Revegetalización de los taludes finales, tanto de corte como de relleno.

También se planteó un manejo paisajístico para la recuperación ambiental del barrio y de algunas pocas mejoras urbanas.

15 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los problemas de inestabilidad son de carácter inducido, predispuestos o detonados gracias al papel del hombre. El rol transformador antrópico se encuentra en: las técnicas destructivas de explotación que producen una mayor susceptibilidad de los materiales a fenómenos de remoción en masa; la formación de cortes verticales y el deficiente planeamiento urbano.

Los procesos más relevantes entre otras variables, condicionaron las zonas homogéneas y se mencionan a continuación .

- En la zona LAFE (frente de la antigua explotación de arcillolitas) se identificaron bloques potencialmente inestables que involucran exclusivamente el cuerpo del depósito fluvioglaciar. Los procesos son de actividad potencial avanzada y se analizaron modelos de falla planar con grietas de tracción.

- El segundo problema de estabilidad se localiza al occidente de la cancha de microfútbol (Zona LADE) grietas de la esquina occidental de la cancha, construida un parte sobre un relleno (o depósito antropico), se interpretaron con modelos de falla rotacional; su actividad es potencial.

- Finalmente, en la zona homogénea LARE, lugar donde se expone el macizo rocoso, la estabilidad se evaluó con modelos de falla rotacionales debido a que corresponde a una zona de cizalla. Las potenciales distancias de viaje de estas masas colindan de cerca con la manzana Q.

  Su actividad es también potencial.

En este sentido, los escenarios de riesgo, asociados a los eventos amenazantes, se originan por la alta exposición de las viviendas localizadas en:

- Los frentes de viaje de las masas críticas y cercanas en algunos casos al pie de los taludes rocosos.

- Las casas A_1, A_3, A_5, Q_{11} y Q_{12} son los elementos físicos con las más altas cualificaciones de vulnerabilidad. Su respuesta ante cualquier evento de inestabilidad sería deficiente, y el nivel de daño esperado alcanzaría a ser severo y conduciría a la evacuación inmediata. La totalidad de las residencias se verían afectadas por empujes laterales que tendrían repercusión directa en la estructura y sus consecuencias se expresarían en agrietamiento de sistema estructural y de los muros divisorios. No obstante, según el desarrollo de los deslizamientos las pérdidas serían totales sólo en las viviendas A_1 Y A_8.

- El análisis de alternativas, planteado por zona homogénea, arrojó que el menor riesgo asumido en los frentes de exposición del macizo (Z.H.LARE) y del depósito fluvioglaciar (Z.H.LAFE) se obtendría con el perfilado y el drenaje superficial, respectivamente.

- En lo que atañe al más amplio frente de rellenos antrópicos (Z:H LADE), el riesgo asumido entre las diferentes alternativas: drenaje, subdrenaje tablestacado y reubicación es equiparable, por lo que la puesta en marcha de cualquiera de ellas es equivalente, sin embargo, se optó por recurrir al trabajo conjunto de las dos primeras soluciones.

El tratamiento del Barrio Sotavento II Sector no sólo se debe limitar a la mitigación de la amenaza y vulnerabilidad, debe contemplar además, el manejo integral de la problemática. Esto no es otro cosa, que la incursión de medidas de recuperación ambiental y de regulación del uso del suelo; las primeras contemplan la reconformación ambiental y geotécnica de la cantera; esto último implica la configuración de la superficie de forma tal que la probabilidad de falla sea baja, faciliten la reconstrucción de la flora (original) y demarquen su uso futuro; y las segundas la restricción de posibles asentamientos humanos en los sectores de alta amenaza, demarcación (categorización) propia de las laderas de los flancos oriental y suroccidental.

Libres los predios que pueda comprar la DPAE si se decide extender el programa de reubicación, deben destinarse a uso recreativo, pasivo exclusivamente, o de protección ambiental en cuyo caso se debe poner en marcha un programa de arborización.

Las principales directrices en el tema de la infraestructura urbana y de control consisten en: la conformación y pavimentación de la vía de acceso, obra que compaginará con el sistema de drenaje construido; y la construcción de parques y zonas de esparcimiento para el desarrollo integral de la comunidad.

15 PRESUPUESTO

Los costos estimados de las obras propuestas se presentan en la Tabla siguiente:

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO ($)	VALOR PARCIAL ($)
Replanteo	GLOBAL	1	2,800,000.00	2,800,000.00
Excavación Mecánica en Roca	M3	1774.27	23,568.00	41,815,995.36
Excavación manual y Retiro	M3	93.38	23,508.00	2,195,177.04
Relleno en Material Común	M3	616.1	5,277.00	3,251,159.70
Empradización	M2	2756.96	5,277.00	14,548,477.92
Cuneta triangular b=0.6m, h=0.2m, e=0.1m	ML	362	18,437.00	6,674,194.00
Cajas 1.0m*1.0m*0.4m	UNIDAD	12	157,266.00	1,887,192.00
Descole b=0.3m, h=0.4m, e=0.1m	ML	244	142,013.00	34,651,172.00
Cuneta rectangular b=0.3m, h=0.15m, e=0.1m	ML	70	31,199.00	2,183,930.00
Trinchera Drenante 0.6*2.0m	ML	45	103,115.00	4,640,175.00
Tubería PVC 6"	ML	22	18,762.00	412,764.00
Demolición de viviendas	UNIDAD	2	1,500,000.00	3,000,000.00
Reubicación de viviendas	UNIDAD	2	10,000,000.00	20,000,000.00
			SUBTOTAL ($)	**138,060,237.02**
			ADMINISTRACION, IMPREVISTOS Y UTILIDAD 25 %*	**34,515,059.26**
			VALOR TOTAL ($)	**172,575,296.28**

* LA ADMINISTRACIÓN INCLUYE LA CONSTRUCCIÓN DEL CAMPAMENTO Y DEMÁS PRELIMINARES