CLASIFICADO

ALCALDIA MAYOR
DE BOGOTA D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de prevención y
Atención a Emergencias

ESTUDIO DE RIESGOS POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN PARA LA URBANIZACIÓN BUENA VISTA ORIENTAL III ETAPA EN LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL EN BOGOTÁ D.C.



GIA - 059- 09

CONTRATO No. Cons-455-2009

PARTE 1 (pp. 1 – 197) DE 6 PARTES

ORIGINAL

TEXTO

OCTUBRE DE 2009

GIA CONSULTORES LTDA
Carrera 16 A No. 86 A – 02 Of. 202
Bogotá D.C., Colombia

FONDO PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS
FOPAE

TÍTULO Y SUBTITULO: Estudio de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa y Evaluación de Alternativas de Mitigación para la Urbanización Buenavista Oriental III Etapa en la Localidad de San Cristóbal en Bogotá D.C.

AUTOR: GIA CONSULTORES LTDA.

RESUMEN:

El invierno del segundo semestre del 2008, aunque menos cruel que el del año 2006, trajo consigo una de las manifestaciones morfodinámicas más impactantes socialmente del año: Buenavista Oriental III Etapa (Localidad de San Cristóbal). Su crudeza, arraigada a la movilización de más de 12.000 metros cúbicos de suelo y fragmentos de roca, se hace manifiesta en la evacuación de noventa y seis (96) familias, algunas de ellas provenientes de otros procesos de reasentamiento, en la destrucción de nueve (9) viviendas, y en el dramático deterioro de otras veinticinco (25).

Pero la incubación del desastre está ligado fundamentalmente con la extracción desordenada y antitécnica de los materiales pétreos. Proceso que data de la década de los 50, que adquirió relevancia entre los años 80 y 90, y que dejó huellas penetrantes, al punto de borrar el drenaje natural y de esculpir cortes pronunciados con pendientes superiores a los cuarenta grados. Cortes reconformados, en los albores del siglo XXI, con residuos de explotación y construcción, hoy día recinto de la urbanización.

Este singular escenario, sumado a la desfavorable posición estructural, al dominio estratigráfico de rocas arcillosas de la formación Bogotá, a pendientes entre los veinte y los cuarenta grados, y a una incipiente e irregular incorporación de medidas de estabilización, realzan los estadios de amenaza (a corto y largo plazo), vulnerabilidad y riesgo. Por menores que justifican y dan sentido al levantamiento topográfico, al estudio geológico y geotécnico, a las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa, y de la vulnerabilidad sísmica, y al planteamiento y selección de la alternativa técnica y económicamente más favorable: actividades constitutivas de este estudio.

PALABRAS CLAVES:
Buena Vista, morfodinámica; amenaza; vulnerabilidad; riesgo; antrópico.

TÉRMINOS PARA GLOSARIO E ÍNDICE:
Transgresión; actividad y desarrollo; convolución; riesgo aceptable.

CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD:	CONTRATO:	IDIOMA:	NÚMERO DE PÁGINAS:	NÚMERO DE COPIAS:
Clasificado	No. Cons-455-2009	Español	1096	3

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA 1
HOJA DE DATOS 2
TABLA DE CONTENIDO 3
GLOSARIO 18
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS 19

1 CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES 21
1.1 INTRODUCCIÓN 22
1.2 LOCALIZACIÓN 22
1.3 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO 23
1.4 ANTECEDENTES 24
1.5 ALCANCES 26
1.6 LIMITACIONES 26
1.7 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES 27
1.7.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE 27
1.7.1.1 INFORMACIÓN ESPECÍFICA 27
1.7.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA 28
1.7.2.1 BIBLIOGRAFÍA 28
1.7.3 VISITA DE RECONOCIMIENTO 29
1.7.4 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE Y TEMÁTICA 29
1.7.4.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 29
1.7.4.2 ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS 30
1.7.5 ESTUDIO GEOTÉCNICO BÁSICO 30
1.7.5.1 INVENTARIO DE PROCESOS DE INESTABILIDAD 30
1.7.5.2 PROGRAMACIÓN DE EXPLORACIÓN DE SUBSUELO 30
1.7.6 ANÁLISIS GEOTÉCNICO 30
1.7.6.1 MODELO GEOTÉCNICO 30

1.7.6.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 31
1.7.6.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 31
1.7.7 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA 31
1.7.8 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO 32
1.7.9 EVALUACIÓN DE MITIGABILIDAD 32
1.7.10 ORGANIZACIÓN DEL INFORME 33

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 VÉRTICES DEL TERRENO 23
TABLA 1.2 CONTENIDO 33
TABLA 1.3 ANEXOS 33
TABLA 1.4 PLANOS 34

LISTA DE PLANOS

PLANO 1 LOCALIZACIÓN 1078

2 CAPITULO 2 - TOPOGRAFÍA 35
2.1 ALCANCE ESPECÍFICO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 36
2.2 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 36
2.2.1 TRABAJO DE CAMPO 36
2.2.2 LOCALIZACIÓN CARTOGRÁFICA 37
2.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE AMARRE 38
2.2.4 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE CIERRE 38
2.2.5 AJUSTES DEL LEVANTAMIENTO 39
2.2.6 AMOJONAMIENTO DE REFERENCIA 49
2.2.7 CONDENSACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO 40
2.2.8 TRABAJO DE OFICINA 40

2.3 EQUIPO 40

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO 37
TABLA 2.2 MOJONES MATERIALIZADOS EN CAMPO 39
TABLA 2.3 RELACIÓN DE EQUIPO Y ELEMENTOS POR COMISIÓN 40

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 POLIGONAL DE AMARRE 38
FIGURA 2.2 POLIGONAL DE CIERRE 39

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.1 CERTIFICADO DE COORDENADAS - IGAC 200
ANEXO A.2 MOJONES DE REFERENCIA 202
ANEXO A.3 CARTERA ELECTRÓNICA 219
ANEXO A.4 CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN DEL EQUIPO 231

LISTA DE PLANOS

PLANO 1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 1078
PLANO 2 MAPA BASE 1079

3 CAPÍTULO 3 – GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 41
3.1 MÉTODO DE TRABAJO 42
3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE 43
3.3 GEOLOGÍA GENERAL 45
3.3.1 ESTRATIGRAFÍA 45

3.3.1.1 CRETÁCICO 46
3.3.1.2 CRETÁCICO-TERCIARIO 47
3.3.1.3 TERCIARIO 47
3.3.1.4 CUATERNARIO 48
3.3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 48
3.4 GEOLOGÍA LOCAL 48
3.4.1 ESTRATIGRAFÍA 49
3.4.1.1 UNIDADES DE SUELO 49
3.4.1.2 UNIDADES DE ROCA 50
3.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 53
3.4.2.1 DISCONTINUIDADES 53
3.4.2.2 LINEAMIENTOS FOTOGEOLÓGICOS 53
3.5 GEOMORFOLOGIA LOCAL 54
3.5.1 MORFOESTRUCTURAL (FORMAS) 54
3.5.1.1 UNIDAD DE LADERAS NO INTERVENIDAS (LNI) 54
3.5.1.2 UNIDAD DE LADERA ESTRUCTURAL CON ALTA INTERVENCIÓN POR ACTIVIDADES EXTRACTIVAS (LEI) 55
3.5.2 PROCESOS MORFODINÁMICOS 57
3.5.2.1 METEORIZACIÓN 58
3.5.2.2 PROCESOS DE EROSIÓN 58
3.5.2.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM) 59
3.6 ANTECEDENTES DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA LA ZONA 60
3.6.1 AÑO 1955 (VUELO IGAC C-743_9) 61
3.6.2 AÑO 1977 (VUELO IGAC C-1774_68) 62
3.6.3 AÑO 1984 (VUELO IGAC C-2128-150) 64
3.6.4 AÑO 1991 (VUELO IGAC R-1131-3659) 65
3.6.5 AÑO 2002 (FOTO SATELITAL GOOGLE EARTH) 66
3.6.6 AÑOS 2005 Y 2008 (FOTOS SATELITALES GOOGLE EARTH) 67
3.7 HIDROGEOLOGÍA 68
3.7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS 68
3.7.2 RELEVAMIENTO DE PUNTOS DE AGUA 68

3.7.3 MOVIMIENTO DEL AGUA 68
3.8 AMENAZA SÍSMICA 69
3.8.1 FUENTES SISMOGÉNICAS 69
3.8.2 CUALIFICACIÓN DE AMENAZA LOCAL 70
3.8.3 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO 71

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO 46
TABLA 3.2 VUELOS FOTOINTERPRETADOS 46
TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS 69
TABLA 3.4 FUENTES SISMOGÉNICAS PARA AMENAZA SÍSMICA EN BOGOTÁ 70
TABLA 3.5 FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO (MEDVEDEV, 1965) 71
TABLA 3.6 ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE Y DE DISEÑO 73

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-743_9 62
FIGURA 3.2 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-1774_68 63
FIGURA 3.3 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-2128_150 64
FIGURA 3.4 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO R-1131_3659 65
FIGURA 3.5 IMAGEN GOOGLE EARTH (2002) 66
FIGURA 3.6 IMAGEN SATELITAL GOOGLE EARTH (2005) 67
FIGURA 3.7 IMAGEN SATELITAL GOOGLE EARTH (2005) 67

LISTA DE ANEXOS

ANEXO B.1 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA 235
ANEXO B.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL 237
ANEXO B.3 FOTOINTERPRETACIÓN 251

ANEXO B.4 INVENTARIO DE PROCESOS 256
ANEXO C.1 REGISTROS DE EXPLORACIÓN 262

LISTA DE PLANOS

PLANO 3 GEOLOGÍA GENERAL 1080
PLANO 4 GEOLOGÍA LOCAL 1081
PLANO 4A SECCIONES GEOLÓGICAS 1082
PLANO 4B SECCIONES GEOLÓGICAS 1083
PLANO 5 GEOMORFOLOGÍA 1084

4 CAPÍTULO 4 – GEOTÉCNIA 75
4.1 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO 76
4.1.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 76
4.1.1.1 MÉTODO DE TRABAJO 76
4.1.1.2 MÉTODOS DIRECTOS 77
4.1.1.3 ENSAYOS DE CAMPO 80
4.1.1.4 ENSAYOS DE LABORATORIO 86
4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA 88
4.2.1 SUELOS 88
4.2.1.1 MATERIAL 1: RELLENOS ANTRÓPICOS DE RECONFORMACIÓN, QRA1 Y QRA2 88
4.2.1.2 MATERIAL 2: RELLENOS ANTRÓPICOS TRASLOCADOS, QD1 Y QD2 93
4.2.1.3 MATERIAL 3: RELLENOS ANTRÓPICOS SELECCIONADOS, QRA3 93
4.2.1.4 MATERIAL 4: DEPÓSITOS ANTRÓPICOS DE SOBRETAMAÑOS, QRA4 95
4.2.1.5 MATERIAL 5: DEPÓSITOS FLUVIOTORRENCIALES, QFT 95
4.2.1.6 MATERIAL 6: SUELOS RESIDUALES QTPB-L-SR 95
4.2.2 MACIZO ROCOSO 96
4.2.2.1 MATERIAL ROCOSO 96
4.2.2.1.1 MATERIAL 7: LODOLITAS DE LA FORMACIÓN BOGOTÁ, TPB-L 96
4.2.2.1.2 MATERIAL 8: ARENISCAS DE LA FORMACIÓN BOGOTÁ, TPB-A1 Y TPB-A2 97
4.2.2.2 DISCONTINUIDADES 98

4.2.2.3 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO 100
4.2.2.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MACIZO ROCOSO 101
4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 102
4.4 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS FORENSES 104
4.4.1 CIMENTACIÓN: CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS 106
4.4.2 EXPANSIÓN 107

LISTA DE TABLAS

TABLA 4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE EXPLORACIÓN DIRECTA DEL SUBSUELO 79
TABLA 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES ESTRATIGRÁFICOS 80
TABLA 4.3 EXPRESIONES PARA CORRELACIONAR EL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DEL SPT 81
TABLA 4.4 RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD RELATIVA Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN 82
TABLA 4.5 RELACIÓN ENTRE LA CONSISTENCIA Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN 82
TABLA 4.6 RESUMEN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN CONDICIÓN DRENADA A PARTIR DEL SPT 82
TABLA 4.7 NORMALIZACIÓN DEL SPT 84
TABLA 4.8 NORMALIZACIÓN DEL SPT 85
TABLA 4.9 RELACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO URBANIZACIÓN BUENAVISTA 86
TABLA 4.10 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO 89
TABLA 4.11 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO (CONTINUACIÓN) 90
TABLA 4.12 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO (CONTINUACIÓN) 91
TABLA 4.13 CARGA PUNTUAL 92
TABLA 4.14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 1: QRA1 Y QRA2 93
TABLA 4.15 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 2: QD1 Y QD2 94
TABLA 4.16 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 3: QRA3 94
TABLA 4.17 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 5: QFT 95
TABLA 4.18 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 6: QTPB-L-SR 96
TABLA 4.19 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 7: TPB-L 97
TABLA 4.20 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 8: TPB-A 98

TABLA 4.21 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO _____ 100
TABLA 4.22 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO _____ 101
TABLA 4.23 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO _____ 102
TABLA 4.24 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO (CONTINUACIÓN) _____ 103
TABLA 4.25 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA _____ 105

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL: QD1, QD2 Y QRA1 _____ 83
FIGURA 4.2 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL TPB-L _____ 83
FIGURA 4.3 CARTA DE PLASTICIDAD _____ 87
FIGURA 4.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES _____ 99
FIGURA 4.5 RESUMEN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES _____ 99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO B.2 LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL _____ 237
ANEXO C.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO _____ 262
ANEXO C.2 ENSAYOS DE LABORATORIO _____ 294
ANEXO C.3 ENSAYOS DE LABORATORIO (OTROS CONSULTORES) _____ 468
ANEXO C.4 ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS _____ 481

LISTA DE PLANOS

PLANO 4 GEOLOGÍA LOCAL _____ 1081
PLANO 7 ZONAS HOMOGÉNEAS _____ 1086

5 CAPÍTULO 5 – HIDROLOGÍA, COBERTURA Y USOS DEL SUELO _____ 108

5.1 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS 109
5.1.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO 109
5.1.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA REGIONAL 109
5.1.2.1 HUMEDAD RELATIVA 110
5.1.2.2 BRILLO SOLAR 111
5.1.2.3 EVAPORACIÓN 111
5.1.2.4 PRECIPITACIÓN 112
5.1.2.5 PRECIPITACIONES DE CORTA DURACIÓN 112
5.1.2.6 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA 114
5.1.2.7 PRECIPITACIÓN CRÍTICA – DURACIÓN 114
5.1.3 RELACIÓN LLUVIA – DESLIZAMIENTO 114
5.1.4 CONDICIONES NATURALES DEL DRENAJE 115
5.1.5 CONDICIONES ARTIFICIALES DEL DRENAJE 116
5.1.5.1 SISTEMA DE ACUEDUCTO 116
5.1.5.2 SISTEMA DE AGUAS RESIDUALES 116
5.1.5.3 SISTEMA DE AGUAS LLUVIAS 116
5.2 COBERTURA Y USOS DEL SUELO 116
5.2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO 117
5.2.2 CLASIFICACIÓN DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO 117

LISTA DE TABLAS

TABLA 5.1 LEYENDA Y CLASIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA TIERRA 118

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.1 HUMEDAD RELATIVA – ESTACIÓN VITELMA 110
FIGURA 5.2 BRILLO SOLAR – ESTACIÓN VITELMA 111
FIGURA 5.3 EVAPORACIÓN – ESTACIÓN VITELMA 112
FIGURA 5.4 PRECIPITACIÓN – ESTACIONES VITELMA, EL DELIRIO. 113
FIGURA 5.5 CURVAS GENERALIZADAS IDF ZONA 2 113

LISTA DE PLANOS

PLANO 6 USOS DEL SUELO 1085

LISTA DE TABLAS

6 CAPÍTULO 6 – EVALUACIÓN DE AMENAZA 119
6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO 120
6.2 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD 123
6.2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO 123
6.2.1.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA 124
6.2.1.2 MECANISMOS DE FALLA 128
6.2.1.3 EVENTOS DETONANTES 129
6.2.1.3.1 AGUA 129
6.2.1.3.2 SISMO 131
6.2.1.4 MODELACIÓN DE ESTABILIDAD 132
6.2.2 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA 132
6.2.2.1 CONSIDERACIONES 132
6.2.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 133
6.2.3 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA 134

TABLA 6.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TALUDES - ESTADO ACTUAL 121
TABLA 6.2 RESUMEN DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO 121
TABLA 6.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES 130
TABLA 6.4 PROBABILIDADES DE AGENTES EXÓGENOS 132
TABLA 6.5 ESPERANZAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD. 135
TABLA 6.6 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN) 136
TABLA 6.7 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL 137

TABLA 6.8 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 138
TABLA 6.9 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 139
TABLA 6.10 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 140
TABLA 6.11 CATEGORIZACIÓN DE LA AMENAZA (ADAPTADO DE GONZÁLEZ Y MILLÁN, 1999) 141

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO 122
FIGURA 6.2 ENVOLVENTE DE LARSON, QRA1 125
FIGURA 6.3 ENVOLVENTE DE LARSON, TPB-L 126
FIGURA 6.4 RETROANÁLISIS: DESLIZAMIENTO DT-001-AA (SECCIÓN 1-1') 127

LISTA DE ANEXOS

ANEXO C GEOTECNIA 261
ANEXO C.2 ENSAYOS DE LABORATORIO 294
ANEXO D AMENAZA 486
ANEXO D.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO 487
ANEXO D.2 MONITOREO DEL CUERPO PRINCIPAL DE DESLIZAMIENTO 503
ANEXO D.3 ANÁLISIS PARAMÉTRICO 505
ANEXO D.4 SUPERFICIES CRÍTICAS STED 519
ANEXO D.5 DISTANCIA DE VIAJES DE SUELOS 540

LISTA DE PLANOS

PLANO 4 GEOLOGÍA LOCAL 1081
PLANO 4A SECCIONES GEOLÓGICAS 1082

PLANO 4B SECCIONES GEOLÓGICAS 1083
PLANO 6 HIDROLOGÍA Y USOS DEL SUELO 1085
PLANO 8 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA ACTUAL 1087

7 CAPÍTULO 7 – VULNERABILIDAD Y RIESGO 142
7.1 VULNERABILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA 143
7.1.1 METODOLOGÍA 143
7.1.1.1 CRITERIOS APLICADOS 143
7.1.2.1 INFORMACIÓN PRIMARIA 146
7.1.3 VULNERABILIDAD SOCIAL. 147
7.1.4 VULNERABILIDAD FÍSICA 151
7.1.5 ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD 154
7.2 VULNERABILIDAD SÍSMICA 155
7.2.1 EVALUACIÓN PATOLÓGICA 155
7.2.1.1 AUSCULTACIÓN 155
7.2.1.2 CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN 157
7.2.2 VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL 161
7.2.2.1 CONTRASTACIÓN DISEÑO VS CONSTRUCCIÓN 161
7.2.2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES 163
7.2.2.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL 165
7.2.3 HABITABILIDAD 168
7.3 RIESGO. 169
7.3.1 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 169
7.3.2 ZONIFICACIÓN DE RIESGO. 170

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 7.1 DAÑOS GENERALES DE LAS CONSTRUCCIONES 149
FIGURA 7.2 RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LAS FAMILIAS EN AÑOS 151

LISTA DE TABLAS

TABLA 7.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RESPUESTA DE LA EDIFICACIÓN 144
TABLA 7.2 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA ESTRUCTURAL 144
TABLA 7.3 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN 144
TABLA 7.4 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: PARTES ESTRUCTURALES 144
TABLA 7.5 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: DAÑO EN LA CONSTRUCCIÓN (TOMADO Y ADAPTADO DE DAY, 1999) 145
TABLA 7.6 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA DE CIMENTACIÓN 145
TABLA 7.7 CAPACIDAD DE ENDEUDAMIENTO 150
TABLA 7.8 PORCENTAJE DE PÉRDIDAS 150
TABLA 7.9 RECUPERACIÓN ECONÓMICA 151
TABLA 7.10 MATRIZ DE INTENSIDAD DE DAÑO 152
TABLA 7.11 TABLA DE CLASIFICACIÓN DE DAÑOS PROPUESTA POR DRM 152
TABLA 7.12 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO 153
TABLA 7.13 ÁREA DE AFECTACIÓN SEGÚN ÁREA DE EXPOSICIÓN 154
TABLA 7.14 CATEGORIZACIÓN DE LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD (IVF) 155
TABLA 7.15 ENSAYOS DE PATOLOGÍA ESTRUCTURAL 164
TABLA 7.16 DERROTEROS DE LA MODELACIÓN 167
TABLA 7.17 CATEGORIZACIÓN DEL RIESGO 170

LISTA DE ANEXOS

ANEXO E VULNERABILIDAD Y RIESGO 542
ANEXO E.1 FICHAS INVENTARIO DE VIVIENDAS 543
ANEXO E.2 FORMATO DE CAMPO INSTRUCTIVO 550
ANEXO E.3 RESULTADOS DEL INVENTARIO DE VIVIENDAS 747
ANEXO E.4 AUSCULTACIÓN DETALLADA 749
ANEXO E.5 RESULTADOS DE ENSAYOS DE PATOLOGÍA 792
ANEXO E.6 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL 812

ANEXO E.6.1 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL TEÓRICA (DISEÑO) 813
ANEXO E.6.2 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE OBRA 882
ANEXO E.7 ACTAS DE AUTORIZACIÓN PARA AUSCULTACIÓN Y ENSAYOS 959

LISTA DE PLANOS

PLANO 8 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA ACTUAL Y FUTURA 1087
PLANO 9 ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD POR FRM Y SISMO 1088
PLANO 10 ZONIFICACIÓN DE RIESGO – ESCENARIO ACTUAL 1089

8. CAPÍTULO 8 – PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS 171
8.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA OBRAS DE MITIGACIÓN 172
8.1.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES ESPECIALES 172
8.1.2 ALTERNATIVAS 172
8.2 AMENAZA FUTURA (AMENAZA CON OBRAS) 174
8.3 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA Y PLAN DE ACCIÓN 184

LISTA DE TABLAS

TABLA 8.1 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 1 186
TABLA 8.2 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 2 187
TABLA 8.3 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 3 188
TABLA 8.4 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS 189
TABLA 8.5 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN) 190
TABLA 8.6 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN) 191
TABLA 8.7 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN) 192

TABLA 8.8 PRESUPUESTO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS 193

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 8.1 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 1A: RELOCALIZACIÓN Y RECUPERACIÓN MORFOLÓGICA 175
FIGURA 8.2 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 1B: RELOCALIZACIÓN Y RECUPERACIÓN MORFOLÓGICA 176
FIGURA 8.3 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 2: PANTALLAS ANCLADAS 177
FIGURA 8.4 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 3: PANTALLA PILOTES 178
FIGURA 8.5 PLANTEAMIENTO DE REFORZAMIENTO DE LAS VIVIENDAS (ALTERNATIVAS 2 Y 3) 179
FIGURA 8.6 ESCENARIOS DE AMENAZA Y RIESGO ACTUAL CON OBRAS – ALTERNATIVA 1 182
FIGURA 8.7 ESCENARIOS DE AMENAZA Y RIESGO ACTUAL CON OBRAS – ALTERNATIVA 2 183
FIGURA 8.8 ÁRBOL DE DECISIÓN 194

LISTA DE ANEXOS

ANEXO F PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS 974
ANEXO F.1 PREDISEÑO DE ALTERNATIVAS 975
ANEXO F.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN (EVALUACIÓN DE AMENAZA FUTURA CON OBRAS) 979
ANEXO F.3 SUPERFICIES CRÍTICAS CON OBRAS - SLIDE 986
ANEXO F.4 PLANTEAMIENTO DE REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS VIVIENDAS 1010
ANEXO F.5 ANÁLISIS DE PRECIOS Y COSTO DE REFERENCIA 1021
ANEXO F.6 DETALLES DE OBRA 1061
ANEXO G FICHA DE REASENTAMIENTO 1064
ANEXO H CRONOGRAMA DE OBRA – ALTERNATIVA 1 1075
ANEXO I PLANES DE ACCIÓN Y DE GESTIÓN SOCIAL 1090

BIBLIOGRAFÍA 195

GLOSARIO

AMENAZA: Probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente destructor, en un área específica dentro de un determinado período de tiempo. (Suárez J., 1998).
ARCILLOLITA: Roca sedimentaria de origen detrítico. Es una roca compacta, sin fisilidad que está formada por partículas del tamaño de la arcilla.
BASE TOPOGRÁFICA: Mapa base que contiene información topográfica, utilizable para referenciar localizaciones de otros elementos, y la elaboración de mapas temáticos (mapas geológicos, estructurales, de uso de tierras, entre otros).
BUZAMIENTO: Ángulo de inclinación que forma un filón, estructura o capa rocosa con un plano horizontal, medido perpendicularmente a la dirección o rumbo del filón.
CAUCE: Canal por donde normalmente discurren las aguas de un río. El cauce es continuamente modificado por el caudal, la velocidad, la pendiente, la carga de sedimentos y el nivel de base local del río.
COBERTURA: Conjunto de datos asociados temáticamente y considerados como una unidad. Una cobertura usualmente representa un tema único, o corresponde a una capa de información tal como suelos, ríos, caminos, uso de la tierra, entre otros.
CUENCAS HÍDRICAS: Es el espacio delimitado por la unión de todas las cabeceras que forman el río principal o el territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que drena sus aguas al mar a través de un único río, o que vierte sus aguas a un único lago endorreico.
DESASTRE: Alteración intensa en las personas, los bienes, los servicios, y el ambiente, causados por un suceso natural o generado por la actividad humana, que exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada. (Millán J., 1999).
DESLIZAMIENTOS: Movimiento consistente en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo larga de toda, la que sería, la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc. (Suárez J., 1998).
DESLIZAMIENTO ROTACIONAL: En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. (Suárez J., 1998).
DESLIZAMIENTO TRASLACIONAL: En el deslizamiento trasnacional el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. (Suárez J., 1998).
ESCARPE PRINCIPAL: Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla. (Suárez J., 2009).
ESTABILIDAD (GEOTECNIA): Resistencia de una estructura, talud o muro de contención a la falla por deslizamiento o colapso bajo condiciones normales, para las que fue diseñado.
ESTADO DE ACTIVIDAD: Hace referencia a una condición temporal de la masa en movimiento, asociado con un número de formas de la zona de rotura en desarrollo y de la masa que se moviliza (grado de desarrollo).
ESTRATO: Capa de roca caracterizada por sus propiedades litológicas particulares y los atributos que la distinguen de las capas adyacentes.

FACTOR DE RIESGO: Cualquier elemento o fenómeno del ambiente de trabajo o acción que pueda causar un daño.
FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM): Junto con la erosión hacen parte de los procesos naturales de denudación de la corteza terrestre, como tales no se consideran susceptibles de manejo total y se definen como movimientos en masa de traslocación por acción de la gravedad, la cual no es un medio de transporte. (González, 1990).
FLANCO: Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo. (Suárez J., 2009).
GEOLOGÍA: Ciencia que estudia la composición y la disposición de los materiales que constituyen la litosfera terrestre, su naturaleza, su situación y las causas o fenómenos que originan esa disposición y de los efectos de los agentes que la alteran.
GEOMORFOLOGÍA: Ciencia que tiene por objeto el estudio y la explicación de las formas del relieve terrestre.
LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO: Descripción y delineamiento de un terreno en su configuración superficial.
NIVEL FREÁTICO: Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica.
PERFIL: Es la secuencia y conjunto de horizontes de un suelo; corte vertical hecho en el suelo a fin de hacer un estudio.
REPTACIÓN: Es el movimiento lento e imperceptible del material
RIESGO: Se considera como la existencia o contingencia espacio temporal de que se suscite un daño a partir de la manifestación de un fenómeno natural. Es el valor esperado de daños, destrucción o pérdida de un grupo particular de elementos expuestos a la ocurrencia de un evento, potencialmente catastrófico.
SONDEO: Operación que se efectúa con el fin de perforar el suelo, mediante la apertura de orificios de diámetro pequeño para la exploración.
SUSCEPTIBILIDAD: Expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno.
SUPERFICIE DE FALLA: Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla. (Suárez J., 2009).
TALUD: Superficie inclinada del terreno en la base de un cerro o de una colina, donde se encuentra un depósito de detritos.
VULNERABILIDAD: Grado de debilidad o resistencia que presentan las personas, sus bienes y el mismo ambiente natural, frente a la ocurrencia de un fenómeno peligroso.
VULNERABILIDAD FÍSICA: Se expresa como una medida porcentual de los costos de las averías originadas por un agente destructor.

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

m: Metros.
Ha: Hectárea
Tc: Es el tiempo de concentración en horas
T: Período de retorno
n: Período de análisis o exposición.
SPT: Ensayos de penetración estándar
W %: Humedad natural.
γ_d (T/m^3): Peso unitario seco.
γt (T/m^3): Peso unitario total.

L_L: Límite Líquido.
L_P: Límite Plástico.
IL: Índice de Liquidez
q_u(S): Compresión inconfinada en suelo.
q_u(R): Compresión inconfinada en roca.
Gs: Gravedad específica.
PT200: Pasa Tamiz No. 200.
C_C : Coeficiente de Consolidación.
C_R: Coeficiente de Reconsolidación.
C_D: Corte Directo.
C_P: Carga Puntual.
N'_i: Número de golpes corregido para un esfuerzo de confinamiento de 1 Kg/cm^2.
ϕ_{eq}(°): Ángulo de fricción equivalente.
c'(Kg/cm^2): Cohesión.
ϕ'(°): Ángulo de fricción.
σ_C(Kg/cm^2): Resistencia a la compresión simple.
ϕ_R: Ángulo de fricción residual.
P+: Probabilidad de ocurrencia del evento crítico
P-: Probabilidad de no ocurrencia del evento crítico
a_h: Coeficiente de aceleración horizontal del terreno
pn: Probabilidad para exposición de n años
p: Probabilidad anual (= 1/475)
RE: Recuperación económica en años
%Pérdidas: Fracción del patrimonio.
CE: Capacidad de endeudamiento
P_f*:* Probabilidad de falla
C_f*:* Costo de falla
P_f*:* Probabilidad de falla
IVF: Índice de vulnerabilidad física.
TD: Tasa de daño.
FS: Factor de seguridad.
RQD: Rock Quality Designation.
η1: Factor de corrección por caída del martillo.
η 2: Factor de corrección por longitud del sistema de varillas.
η 3: Factor de corrección por presencia de revestimiento interno.
η 4: Factor de corrección por diámetro de la perforación.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El invierno del segundo semestre del 2008, aunque menos cruel que el del año 2006, ha traído consigo una de las manifestaciones morfodinámicas más impactantes socialmente del año. Su crudeza se hace manifiesta en la evacuación de noventa y seis (96) familias, algunas de ellas provenientes de otros procesos de reasentamiento, en la destrucción de nueve (9) viviendas, y en el dramático deterioro de otras veinticinco (25). Pero las consecuencias del deslizamiento se extienden aún más allá, involucran el desazón y la desconfianza social; la pérdida de imagen de las entidades distritales, de la administración central (v.g. la alcaldía y la secretaria de gobierno) y de los modelos de vivienda de interés social; el deterioro de la calidad de vida de un puñado de ciudadanos que apuntó sus esperanzas de vida en sistemas formales, y aparentemente estructurados, de construcción (en cabeza de un urbanizador "legal"); y repisan la amnistía tácita hacia los dueños de las canteras y los chircales, circunscripción que le sirve de recinto a Buenavista Oriental III Etapa, otorgada por la sociedad.

Buenavista Oriental III Etapa a diferencia del gran potencial de daño de la masa deslizada, de sus cifradas manifestaciones, de su inesperada magnitud y extensión, traducida en múltiples pérdidas en bienes y enseres, es un proceso esperanzador de participación institucional puesto que (en hora buena) ningún perjuicio (i.e. deceso) en la vida de los habitantes tuvo lugar. Su recuperación conllevará un trabajo sostenido en el tiempo, grandes inversiones de capital, y contacto permanente con la comunidad.

GIA Consultores, a través del contrato cons-455 de 2009 ha sido designada por el ente oficial, para coadyuvar en la definición de la senda de recuperación a través del estudio de riesgos por remoción en masa; tarea que pretende, entre otros alcances dilucidar las causas del desastre, caracterizar geológica y geotécnicamente el escenario, deducir las condiciones hoy día de amenaza, vulnerabilidad y establecer las medidas de manejo a recomendar. El presente informe describe las actividades realizadas (reconocimiento geológico, geotécnico, inventario y caracterización de procesos morfodinámicos y exploración del subsuelo), para deducir los estados de amenaza y riesgo, acorde con las directrices de la entidad contratante.

1.2 LOCALIZACIÓN

Buena Vista está adosada al flanco suroeste de los cerros orientales del Distrito Capital, ocupa el tercio superior de la microcuenca de Ramajal y pertenece a la jurisdicción político-administrativa de la localidad San Cristóbal (véase *el Plano 1*). Tiene asiento entre la Carretera a Oriente y la transversal 12A sur, y desde la

periferia de la fabrica El Tabor hasta la calle 31 sur. Limita al occidente con el barrio Ramajal, al norte con la fábrica El Tabor, al sur con las etapas I y II de Buena Vista y al oriente con espacio abierto. Su extensión superficial comprende cuatro (4) hectáreas de una pendiente estructural de morfología montañosa, con elevaciones entre los 2798 msnm y los 2874 msnm. El polígono definido por las coordenadas planas relacionadas en la *Tabla 1.1* circunscribe el área de estudio.

TABLA 1.1 VÉRTICES DEL TERRENO

NORTE	ESTE
95717.3	99411.2
95573.2	99526.2
95559.6	99552.9
95561.2	99597.0
95570.3	99634.9
95576.3	99639.7
95599.1	99639.0
95602.9	99638.7
95628.3	99635.6
95661.3	99626.8
95739.1	99616.7
95794.9	99602.1
95807.2	99566.5
95812.5	99523.1
95812.2	99516.4
95787.8	99474.1
95760.0	99452.1
95758.0	99450.8
95753.6	99449.4
95717.3	99411.2

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

1.3 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

A mitad del mes de diciembre, a una hora aún sin determinar, a lo largo de la diagonal 31 A Sur y entre las transversales 12 y 12 A Este (de la nomenclatura antigua) del distrito capital, una caótica masa de suelo, causo daño a cerca de cuatro de viviendas y su evacuación inicial (información tomada del relato de una de las habitantes del barrio). El deslizamiento que apenas se insinuaba, continuó su progreso con el pasar de

los días, hasta el punto de provocar la movilización de cerca de 12.000 metros cúbicos de material. La masa movida se separó en grandes bloques de hasta 10 m de ancho, limitados por escarpes intermedios de hasta 1.0 m de altura, y alcanzo una distancia de viaje de 15 m (véase la *Foto 1.1*), limitada por las construcciones aledañas.

1.4 ANTECEDENTES

El Conjunto Residencial Buena Vista Oriental Etapa III consiste en una agrupación de 96 viviendas de dos (2) y tres (3) niveles con sistema estructural en mampostería estructural, y mampostería semiconfinada en algunos sectores, losas de entrepiso y de cubierta prefabricadas en concreto. Cada vivienda ocupa un área de tres (3) metros de frente y siete (7) metros de fondo. Las edificaciones están agrupadas en módulos o unidades estructurales independientes desde cuatro (4) y hasta nueve (9) unidades, razón por la que comparten en su mayoría los muros de los costados norte y sur. El emplazamiento de la Urbanización recae en un espeso relleno escalonado, creado entre el 2002 y el 2003 (deducción salida de la comparación de las fotos satelitales de los años 2002 y 2005 – Fuente GoogleEarth-) confinado de occidente por un muro en cantiliver, y tratado con tubería perforada.

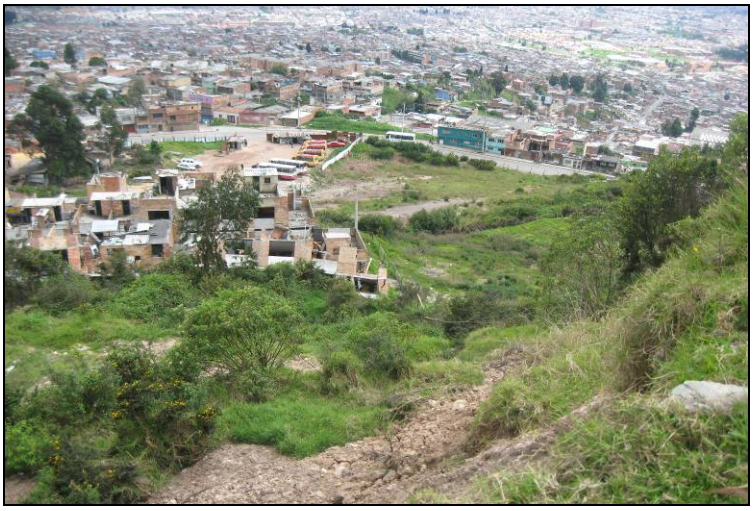


FOTO 1.1 PANORÁMICA DEL DESLIZAMIENTO, VISTA DESDE LA ESQUINA NORORIENTAL

El 28 de diciembre de 2005 personal de la DPAE, realizó visita técnica en la Urbanización y emitió el Diagnostico Técnico DI-2581, en el que se describen fisuras menores en muros y en la placa de piso de las viviendas y en la vía peatonal perimetral, así como humedad en los muros y en las paredes del tanque de almacenamiento de agua potable. Sin embargo, no se evidenció patología alguna que comprometiera la estabilidad y habitabilidad de las viviendas en el corto plazo.

Contrario a la percepción inicial, el 10 de septiembre de 2007, nuevamente personal técnico de la DPAE, acomete una nueva visita a la urbanización, condensada en el sector y emitió el Diagnostico Técnico DI-3460. En esta oportunidad evidencias adicionales como: grietas de tracción en las canchas recién construidas, calcadas en concreto y el progresivo deterioro de la vivienda ponen de manifiesto la incubación de un proceso de inestabilidad, hipótesis subestimada en su momento pero no descartada. Circunstancia que lleva a recomendar adelantar estudios técnicos pertinentes para reducir las causas de los daños.

El 28 de febrero de 2008, por solicitud de la comunidad según consta en el Diagnostico Técnico DI-3633, el proceso destructivo de la vivienda 46 alcanzó niveles evidentes; las grietas en los muros y en la placa de contrapiso operaban con aberturas desde los 2mm hasta los 5mm. Si bien se trabajaron hipótesis de asentamientos diferenciales, deficiencias en la cimentación y un posible proceso de deformación lenta del relleno del costado nor-oriental se mantuvo la decisión de habitabilidad de la vivienda, pero se recalcó en la importancia de acometer un estudio detallado.

El 5 de junio de 2008 la DPAE informa a la Alcaldía Local de San Cristóbal los antecedentes en la urbanización y la entera sobre nuevos hechos, que incluyen caída de bloques de la ladera oriental; contenidos por la malla de cerramiento adosada a la corona del muro de contención, y grietas de tracción en la ladera con aberturas de 5cm y longitud de hasta 60m. Por primera vez se habla explícitamente de un proceso de inestabilidad al precisar que "entre las posibles causas que generaron el proceso están las fuertes precipitaciones, la ocurrencia del evento sísmico del 24 de mayo de 2008, y la continua intervención antrópica de manera antitécnica".

El progresivo deterioro adquiere inusitada referencia a la mitad del segundo semestre del 2008; el agrietamiento no solo cubre los muros y la losa de entrepiso de la casa 46 y compromete su estabilidad a corto plazo, sino que se extiende a las viviendas 40 a 45, y conlleva a la evacuación de las familias, y a la restricción parcial de uso en las casas 17 a 23, específicamente la cocina y los baños, y a evacuar y puntualizar "… se acometan los estudios detallados de patología, vulnerabilidad estructural y comportamiento suelo-estructura". Por menores precisados en el diagnóstico DI-3848 de 2008, y soportados en el escrutinio del 26 de agosto y del 23 y 24 de octubre (del mismo año).

Sumado a la trasfiguración de las construcciones, y al desasosiego de los habitantes, la actividad de las masas residentes en los taludes orientales se torna inevitable. El comienzo del fin hace antesala. El desprendimiento y la movilización de una masa de suelo frente a las habitaciones 81, 82 y 83 que obstruyó la vía peatonal y dañó la malla eslabonada de protección, las evidencias de malformación en el muro de contención, reveladas en grietas seudo verticales y pérdida de plano (i.e. verticalidad) en el borde norte, y la acrecencia de la grieta de tracción en el talud oriental y la germinación de grietas satélites asociadas con escarpes secundarios, hechos todos cotejados los días 21 y 22 de noviembre por personal técnico (y transcritos en el diagnóstico DI-3882), dan pie para recomendar la evacuación de las viviendas 77 a 96 y ratificar la reubicación temporal de las familias que ocupaban las residencias 39 a 46.

Con el transcurrir de los días el aumento en la tasa de movilización de la ladera oriental no se hizo esperar. El desprendimiento de otra porción de suelo, esta vez frente a las casas 88 a 92, el colapso (i.e. caída) de parte del muro de contención y de un poste de energía y la materialización de la superficie del deslizamiento en la placa de las canchas deportivas (traducida en el diferencial altimétrico o desplome), tuvieron su umbral durante el 14 y el 17 de diciembre (según consta en el diagnóstico DI-3944). El deslizamiento era ya inminente.

Los sucesos acaecidos entre el 27 de diciembre de 2008, y el 7 de febrero de 2009, y comentados con rigor en los informes DI-3991 y DI-3996, fueron el epílogo del desastre. El escarpe principal calcó su silueta completa en superficie y aumentó su altura hasta los cuatro metros, el cuerpo del deslizamiento encontró reposo en las edificaciones 88 a 96, al punto de volcarlas o destruirlas, las que a su vez hallaron alivio en las casas 63 a 71; y lo que inició por un solo deslizamiento rápidamente se convirtió en dos. La evacuación total de la tercera etapa fue entonces forzosa y necesaria.

El conjunto completo de los reportes de emergencias reposa en la base de datos, de la Dirección de Prevención y Atención de emergencias de Bogotá – DPAE, y se puede consultar a través del sitio Web de la entidad, en el sistema de información para la gestión de riesgos y atención de emergencias – SIRE -.

Finalmente, mediante el Decreto 043 de 2009 del 12 de febrero de 2009 "Por el cual se adoptan medidas para la prevención y mitigación de situaciones que puedan ocasionar riesgo público en la Urbanización Buena Vista Oriental III Etapa y se dictan otras disposiciones", la Alcaldía Mayor de Bogotá determinó que la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias - DPAE, debía elaborar los estudios para el análisis e identificación del riesgo sobre la zona. Los análisis se realizaran por fenómenos de remoción en masa y por estabilidad local por compresibilidad y expansión del terreno asociado a la calidad de las viviendas e infraestructura. Eslabón y obligación que da vida al presente informe.

1.5 ALCANCES

A continuación se relacionan las actividades mínimas que requiere el estudio, y que constituyen sus principales componentes:

- Recopilación y análisis de la información secundaria disponible de: fotografías aéreas, cartografía oficial, planchas geológicas, estudios geotécnicos, registros pluviométricos, y todo tipo de información que aporte al proyecto.
- Levantamiento topográfico detallado de la zona objeto: altimetría y planimetría a escala 1:500, amarrados sistema de referencia (MAGNA-SIRGAS), con curvas de nivel cada 0.50 m, que registren la morfometría del predio y los signos morfodinámicos relevantes, así como: obras de arte, senderos peatonales, vías, etc.
- Recopilación de información primaria: reconocimiento geológico, Inventario y caracterización de los procesos morfodinámicos, investigación del subsuelo y programa de ensayos de laboratorio.
- Agrupación y síntesis de la información hidrológica, hidrogeológica e hidráulica.
- Análisis geotécnico; identificación de sitios inestables; estimación de estabilidad global y local para condiciones estáticas y dinámicas, Evaluación y zonificación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.
- Auscultación y evaluación estructural de las viviendas
- Comparación y selección de alternativas para diseño de las obras requeridas para la mitigación del riesgo.

1.6 LIMITACIONES

La labor con mayores traumatismos ha sido el inventario de viviendas. La reticencia de la comunidad, causada por preguntas como el valor del inmueble y los ingresos del núcleo familiar, y su renuencia a facilitar el desarrollo del estudio, explicada en el bloqueo al ingreso de la urbanización durante la segunda semana de ejecución, fueron los más claros signos de la participación comunitaria. Participación que sólo adquirió dinámica luego de tres reuniones entre las partes; la Caja de Vivienda Popular y la Alcaldía Menor de San Cristóbal tuvieron rol protagónico.

Por otra parte, cabe resaltar que dentro del análisis en desarrollo se asumirán características geotécnicas similares, de acuerdo con los resultados de campo y laboratorio, y condiciones de homogeneidad para los diferentes materiales presentes en el área de interés.

1.7 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

El estudio se estructura con base en un procedimiento metodológico evolutivo que inicia con la consulta de la información secundaria y con la recopilación de la primaria. Éstas se examinan, procesan y evalúan, con el fin de establecer similitudes y discrepancias entre sí, de tal forma que faciliten el diagnóstico del problema y conduzcan a la construcción de los modelos geotécnicos, al análisis de estabilidad y al planteamiento de las medidas alternativas de mitigación, dentro de los marcos técnico, social, ambiental y económico.

Para tal fin, GIA dispone de un equipo multidisciplinario de profesionales, que a lo largo del proyecto establecen coordinadamente con la interventoría los lineamientos metodológicos, conceptuales y técnicos para el cumplimiento de los objetivos y el logro de las metas propuestas de acuerdo con los términos de referencia exigidos por la DPAE. Bajo esta perspectiva, el contenido técnico, se estructura lógica y consecuentemente, y se enmarcan sus alcances dentro de las directrices de la institución y las políticas distritales. Los pasos que conciernen la realización del estudio se exponen a continuación:

1.7.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE

Se refiere a la obtención de información secundaria: fotografías aéreas, así como cartografía y estudios previos de topografía, geología, geomorfología, geotecnia, hidrología, climatología, usos del suelo, sismología, etc., disponibles en entidades como el IGAC, la DPAE y el Ingeominas, así como el análisis y evaluación del estado obras existentes.

Esta etapa permitió en primer lugar, la asimilación de las características morfológicas del terreno de la geología, y de la geomorfología regional, y un acercamiento a la comprensión de los fenómenos existentes en área de estudio. En segundo lugar, fue la base de la programación de las labores requeridas para la complementación y profundización de la información y del ajuste de las fases de desarrollo del proyecto. En adelante se precisan algunas de las referencias empleadas, ordenadas y discriminadas de manera alguna:

1.7.1.1 INFORMACIÓN ESPECÍFICA

- BRAVO L. ÁLVARO C. (2008). “Diagnóstico técnico DI-3944, Barrio Buenavista Oriental”. DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 95599. Bogotá D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2009a) “Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental”. DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 96939 – Emergencia 2610. Bogotá D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2009b) “Diagnóstico técnico DI-3991, Barrio Buenavista Oriental”. DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Eventos 95992, 96633 y 96851. Bogotá D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2008a) “Diagnóstico técnico DI-3848, Barrio Buenavista Oriental”. DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Eventos 91103,94051 y 94080. Bogotá D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2008b) “Diagnóstico técnico DI-3882, Barrio Buenavista Oriental”. DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 94913. Bogotá D.C.

- HIDROGEOLOGÍA Y GEOTECNIA LTDA. (2000). "Estudio de Zonificación de Riesgos por Remoción en Masa en los Barrios Triángulo, Triángulo Alto y Corinto de la Localidad de San Cristóbal, Santa Fe de Bogotá D. C". FOPAE-DPAE. Santa Fe de Bogotá.
- IFCAYA (1988). "Estudio Geológico y Geotécnico de Algunos Sitios Críticos en los Barrios Gran Colombia, Triángulo, Corinto y Ramajal". Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria de Obras Públicas. División de Estudio. Bogotá D. E.
- INGEOCIM LTDA.-UPES–FOPAE (1998). "Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá D. C." Mapa Geológico. Bogotá D.C.
- PÉREZ HERNANDO (2007). "Diagnóstico técnico DI-3460, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica, Bogotá D.C.
- REYES G. JOSÉ L. (2005) "Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica, Bogotá D.C.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (2006). "Diagnóstico Geotécnico y Estructural de 11 (Once) Proyectos de Vivienda de la Caja de Vivienda Popular". Informe Final. Tomo 8. Urbanización: Buenavista Oriental III Etapa. Alcaldía Mayor de Bogota. Caja de Vivienda Popular. Bogotá D. C.
- VILLAMIL V. TULIO I. (2008). "Diagnóstico técnico DI-3633, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 86303. Bogotá D.C.

Los diagnósticos técnicos, a pesar de las erráticas interpretaciones de los signos encriptados del deslizamiento, expuestos paulatinamente durante los últimos años, signos que adecuadamente descifrados y concatenados hubiesen significado la detección temprana del fenómeno, son baluartes documentales gráficamente enriquecidos, que magnifican su importancia por ser salvaguardas de la vida de los residentes, en otras palabras por ser instrumentos de decisiones oportunas en momentos precisos y en justa medida. Son la muestra patente de las bondades del seguimiento y pilares fundamentales, junto con el conocimiento de los habitantes para la reconstrucción del proceso, y por consiguiente para aproximarse al reconocimiento de sus agentes condicionantes y desencadenantes; los documentos subrayan la participación del agua lluvia y de infiltración, representadas en humedad y filtraciones, como constantes en el tiempo. Constantes vigentes aun hoy día.

1.7.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA

- Mapa Geológico de Bogotá. Ingeominas, 1988.
- Mapa Geológico de Bogotá, escala 1:10000. Ingeocim, 1998.

1.7.2.1 BIBLIOGRAFÍA

- Bowles J. (1988). "Foundation Analysis and Design". McGraw-Hill International Editions.
- Coduto Donald P. (2001). "Foundation Design, Principles and Practices". Second edition. Prentice Hall, New Jersey.
- Cornforth D H (2005). "Landslide in Practice – Investigation, Analysis, and Remedial/preventative Option in Soil". John Wiley and Sons.
- Das Braja M. (1999). "Principios de Ingeniería de Fundaciones". Cuarta Edición. California State University. Thomson Editores.
- Das Braja M (2004). "Principles of Foundation Engineering". 5E. California. Thomson Learning Inc.
- Duncan J. M. and Wright S. G. (2005). "Soil Strength and Slope Stability". Wiley and Sons Inc. New Jersey.

- González G. A. (1987). "Analysis of Infiltration Test". VIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Sociedad Colombiana de Geotecnia.
- Hoek E (1995). "Support of Underground Excavation in Hard Rock". January, 1995. AA. Balkema Publisher.
- INGEOMINAS (1999). "Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá". Bogotá.
- INGEOMINAS, (2003). "Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá". Publicación Ingeominas. Bogotá.
- Julivert, M. (1961). "Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá". Boletín de Geología No. 7:5-36, Bucaramanga.
- Julivert, M. (1968). Lexique Estratigraphique Internationale. Vol. V Fasc. 4ª. Paris.
- Lee M. E, and Jones D. K C, (2004). "Landslide Risk Assesment". Thomas Telford.
- Suárez D., Jaime (2009). "Deslizamientos – Técnicas de Remediación". Volumen 2. Primera Edición. División de Publicaciones UIS. Bucaramanga (Colombia).
- Suárez D., Jaime (1998). "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales". Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga (Colombia).
- Turner A. K. And Schuster L R. (1996). "Landslides Investigation and Mitigation". Special Report 247. Transportation Research Borrad. Nacional Research Council. USA.

1.7.3 VISITA DE RECONOCIMIENTO

Una vez examinada la información disponible se efectuó una visita al sitio del estudio con el equipo técnico de GIA, que persiguió, como primera medida, corroborar las acepciones inferidas en la etapa inmediatamente anterior, formular a priori un modelo hipotético de los problemas de inestabilidad y de la secuencia estratigráfica, organizar el inventario de viviendas, proponer los puntos de exploración del subsuelo, identificar los agentes detonantes de los procesos morfodinámicos y plantear de forma preliminar alternativas de mitigación de la amenaza.

1.7.4 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE Y TEMÁTICA

1.7.4.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Con el objeto de conseguir el mapa base para las diferentes etapas del proyecto, contrastar el levantamiento catastral de que dispone el distrito; registrar la morfometría de la ladera, los signos de inestabilidad, las viviendas, las vías, y todo tipo de estructura física existente, como postes, pozos de inspección etc.; se realizó el levantamiento topográfico del sector a escala de trabajo 1:500 (pero expuesto gráficamente a escala 1:500), con curvas de nivel cada 0.5 metros. Éste fue amarrado a placas del IGAC (MAGNA-SIRGAS) que sirvieron de soporte para la definición de la poligonal de trabajo. El barrido altimétrico y planimétrico se ejecutó con la ayuda de una estación total, mediante un procedimiento mixto, que involucró tanto la toma de secciones transversales como la captura de una nube de puntos.

La interpretación cartográfica se efectuó con el empleo del software SURFACE MODELING bajo la aplicación de un modelo de interpretación dirigida. Es decir, se definieron y respetaron las barreras físicas actuales y se condicionó la interpretación a éstas, sin permitir el desempeño del Software a su libre esquema de triangulación.

1.7.4.2 ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS

A partir de la información existente, de la interpretación de las fotografías aéreas de años anteriores, de los levantamientos topográficos, y de campo; se establecieron los niveles litológicos en términos de unidades de roca y suelo tanto locales como regionales con su ubicación espacial; se identificaron los principales rasgos tectónicos, en especial fallas y lineamientos fotogeológicos; se diagrama la morfodinámica, las formas estructurales, etc. De igual forma, se determinó la geología estructural del macizo rocoso (específicamente orientación de la estratificación o influencia de los planos de discontinuidad o falla), los espesores y grados de alteración de los materiales depositados, la presencia de suelos residuales, y la potencialidad de movimientos en masa. Como resultado de este trabajo, se presentan los planos geológico y geomorfológico, realizados en escala de trabajo 1:5000 el general y 1:500 el local.

1.7.5 ESTUDIO GEOTÉCNICO BÁSICO

1.7.5.1 INVENTARIO DE PROCESOS DE INESTABILIDAD

Se identificaron y delimitaron los diferentes procesos de inestabilidad, activos o potenciales. Cada proceso se registra en una ficha técnica y cartográfica, en la que se consigna toda la información concerniente al mismo: clasificación del proceso, magnitud, eventos detonantes y contribuyentes, frecuencia del movimiento, actividad, tendencia a la propagación, daños producidos, geología estructural, morfometría del talud, etc. Esta información junto con el plano geomorfológico, constituyen el producto final del Inventario de procesos de inestabilidad y son la base para contrastar la amenaza a corto y mediano plazo, y para calibrar el plano de zonificación.

1.7.5.2 PROGRAMACIÓN DE EXPLORACIÓN DE SUBSUELO

Este tópico se abordó mediante la ejecución de doce (12) perforaciones mecánicas con avance de percusión y lavado y rotación, nueve (9) apiques, cinco (5) trincheras, una columna estratigráfica y la toma de datos estructurales. Lo anterior permitió una buena aproximación al modelo geológico y geotécnico en el área. El programa de ensayos de laboratorio se dirigió a la estimación de la resistencia al corte de los horizontes comprometidos: los llenos antrópicos y los suelos residuales. Las muestras se sometieron a pruebas índice como: humedad natural, peso unitario, límites de Atterberg, granulometría, entre otras; y de comportamiento esfuerzo deformación, acordes con el nivel de esfuerzos existente en campo, como corte directo, expansiones, consolidaciones y compresiones inconfinadas.

1.7.6 ANÁLISIS GEOTÉCNICO

1.7.6.1 MODELO GEOTÉCNICO

Con base en la investigación de campo, en los ensayos de laboratorio y en algunos principios básicos de la geología estructural se elabora un modelo (aproximado) del subsuelo, en el que destaca la secuencia estratigráfica, la disposición estructural del macizo y los parámetros geomecánicos que se obtienen para cada horizonte de suelo o roca.

Se emplea durante la elaboración de este ejercicio la base cartográfica obtenida del levantamiento topográfico, escala 1:500. Las secciones estratigráficas (o geotécnicas) se levantan en la dirección probable de movilización de las unidades de ladera, que a priori concuerda con el azimut del buzamiento de la estratificación promedio. Así se diagraman los espesores de cada uno de los materiales, su disposición estructural, los parámetros geomecánicos y la posición probable de la superficie de falla. Este modelo es de gran importancia para el desarrollo del análisis paramétrico y de estabilidad.

1.7.6.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

La definición de las zonas homogéneas contempla variables como: material (unidad de roca y tipo de suelo), condición estructural, propiedades físico-mecánicas, y drenaje. Esta tarea implica la convolución de los estudios básicos: geología – estratigrafía (en unidades de roca y suelo) y estructural-, geomorfología – unidades morfológicas, morfométricas y procesos-, la hidrogeología, la investigación del subsuelo y la caracterización geotécnica de los materiales. Para el desarrollo de este tema se da uso a técnicas heurísticas o de cruce cualitativo de mapas.

1.7.6.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Se emplean para la evaluación local y general de estabilidad, métodos de análisis estático (equilibrio límite, Jambu o Bishop, y análisis paramétricos, Mora - 1992) de acuerdo con los mecanismos de falla probables o presentes en la zona de estudio. En este último caso, se modelan en las unidades de suelo y roca alterada: deslizamientos traslacionales o rotacionales por saturación, reblandecimiento, y presurización, entre otros.

Los análisis de estabilidad se efectúan para las diferentes condiciones, 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 obras de mitigación planteadas.

1.7.7 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA

La amenaza, entendida como la probabilidad de excedencia de un parámetro específico durante un tiempo de exposición determinado, se describe mediante la evaluación del Factor de Seguridad *FS* como parámetro específico de estabilidad (Sánchez, 2000). La relación existente entre estas dos variables (F.S. y Pf) y la obtención de las mismas, se hace aquí con base en los lineamientos metodológicos de los Estimativos Puntuales, PEM (Rosenblueth, 1975 y Harr, 1987). Por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de un evento particular (*FRM*) se evalúa en términos de sus eventos condicionantes a través de la ley de probabilidades totales.

Dicha probabilidad, es función de las probabilidades condicionales de que se presente el deslizamiento para todas las posibles combinaciones de lluvia y sismo. Bajo el marco teórico expuesto, la evaluación de amenaza requiere entonces como insumos: los mecanismos de falla; y las funciones de probabilidad de las variables involucradas cohesión y fricción. Estos elementos, coligados con los resultados del análisis de estabilidad para las distintas combinaciones permiten determinar las curvas de probabilidad de falla de los taludes en estudio. Si bien el análisis se efectúa para casos individuales, la probabilidad condicional de falla obtenida en cada uno de ellos es fundamental en la definición de la curva de probabilidad de falla de la zona de estudio,

gráfica que se constituirá el último eslabón para la elaboración del Mapa de Amenaza Actual (escala de trabajo1:500).

1.7.8 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

A partir de los resultados del análisis de amenaza y de las observaciones de campo, se identifican y localizan los elementos en riesgo (unidades constructivas.). Una vez identificados los elementos en riesgo, se deduce su grado de vulnerabilidad, entendido este último como una función de las pérdidas esperadas ante la ocurrencia de un evento determinado.

La evaluación de la vulnerabilidad se realiza teniendo como soporte la evaluación patológica estructural y la revisión estructural y geotécnica, y los inventarios general y detallado de las edificaciones. Aspectos como el tipo de sistema estructural, el tipo de mampostería, la cubierta y la calidad de la construcción, son baluartes para estimar el índice de vulnerabilidad física.

El análisis patológico emplea tanto técnicas de razonamiento aproximado (opinión de expertos), como la puesta en marcha de ensayos destructivos y no destructivos, v.g. la extracción y el fallado de núcleos y muretes, pruebas de ultrasonido, esclerometría, y tracción en aceros de refuerzo, en una muestra representativa de las edificaciones: veintidós (22) de las construcciones. La contrastación estructural se desarrolla a la luz de de los parámetros obtenidos en la auscultación patológica gracias a la modelación con programas de elementos finitos: ETAPS. Estas dos labores permiten concluir acerca de la capacidad de respuesta ante eventos sísmicos: vulnerabilidad sísmica, y de su posibilidad de habitabilidad hacia el futuro. Condición última determinada con base en el cumplimiento de los requerimientos postulados por la NSR/98 por el diseño y por la construcción.

La deducción del índice de vulnerabilidad física por remoción en masa se basa en una modificación a la propuesta realizada por Léone (1996). En este sentido se determina con base en la composición orgánica y estructural de las edificaciones y en la longitud potencial de viaje de la masa inestable, las zonas de afectación directa o indirecta para cada mecanismo de inestabilidad, los índices de daño y el grado de amenaza ($\propto$). Estos elementos serán el soporte para la determinación del índice de vulnerabilidad física.

Finalmente, analizada tanto la amenaza como la vulnerabilidad, se llevará a cabo la convolución de estas dos variables para definir el riesgo. Para ello se determinan los costos probables de falla a partir de los escenarios de afectación, del índice de vulnerabilidad física y de 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 obtiene; entonces, como el producto de la probabilidad de falla, por el costo de falla que no es otra cosa que la sumatoria del índice de vulnerabilidad física por el costo inicial del elemento expuesto.

1.7.9 EVALUACIÓN DE MITIGABILIDAD

La identificación y clasificación de las medidas de reducción del riesgo, es un proceso evolutivo en el tiempo y que se perfecciona en la medida que se alcancen los diferentes objetivos del estudio o se desarrollen las diferentes etapas del mismo. La selección de las mejores alternativas técnicas, sociales y económicas se lleva a cabo con base en un análisis de costo/beneficio, que involucra aspectos como la vida útil, el mantenimiento y el uso del lugar.

Lo anterior permite concluir sobre dónde es conveniente reducir el nivel de amenaza, es decir llevar a cabo obras de contención o mitigación y cual es la mejor alternativa, y en donde se requiere evadir el problema o sea reducir el nivel de vulnerabilidad.

1.7.10 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El segundo informe técnico contiene siete (7) capítulos, seis (6) anexos y once (11) planos, discriminados como se detalla en la *Tabla 1.2*, en la *Tabla 1.3* y en la *Tabla 1.4*.

TABLA 1.2 CONTENIDO

CAPÍTULO	CONTENIDO
CAPÍTULO 1	GENERALIDADES
CAPÍTULO 2	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO
CAPÍTULO 3	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA
CAPÍTULO 4	ESTUDIO GEOTÉCNICO
CAPÍTULO 5	HIDROLOGÍA, COBERTURA Y USOS DEL SUELO
CAPÍTULO 6	EVALUACIÓN DE AMENAZA
CAPÍTULO 7	EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 1.3 ANEXOS

ANEXO	CONTENIDO
ANEXO A	TOPOGRAFÍA
ANEXO B	GEOLOGÍA
ANEXO C	GEOTECNIA
ANEXO D	AMENAZA
ANEXO E	VULNERABILIDAD Y RIESGO
ANEXO F	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 1.4 PLANOS

PLANO	CONTENIDO
PLANO 1	LOCALIZACIÓN
PLANO 2	MAPA BASE
PLANO 3	GEOLOGÍA GENERAL
PLANO 4	GEOLOGÍA LOCAL
PLANO 4A	SECCIONES GEOLÓGICAS
PLANO 4B	SECCIONES GEOLÓGICAS
PLANO 5	GEOMORFOLOGÍA
PLANO 6	HIDROLOGÍA Y USOS DEL SUELO
PLANO 7	ZONAS HOMOGÉNEAS
PLANO 8	ZONIFICACIÓN DE AMENAZA
PLANO 9	VULNERABILIDAD DE ESCENARIO ACTUAL POR FENÓMENO DE REMOCIÓN EN MASA
PLANO 10	VULNERABILIDAD

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

CAPÍTULO 2

TOPOGRAFÍA

CAPÍTULO 2

TOPOGRAFÍA

Como insumo esencial para la elaboración de la cartografía geológica, geomorfológica, geotécnica, de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, se realiza el levantamiento topográfico detallado, a escala 1:500, en el área designada para el estudio. En este trabajo se identificó y registró: la morfometría de las laderas, los rastros de inestabilidad, las viviendas, las vías, y todo tipo de estructura física, como postes, pasos peatonales, pozos, hidrantes, válvulas, cajas, paramentos, cercas y escaleras, entre otras. A continuación se describen las labores comprendidas para tal fin y se exponen sus resultados.

2.1 ALCANCE ESPECÍFICO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Acometer el levantamiento topográfico (planimétrico y altimétrico), a escala de trabajo 1:500, en coordenadas reales y el amojonamiento de tres (3) vértices, acorde con los siguientes parámetros básicos:

- Amarre a coordenadas reales: Sistema de Referenciación Magna-Sirgas.
- Captura de información topográfica en las tres dimensiones: X (Este), Y (Norte), Z (Cota).
- Registro detallado del sitio con: postes, hidrantes, válvulas, cajas, pozos, vías, paramentos, cercas, evidencias geomorfológicas y morfodinámicas (escarpes, cuerpos de deslizamiento, etc.), entre otros.

2.2 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

Luego de realizar la inspección visual en campo de la ladera de Buena Vista Oriental, y una vez evaluada la información disponible, se procedió a hacer el levantamiento topográfico (planimétrico y altimétrico), teniendo en cuenta la obtención de curvas de nivel cada 0.50 metros, mediante la aplicación de un procedimiento mixto que incluyó tanto la realización de secciones transversales como la captura de una nube de puntos.

2.2.1 TRABAJO DE CAMPO

El levantamiento topográfico involucró la captura de 5191 puntos, y tuvo una duración de seis (6) días, marcados entre el 30 de junio y el 05 de julio de 2009. Se llevó a cabo en tres etapas. La primera encerró el geoposicionamiento, y el diseño y tendido de las poligonales de amarre y cierre. La segunda comprendió el espacio abierto; allí se tomó la información necesaria para la obtención de curvas de nivel cada 0.5m, los

prismas se dispusieron en los cambios de pendiente hasta obtener un cubrimiento total del área. Y la tercera fase abarcó el registro de la infraestructura como lo es: los paramentos, los andenes, las construcciones, los postes, los pozos, las estructuras de contención (muros en cantiliver) y los árboles; el barrido se llevó a cabo con una nube de puntos, como se ilustra en la *Foto 2.1*.



FOTO 2.1 TRABAJO DE CAMPO

2.2.2 LOCALIZACIÓN CARTOGRÁFICA

El Barrio Buena Vista Oriental, es jurisdicción político-administrativa de la localidad de San Cristóbal, yace en el flanco suroeste de los cerros orientales, ocupa parte de la cabecera de la microcuenca de la Quebrada Ramajal (véase el *Plano 1*), y tiene asiento entre la Carretera a Oriente y la transversal 12A sur, y desde la periferia de la fabrica El Tabor hasta la calle 31 sur; limita al occidente con el barrio Ramajal, al norte con la fabrica El Tabor, al sur con las etapas I y II de Buena Vista y al oriente con espacio abierto. Se enmarca en el polígono definido por las coordenadas planas contenidas en la *Tabla 2.1*, con elevaciones que varían desde los 2804.7 m.s.n.m hasta los 2873.7 m.s.n.m, y su área aproximada es de 4 Ha.

TABLA 2.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO

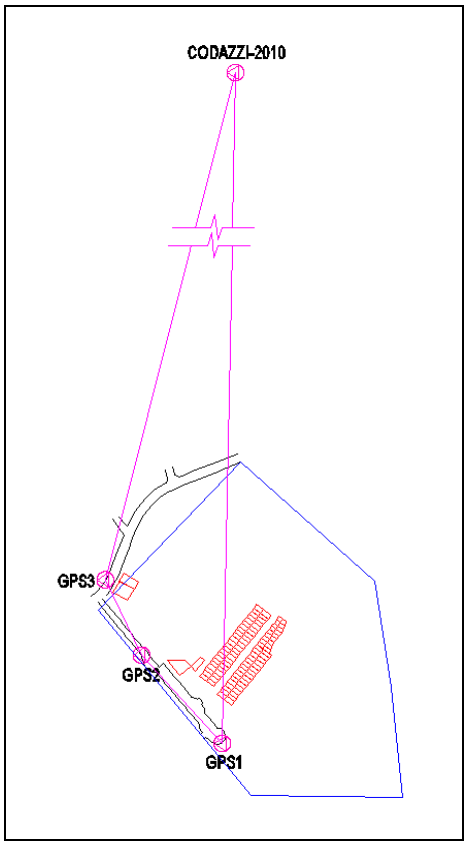
NORTE (M)	ESTE (M)
99524.1	95575.8
99411.1	95717.3
99516.7	95830.8
99616.6	95739.3
99628.3	95657.8
99637.1	95574.0

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE AMARRE

El levantamiento está amarrado al sistema de posicionamiento global del IGAC; los datos se referencian a las coordenadas geográficas 04º40'49.75" de latitud Norte y 74º08'47.73" de longitud oeste, al que se le asigna como proyección 109320.965 m.N. y 92334.879 m.E.; respectivamente. El punto de partida es la placa CODAZZI-2010, localizada al interior de las instalaciones del IGAC, a la que se le atribuye como proyección: 104696.284 m.N. y 99732.359 m.E., y elevación 2588.6 m.s.n.m.; de ella se hace el traslado de coordenadas a los puntos GPS1 y GPS2, fincados en la zona del proyecto. La *Figura 2.1* ilustra la poligonal, y el *Anexo A.1* contiene la certificación del punto de amarre, expedida por el IGAC.

FIGURA 2.1 POLIGONAL DE AMARRE

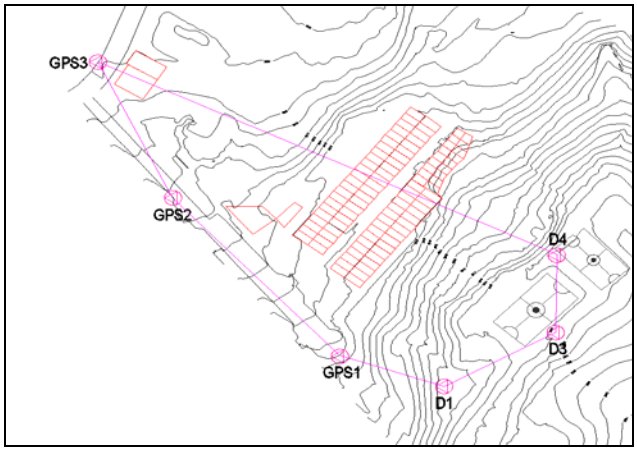


FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.4 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE CIERRE

Una vez georeferenciada el área a través de la poligonal de amarre, se procedió al cierre y ajuste de la poligonal interna constituida por seis (6) estaciones de referencia o deltas: el GPS1, el GPS2, el GPS3, D1, D3 y D4 desde las que se establecen visuales a los sitios radiados para la obtención de la nube de puntos y las secciones. La *Figura 2.2* reseña un esquema de la poligonal levantada.

FIGURA 2.2 POLIGONAL DE CIERRE



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.5 AJUSTES DEL LEVANTAMIENTO

Una vez surtidas las etapas previas se dio curso al ajuste y cierre de la poligonal del levantamiento topográfico, que arrojó los siguientes resultados:

- Error de cierre en coordenadas Norte = -0.005m
- Error de cierre en coordenadas E = 0.000 m.
- Error de cierre en ángulo = 8”
- Precisión = 1:67978.

2.2.6 AMOJONAMIENTO DE REFERENCIA

Se materializó con tres (3) placas fijadas y marcadas como GPS1, GPS2 y GPS3. El primero está cimentado en el centro del andén que da término, en el extremo oriental, a la calle 31 sur, el segundo reposa en el andén sur de la calle 31 sur entre el paramento y una zona verde, y a 53 metros del borde interno de la carretera al oriente, y el tercero yace en la acera occidental de la antigua vía al llano, 15 metros al noroccidente de la calle 31 sur. El *Anexo A.2* contiene los detalles de los mojones de referencia. Existe vista entre las placas, y sus coordenadas y elevación se relaciona en la *Tabla 2.2* y su posición cartográfica se expone en el *Plano 2*.

TABLA 2.2 MOJONES MATERIALIZADOS EN CAMPO

MOJÓN	NORTE (M)	ESTE (M)	COTA (MSNM)
GPS1	95615.1840	99503.1260	2823.0120
GPS2	95682.7980	99443.1400	2810.6300
GPS3	95740.3700	99416.2910	2804.1510

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

2.2.7 CONDENSACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO

La información tomada en la estación total se consignó, a través de un colector de datos interno y el programa de computadora CRC (Comunication Reduction and Conversion Program), permitió procesar tal información.

2.2.8 TRABAJO DE OFICINA

Residió en georeferenciar los puntos topográficos tomados en campo con el uso del programa Transit versión No. 2.11. El procesamiento cartográfico del levantamiento se ejecutó con el módulo Surface Modeling del programa Eagle-Point Versión No. 14, bajo un modelo de interpolación dirigida en tres dimensiones, lo que conllevó a definir y respetar las barreras físicas actuales, en especial los frentes rocosos, los taludes, los escarpes (de roca y deslizamiento) y los cuerpos de deslizamiento, y a condicionar la interpretación a éstas, sin permitir el desempeño del programa a su libre esquema de triangulación; en este sentido jugaron un papel importante las secciones transversales.

El proceso así desarrollado puede entenderse como una conceptualización de un submodelo para un SIG, pues primero se elaboran las diferentes capas de información y posteriormente se hace la interpolación. De esta manera entonces, se seleccionaron los postes de alumbrado, los pozos de inspección y demás elementos del amoblamiento urbano, se delinearon las vías y se delimitaron los taludes. Para una mejor aplicación del programa se procesaron parcialmente en tres dimensiones los diferentes elementos topográficos levantados, lo que dio como resultado una mayor precisión y calibración de los límites y contornos. Finalmente para terminar la generación del mapa base, se realizó la integración e interpretación final de todo el conjunto. Como resultado de la actividad anterior, se definió la salida gráfica del plano topográfico, *Plano 2*, escala 1:500 con curvas de nivel cada 0.5 metro, y la cartera electrónica (*Anexo A3*).

2.3 EQUIPO

El equipo utilizado involucró una Estación Total TOPCON GTS-236W de precisión angular al segundo y alcance de lectura con prisma sencillo de 2400 m de distancia, y capacidad para almacenar hasta 8000 puntos topográficos y lectura vertical cenital; dos (2) prismas; y dos (2) GPS SOKKIA STRATUS de alta precisión, georeferenciados con la información suministrada por el IGAC del vértice CODAZZI 2010. Estos dos últimos de trascendencia para el traslado de coordenadas. El equipo y los recursos empleados se relacionan en la *Tabla 2.3* y el certificado de calibración de la estación se expone en el *Anexo A.4*.

TABLA 2.3 RELACIÓN DE EQUIPO Y ELEMENTOS POR COMISIÓN

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (UN)
ESTACIÓN TOPCON GTS-236W	1
GPS SOKIA STRATUS	2
PRISMAS	2
RADIOS DE ONDA CORTA	4
VEHÍCULO	1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La evaluación geológica está orientada principalmente hacia la obtención de un modelo geológico y estratigráfico que permita optimizar la exploración geotécnica e interpretar las condiciones de estabilidad, y facilitar las recomendaciones de mitigación de los escenarios de riesgo. Tiene como insumos los resultados obtenidos durante la exploración geológica. Los modelos geológicos son estratigráficos y estructurales, con el fin de diferenciar el comportamiento entre y de unidades sometidas a esfuerzos tectónicos, que definen materiales intensamente fracturados o triturados con comportamientos geotécnicos diferentes al de la roca poco fracturada.

3.1 MÉTODO DE TRABAJO

El levantamiento y cartografía geológica consiste en primera instancia en la recopilación, procesamiento y evaluación de la información secundaria disponible tal como: informes técnicos, bases cartográficas del IGAC y fotografías aéreas, entre otras. Y en segunda medida, recae en el trabajo de campo a nivel regional y local, que involucra actividades de exploración superficial mediante estaciones de control, levantamiento de datos estructurales y columnas litológicas, y la comprobación de la fotointerpretación. Por último, se complementa con la exploración del subsuelo programada para fines geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos (sondeos, apiques, y sondeos eléctricos verticales), la que provee información útil para la evaluación de amenaza.

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

<u>Fase Preliminar</u>

- Recopilación y análisis bibliográfico de información geotécnica, geológica, climatológica, hidrológica, hidrogeológica, etc. del área de estudio, existente en las diferentes entidades públicas y en algunas privadas.
- Interpretación multitemporal de fotografías aéreas. En esta labor se hizo hincapié en los rasgos geológicos y geomorfológicos, en la delimitación de los procesos morfodinámicos y en la intervención antrópica.
- Adquisición de planos topográficos a escala 1:10000 y 1:2000, disponibles en el IGAC y en otras entidades.

- Reconocimiento general del terreno e identificación de las unidades de roca, así como la existencia de potenciales procesos de inestabilidad y de sus mecanismos de falla.

Fase de campo y oficina

- Levantamiento de datos estructurales y de columnas estratigráficas detalladas de las litologías aflorantes, a nivel local.
- Toma de fotografías convencionales que ilustran las características de relevancia.
- Elaboración de los planos geológico regional y detallado. La cartografía geológica se concentró en la delimitación de los depósitos recientes –de ladera – así como de las unidades líticas aflorantes; para tal fin, se aprovecharon los escarpes y cortes hechos para explotación en Chircales y para la construcción de reservorios y vías.
- Realización del mapa geomorfológico detallado, en el que se destaca la morfometría, los modelados (morfogénesis), las geoformas (morfología) y los procesos tanto erosivos como morfodinámicos en el área.

3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Del extenso catálogo de documentos técnicos en manos de las entidades públicas (El Acueducto, la DPAE, la Caja de Vivienda Popular, Planeación Distrital, la UAERMV, etc), tal vez los de mayor trascendencia para entender la incubación y el resultado en Buenavista Oriental III Etapa son:

- Hidrogeología y Geotecnia Ltda. (2000). "Estudio de Zonificación de Riesgos por Remoción en Masa en los Barrios Triángulo, Triángulo Alto y Corinto de la Localidad de San Cristóbal, Santa Fe de Bogotá D. C". FOPAE-DPAE. Santa Fe de Bogotá.
- Ifcaya (1988). "Estudio Geológico y Geotécnico de Algunos Sitios Críticos en los Barrios Gran Colombia, Triángulo, Corinto y Ramajal". Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria de Obras Públicas. División de Estudio. Bogotá D. E.
- Ingeocim Ltda.-UPES–FOPAE. (1998). "Zonificación por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá D. C." Mapa Geológico. Bogotá D.C.
- Universidad Nacional de Colombia (2006). "Diagnóstico Geotécnico y Estructural de 11 (Once) Proyectos de Vivienda de la Caja de Vivienda Popular". Informe Final. Tomo 8. Urbanización: Buenavista Oriental III Etapa. Alcaldía Mayor de Bogota. Caja de Vivienda Popular. Bogotá D. C.
- Bravo L. Álvaro C. (2008). "Diagnóstico técnico DI-3944, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 95599. Bogotá D.C.
- Hewitt V. Víctor M. (2009a) "Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 96939 – Emergencia 2610. Bogotá D.C.
- Hewitt V. Víctor M. (2009b) "Diagnóstico técnico DI-3991, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Eventos 95992, 96633 y 96851. Bogotá D.C.
- Hewitt V. Víctor M. (2008a) "Diagnóstico técnico DI-3848, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Eventos 91103,94051 y 94080. Bogotá D.C.
- Hewitt V. Víctor M. (2008b) "Diagnóstico técnico DI-3882, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 94913. Bogotá D.C.
- Pérez Hernando (2007). "Diagnóstico técnico DI-3460, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica, Bogotá D.C.

- Reyes G. José L. (2005) "Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica, Bogotá D.C.
- Villamil V. Tulio I. (2008). "Diagnóstico técnico DI-3633, Barrio Buenavista Oriental". DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Evento 86303. Bogotá D.C.

Los estudios consultados, que incluyen zonas muy próximas a la de interés, permiten reseñar, entre otras particularidades, las siguientes:

a) El plano geológico de Ifcaya (1988), escala 1: 10.000, destaca que el barrio se asienta sobre el extenso dominio de la Formación Bogotá, constituida por alternancias de arcillolitas y areniscas, pero con predominio de las primeras. La secuencia estratigráfica, ausente de la intervención de sistema de falla alguno, delinea, para Buenavista Oriental, una ladera estructural con rumbo NE-SW y buzamiento hacia el W, con gradientes entre 30 y 45 grados.

b) La geología presentada por Ingeocim (1998), a escala 1: 10.000, emplaza al Barrio sobre depósitos de flujos de tierra, que cubren la extensa exposición de la Formación Bogotá. El contacto con la Formación Cacho y el de ésta con Guaduas, son normales. El conjunto delinea una ladera estructural con rumbo NE-SW y buzamiento hacia el NW, con gradientes de hasta 45°. El papel estructural, salvo por la Falla de Bogotá, dista de tener relevancia: las fallas de rumbo y los pliegues, y ni que decir de los micropliegues, brillan por su ausencia.

c) La cartografía levantada e ilustrada por Hidrogeología y Geotecnia Ambiental Ltda (2000) fue baluarte importante para conocer la continuidad lateral de las unidades estratigráficas y el comportamiento estructural de la franja oriental de la ciudad. Este trabajo al igual que los anteriores enmarcan la porción de la vertiente como una ladera estructural, pero a diferencia de los trabajos anteriores fija la polaridad de los planos de estratificación más al suroeste, con buzamientos entre 25° y 35° (i.e. con rumbo NW-SE, e inclinación hacia el SW), y abre la posibilidad de diagramar sistemáticas de falla. El modelo estructural es discontinuo, y devela la importancia de la tectónica en la respuesta de las laderas, no obstante, no permite deducir si las trazas y fallas responden a una o más sistemáticas de influencia regional.

De lo anterior es claro que las cartografías de Ifcaya (1988), HGA (2000) e Ingeocim (1998) son consistentes entre sí, al punto de coincidir en la limpieza estructural de la porción de la vertiente, derrotero del que se distancia GIA. Difieren en la prevalencia y extensión del cuaternario, tema en el que Ingeocim (1998) hace especial énfasis y da su mayor contribución, al punto de diagramar un flujo de tierras en el espacio ocupado por la urbanización.

En lo que respecta a tópicos como: exploración del subsuelo, ensayos de laboratorio y caracterización geomecánica, el conjunto de documentos técnicos integran propiedades de resistencia de los paquetes de arenisca y en un solo caso de las limonitas y de los rellenos antrópicos y en un particular escenario (pues sólo puede acopiarse la información de HGA, 2000) levantamientos estructurales v.g. en el Triángulo, Triángulo Alto y Corinto. Los ensayos disponibles son: cortes directos, cargas puntuales, pesos unitarios, límites, humedades naturales y compresiones inconfinadas.

El diagnóstico geotécnico y estructural acometido por la Universidad Nacional, aunque bien intencionado, trata muy tangencialmente el marco geotécnico; los apiques, cuatro en total, arrojan sus mayores réditos en la descripción estratigráfica, pero carecen de trascendencia en la valoración de la respuesta geomecánica del

sistema de cimentación, en parte por la ausencia de ensayos de laboratorio y en parte porque sólo se destinaron para recabar información sobre el modelo de fundación empleado (en la urbanización).

La investigación estructural entrelaza líneas gruesas de auscultación patológica, es sin lugar a dudas el eslabón fuerte del estudio, fruto insuficiente para evitar un errático cierre. Los ensayos en muretes y placas en ningún caso cubren un módulo de construcción específico y sus resultados reposan como letra muerta: los análisis estructurales los dejan de lado y emplean en su lugar, valores de resistencia teóricos esperados.

Los diagnósticos técnicos, a pesar de las erráticas interpretaciones de los signos encriptados del deslizamiento, expuestos paulatinamente durante los últimos años, signos que adecuadamente descifrados y concatenados hubiesen significado la detección temprana del fenómeno, son baluartes documentales gráficamente enriquecidos, que magnifican su importancia por ser salvaguardas de la vida de los residentes, en otras palabras por ser instrumentos de decisiones oportunas en momentos precisos y en justa medida. Son la muestra patente de las bondades del seguimiento y pilares fundamentales, junto con el conocimiento de los habitantes para la reconstrucción del proceso, y por consiguiente para aproximarse al reconocimiento de sus agentes condicionantes y desencadenantes; los documentos subrayan la participación del agua lluvia y de infiltración, representadas en humedad y filtraciones, como constantes en el tiempo. Constantes vigentes aun hoy día.

3.3 GEOLOGÍA GENERAL

Buenavista Suroriental se emplaza en una antigua zona de explotación de arcilla, en la que los niveles productivos se correlacionan con estratos de la Formación Bogotá. Las laderas evidencian los rasgos de disección de una extinta red de drenaje subparalela, matizada por depósitos coluviales, que enmascaran la pendiente estructural tallada en la base por las Formaciones Cacho y Guaduas. Este conjunto hace parte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá, se distingue por una fuerte tectónica, inicialmente de compresión, seguido por un fallamiento complejo y finalizado con el colapso gravitacional de grandes bloques, tal vez determinados por la fracturación ocurrida.

3.3.1 ESTRATIGRAFÍA

El espacio en el que está inmersa la subcuenca de la Quebrada Ramajal definido por el cuadrángulo remarcado en la *Tabla 3.1*, y que cobija a la urbanización (De Buenavista) es un ejemplo a escala de la compleja evolución de la Sabana; la Falla de Bogotá; la concurrencia de las Formaciones Labor-Tierna, Cacho, Guaduas y Bogotá, la amplia cobertura de los Cuaternarios, en especial de los depósitos fluviotorrenciales, matizan el escenario.

La representación cartográfica expuesta en el plano toma como referencia documentos y estudios realizados con anterioridad por entidades distritales, en especial la cartografía de Ingeocim (1998) y se complementa con la fotointerpretación de pares estereoscópicos de los vuelos relacionados en la *Tabla 3.2* y con controles de campo que permiten el ajuste de los contactos litológicos y de las condiciones estructurales reinantes. En las páginas siguientes se describen las diferentes unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente. Éstas se representan en el *Plano 3*.

TABLA 3.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO

NORTE	ESTE
95575.8	99524.1
95706.9	99420.5
95796.1	99520.9
95698.1	99600.2
95675.1	99605.2
95574.0	99637.1

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 3.2 VUELOS FOTOINTERPRETADOS

VUELO	FOTOGRAFÍAS	AÑO	ESCALA
C-743	7, 8, 9, 10	1955	1:9000
C-1774 / S-28946	67, 68, 69, 70	1977	1:8000
C-2128 / S-32138	149, 150, 151	1984	1:18300
R-1131	2306, 2307	1990-1991	1:7500
C-2717 / S-39295	47, 48, 49	2004	1:20460

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.3.1.1 CRETÁCICO

Grupo Guadalupe (Ksg)

Está compuesto por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca de Labor y Tierna, cuyas características son las siguientes:

Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Diagrama los cerros más prominentes del área; (Monserrate, Guadalupe y El Cable) pero sin representación cartográfica aquí (i.e. en el *Plano 3*); esta constituida por una gruesa sucesión de areniscas cuarzosa, duras, de grano fino y color gris claro, bien cementadas dispuestas en bancos muy gruesos (entre 2 y 15 metros), con intercalaciones esporádicas de capas limolitas, lodolitas y arcillosas de colores claros ordenados en capas finas. Su espesor varía entre los 308m y los 406m. Constituye uno de los principales acuíferos y zonas de recarga para la Sabana de Bogotá.

Formación Plaeners (Ksgp)

Consta de tres conjuntos litológicos: el inferior con predominio de arcillolitas silíceas; el intermedio en el que alternan arcillolitas silíceas y areniscas de grano fino, y el superior configurado en arcillolitas silíceas, con un espesor aproximado de 50m. El espesor medio de la sección es de 75 metros (Ingeocim, 1998), y el

predominio de la fase arcillosa hace que el contacto inferior con la Formación Arenisca Dura y el Superior con la Formación Arenisca Labor sea abrupto. Su edad es del Maestrichtiano Inferior. Al igual que la Formación Arenisca Dura carece de representación en el cuadrángulo de estudio.

Formación Labor-Tierna (KsgIt)

Está configurada por tres conjuntos; uno inferior formado por areniscas cuarzosas de grano fino a medio, de color gris claro, ligeramente friable y de 135m a 165m de espesor. Uno intermedio con predominio de arcillolitas silíceas, y espesor de 10 a 15m; y uno superior integrado por areniscas cuarzosas y feldespáticas, gris claro de grano medio a grueso, con estratificación cruzada en estratos de 0.2m a 3.0m y espesor variable entre 90m y 110m. El contacto de esta unidad con la Formación Guaduas es fallado. Ocupa el ápice nororiental del cuadrángulo cartografiado (véase el *Plano 3*).

3.3.1.2 CRETÁCICO-TERCIARIO

Formación Guaduas (Ktg)

Para Hubach (1931, citado por Da Porta, 1977) está comprendida entre el Guadalupe y un horizonte de areniscas denominado "Horizonte Cacho". La amplia extensión geográfica que tienen algunos niveles de arenisca permitió a Hubach establecer límites concretos entre los conjuntos en que se dividió al Guaduas:

El conjunto Inferior: consta de arcillas gris oscuras con algunos fósiles en la base y areniscas de grano fino. El conjunto Medio: está determinado por dos niveles de areniscas; en la base la Arenisca Guía y en la parte superior la Arenisca Lajosa; entre ambas reposa una masa de arcillas gris-oscuras, compactadas a veces carbonáceas y que contienen mantos de carbón explotables. Y el conjunto superior moldeado por arcillolitas rojizas, azulosas, verdosas y grisáceas, con intercalaciones de bancos de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso y mantos inexplotables de carbón. Las arcillas producto de la meteorización de la roca se emplean para la fabricación de ladrillo, bloque, teja y tubería.

Aflora en el piedemonte de los cerros orientales, sobre Guaduas se erigen el alto relieve. Su contacto con la secuencia de Guadalupe está controlado por la falla de Bogotá, y con Formación Bogotá es normal.

3.3.1.3 TERCIARIO

Formación Cacho (Tpc)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental, hace parte del anticlinal de Bogotá y en ella se tallan el alto del Zipa y la divisoria de aguas de un afluente menor del Río San Cristóbal (véase el *Plano 3*). Está forjada por areniscas de color amarillo rojiza, de grano grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.1m a 2.0m y un espesor aproximado de 50m (Ingeominas – Universidad de los Andes, 1997).

Formación Bogotá (Tpb)

Se encuentra por debajo de la Formación Cacho y se destaca topográficamente por sus pendientes suaves; su principal expresión aflora en los flancos del sinclinal de Usme-Tunjuelito. Recibe la infraestructura física y urbanística de las tres etapas de Buenavista (y por consiguiente del área de estudio), y de los barrios Ramajal, Triángulo, Triángulo Alto, Corinto, Los Alpes y San Pedro. Es la formación de mayor extensión y

cobertura en el cuadrángulo de estudio general, tal como la ratifica el *Plano 3*. Está constituida por dos conjuntos; el inferior diagramado por una alternancia de arcillolitas y areniscas cuarzosas, feldespáticas, gris verdosas, de grano fino hacia la base y grueso hacia el tope, con un espesor de 620m; y el superior constituido por arcillolitas de color gris oscuro, gris verdoso y marrón, su espesor sobrepasa los 100m (Ingeominas – Universidad de los Andes, 1997).

3.3.1.4 CUATERNARIO

Depósitos Fluvio Torrenciales (Qft)

Responde a las alongadas acumulaciones heterogéneas de bloques de gran tamaño, de formas angulares a subangulares, embebidos en suelos granulares finos o arcillas. Su origen obedece a la acción combinada de la gravedad y el agua sobre pendientes fuertes, que torrentes y arrastre de materiales desde las partes más altas de la montaña.

Coluviones (Qcl)

Son los depósitos producto de la fracturación, meteorización y erosión de las rocas preexistentes, que han tenido transporte por acción del agua y de la gravedad, y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Enmascaran parcialmente la secuencia estratigráfica; son matriz soportados, y su composición recae en gravas, bloques y cantos subangulares a subredondeados de areniscas, embebidos en suelos arcillosos de consistencia media a blanda.

3.3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Buenavista, está inmerso en el bloque tectónico central, uno de los tres en los que está dividida la Sabana de Bogotá[1]. Este complejo estructural limita con los bloques norte y sur por las fallas de Usaquén y San Cristóbal-Facatativa, respectivamente, y tiene como particularidad, la inversión de las formaciones litológicas que forman los cerros orientales, gracias al papel de la Falla de Bogotá, dislocación que es una falla de cabalgamiento de dirección nor-noreste y buzamiento al este. La Falla de Bogotá pone en contacto las areniscas del Grupo Guadalupe (Ksg) con las arcillolitas de la Formación Guaduas (Ktg) sobre la parte media baja de los cerros. Su traza está bien definida en dirección NE-SW (véase el *Plano 3*) y está acompañada por lineamientos estructurales transversales a su rumbo.

3.4 GEOLOGÍA LOCAL

Este numeral contiene una descripción de la geología, en el espacio exclusivo de la Urbanización Buena Vista Oriental III Etapa (trabajo integrado con el nombre de geología local) con énfasis en la estratigrafía y en el patrón estructural forjado bajo los principios y directrices de la geología para ingeniería; su tratamiento, está ligado a las descripciones de las unidades de roca y suelo (conceptos básicos fijados por la escala de trabajo 1:500), en orden cronoestratigráfico de: la más joven a las más antiguas, pero con la salvedad de que las unidades de roca de una misma formación pueden aparecer intercalados en ciertas porciones del mapa. Para este fin, se emplea la base cartográfica obtenida en el levantamiento topográfico a escala 1:1000 y se aúnan

[1] Microzonificación sísmica de Bogotá (1997). Capitulo 2.

los trabajos de la exploración del subsuelo que conjugan doce (12) sondeos, nueve (9) apiques, cinco (5) trincheras, trece (13) estaciones de control litológico y estructural, que implicaron la toma y análisis de ciento veinticinco (125) datos estructurales. Los resultados de la exploración del subsuelo se describen explícitamente en el Capítulo 4, junto con sus memorias de cálculo y los registros de exploración, y la localización de los componentes de la investigación geotécnica se plasman en el *Plano 4* y en el *Anexo C.1*.

3.4.1 ESTRATIGRAFÍA

3.4.1.1 UNIDADES DE SUELO

Rellenos Antrópicos Traslocados (Qd1 y Qd2)

Son cuerpos mal seleccionados, arcillosos empleados para la reconformación morfológica de los patios y de los frentes de explotación y retrabajados por agentes hidrogravitacionales; lo que los convierte en masas traslocadas, carácter genético último que puede ligarlos a los coluviones, pero denominación que GIA no acoge por la composición. Alberga bloques, cantos, guijos y gravas de arenisca cuarzosas de grano fino, arcillolitas, residuos cerámicos (v.g. ladrillos), así como basuras, madera y raíces envueltos en suelos arcillosos; la fracción gruesa oscila entre el 10% y el 20%en volumen de la masa de suelo. Son matriz soportados, su consistencia es media a blanda, su humedad es baja a media y su color es gris con trazas violáceas y rojizas. Integra dos unidades el Qd1 y el Qd2, solo diferenciados por la consistencia y por la humedad: el Qd2 es más resistente y seco que el Qd1. El espesor oscila entre los siete (7) metros y los doce (12) metros confirmación dada por los sondeos S1 y S2. Esculpen las laderas orientales contiguas a las viviendas 76 a 96.

Relleno Antrópico de Reconformación (Qra1)

Encierra partículas hasta tamaño bloque de areniscas y lodolitas y eventuales restos de cerámicos (ladrillos), bolsas y escombros (entre los milímetros y los siete centímetros) entrelazados en una matriz arcillosa de consistencia media y humedad media a baja. Los bloques contenidos son subangulares y la fracción gruesa ocupa el 25% del volumen de la masa. Son matriz soportados; su color es habano oscuro con trazas violetas; y su espesor divaga entre el metro y la decena de metros, intervalo corroborado por el escarpe de deslizamiento, y por los sondeos S-1, S-2, S-5, S-6, S-8 y S-10. La filtración de agua en la masa es evidente, en especial a partir de los 0.80m de profundidad; los apiques A1, A2, A5 y A9, y las trincheras T1, T2 y T3, así lo ratifican.

En él se esculpe el mayor número de terrazas urbanizadas o no y las laderas del cinturón sur, y recibe la acción del total de las edificaciones (viviendas) y de las canchas de juegos múltiples. Diagramación ilustrada en el *Plano 4*.

Relleno Antrópico de Reconformación (Qra2)

Involucra escombros y residuos sólidos (entre 0.5 y 10 centímetros) aglutinados y compactados para la configuración de plataformas de parqueo, y bloques y guijos de areniscas cuarzosas y lodolitas, entremezclados con suelos arcillo-arenosos o areno-arcillosos, de consistencia o compacidad medias. Su espesor es inferior a los dos metros. Dibujan una morfología suavemente inclinada (con ángulos inferiores a los seis grados) y dan vida al borde occidental del área de estudio, residente al contiguo de la carretera al Oriente (véase el *Plano 4*).

Relleno Antrópico Seleccionado de Reconformación (Qra3)

Bajo esta designación se conjugan las acumulaciones de material seleccionado, compactado al 90% del proctor modificado, pero cubiertas por una capa de concreto en su parte superior y cuyo espesor no alcanza los 0.50m. La matriz es arenosa y las partículas más gruesas son de tamaño grava media a gruesa, su humedad es baja a media. Sus evidencias son notorias a lo largo de la calle 31 sur.

Depósitos Antrópicos de Sobretamaños (Qra4)

Responde al apilamiento desordenado, en la base del talud frontal de la plataforma en la que se cimentaron las viviendas, de sobretamaños subangulares de arenisca, entremezclados con fragmentos angulares de arcillolita, de tamaño grava, derivados de la meteorización del macizo rocoso. Los bloques fueron acomodados mecánicamente al rededor y sobre una fracción de la lodolita Tpb-L3 y moldean una pequeña porción del predio al NE de la calle 31 sur (véase el *Plano 4*).

Depósitos Fluvio Torrenciales (Qft)

Se acotan así a las acumulaciones heterogéneas de cantos y bloques heterométricos y decimétricos, y guijos de areniscas cuarzosas, de grano fino, altamente cementadas, y limolitas, en matriz areno-arcillosa o areno-limosa de compacidad alta y humedad baja. Su geometría es alargada y sus espesores no superan el metro. Su origen obedece a la acción combinada de la gravedad y el agua sobre las pendientes, combinación que da lugar a fuertes torrentes y arrastre de los materiales desde las partes más altas de la montaña. Enmarcan la divisoria de aguas, en el único espacio no intervenido (*Plano 4*).

Suelos residuales de la Formación Bogotá (QTpb-Lsr)

Son de composición arcillo-limosa o arcillosa de consistencia media y humedad media. Exponen tonalidades violáceas y rojizas. Su espesor es inferior al metro y reposan cubiertas por los llenos antrópicos, circunstancia que inhibe su exposición en superficie y por consiguiente su cartografía.

Suelos residuales de la Formación Bogotá (QTpb-Asr)

Son suelos areno - limosos, de color amarillo claro a marrón. Su compacidad y su humedad son medias. Su espesor es incierto, aunque las pocas exposiciones no superan los cincuenta centímetros. Al igual que los suelos residuales arcillosos carecen de exposición en superficie. Son no cartografiables.

3.4.1.2 UNIDADES DE ROCA

La secuencia rocosa está armada por alternancias de niveles arcillosos y arenosos: los primeros se identifican con la sigla Tpb-L y los segundos como Tpb-A. Superficialmente unos y otros están parcialmente cubiertos por suelos residuales de composición parental (QTpb-Lsr y QTpb-Asr).

Formación Bogotá – Niveles Arcillosos (Tpb-L)

Son las unidades más representativas de la porción de la vertiente, no sólo por su ocupación espacial sino porque en ellas recae el control morfodinámico y estratigráfico: entallan las caras expuestas en los taludes, y reciben los más relevantes cuerpos de rellenos antrópicos. Están clasificadas y codificadas con un identificador alfanumérico, el prefijo es la abreviatura: Tpb-L, que resume la sigla de la formación: Tpb y el

símbolo de la unidad de roca: L, y el sufijo es un número arábigo que funge como discriminante estratigráfico: 1 (si es la más joven), 2, 3 o 4 (para la más antigua), así Tpb-L1, Tpb-L2, Tpb-L3 y Tpb-L4.

Son arcillolitas y lodolitas abigarradas, de color violeta con trazas habanas y ocres; son blandas (ISRM, 1981), su estratificación es delgada y sus espesores oscilan entre los 14m y los 20m: algunos niveles delgados alcanzan grados de litificación que los asemejan a limolitas con dureza 6. Integra cuatro (4) niveles: el Tpb-L1, el Tpb-L2, el Tpb-L3 y el Tpb-L4, que en su momento (décadas sesenta, setenta y ochenta) se constituyeron en los económicamente explotables y aprovechables de la labor minera para la fabricación de ladrillo, tejas y bloques.

El Tpb-L1 se expone hacia el tope de las laderas, es el nivel menos intervenido; su espesor es cercano a los 20 m y responde al horizonte IIA del perfil de Deer y Patton (1972). Se encuentra parcialmente cubierto por suelos grisáceos a negros limo-arenosos, poco plásticos, muy permeables, provenientes de cenizas, ricos en cuarzo tamaño arena, con fracción limosa posiblemente transportada por el viento a partir de las erupciones volcánicas, y con espesores inferiores a los 0.50m, por menor que los hace no cartografiables. Estos suelos corresponden a la Formación Mondoñedo (Van der Hammen, 1995).

El Tpb-L2 surca casi la totalidad de la urbanización; sirve de superficie de despegue a los cuerpos de deslizamiento: Qd1 y Qd2, y recibe a los llenos dispuestos entre la terraza urbanizada, es decir el espacio ocupado por la III etapa y las canchas de juegos múltiples (véase el *Plano 4* y el *Anexo B.1*). Su espesor divaga entre los 16m y los 22m y fue el último frente de explotación (apreciación deducida de las fotografías satelitales de Google Earth registradas en el 2002).

El Tpb-L3 aflora en los cortes expuestos, labrados entre la urbanización Buena Vista y cerca a la carretera al Oriente; su espesor se aproxima a los 12m, y es el foco por excelencia para la acción de los agentes de intemperismo: erosión en surcos y meteorización (*Foto 3.1*); está separada de la Tpb-L2 por el banco de areniscas Tpb-A2, y es después de ésta la de mayor trascendencia en la respuesta mecánica de las laderas, y por consiguiente en la estabilidad. Y el Tpb-L4 define un pequeño espacio cerca de la carretera a oriente, aunque las características geométricas son inciertas, se cree supera los cuatro (4) metros de espesor. Su papel en la incubación y desarrollo de los procesos de inestabilidad (en Buenavista Suroriental) es inocuo: su posición estratigráfica (i.e. la más baja) la exime de cualquier responsabilidad.



FOTO 3.1 PANORÁMICA DE LA LADERA DE ESTUDIO. EN PRIMER PLANO SE EXPONE EL NIVEL DE ARCILLOLITAS TPB-L3.

Formación Bogotá –Areniscas (Tpb-A1, Tpb-A2 y Tpb-A3)

Es una secuencia de areniscas cuarzosas, grano crecientes, macizas y de cemento arcilloso y con contenido de óxidos de hierro y micas. Sus colores son blanco, blanco-amarillento y amarillo, con algunas trazas ocres y rojizas; son friables; el grano es de tamaño fino a medio y son bien seleccionadas (i.e. el grano es uniforme). La resistencia fluctúa de blanda a moderadamente dura (ISRM, 1981, citado por González de Vallejo y Otros , 2004); y yacen intercaladas con los paquetes de arcillolitas. Las capas no siempre son continuas (posiblemente resultado de la explotación) y sus espesores van desde los dos metros (Tpb-A1 y Tpb-A3) hasta los cuatro (4) metros: Tpb-A2.

Integra tres unidades: la Tpb-A1, la Tpb-A2 y la Tpb-A3, sólo diferenciables por su posición estratigráfica, con poca participación en la gestación de los procesos de inestabilidad. El mayor realce espacial lo ocupa la Tpb-A2, en ella se entallan parcialmente las terrazas de reconformación del borde norte (*Plano 4*) y el drenaje hoy día. Las unidades Tpb-A1 y Tpb-A3, figuran en pequeños espacios, la primera es la responsable del único escarpe rocoso en el predio (capturado en la *Foto 3.2* y en la columna estratigráfica del *Anexo B.1*) y la segunda asoma tímidamente en el predio contiguo al parqueadero, muy cerca de la carretera a Oriente (véase la *Foto 3.3*).



FOTO 3.2 AFLORAMIENTO ALEDAÑO EN EL QUE SE EVIDENCIA EL GRADO DE FRACTURAMIENTO DE LA ROCA



FOTO 3.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO – FUENTE IMÁGENES GOOGLE EARTH

3.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La inversión de la secuencia estratigráfica en el costado oriental de la ciudad dio como resultado el fracturamiento de las rocas duras (areniscas) y el replegamiento de las rocas blandas (arcillolitas); en las primeras, es común encontrar patrones de diaclasas que controlan la estabilidad de antiguos frentes de explotación y de afloramientos naturales, la presencia de estas familias obedece al juego de esfuerzos compresivos al que fue sometido todo el conjunto litológico. De otra parte, se exhiben fracturas inducidas por el efecto de explosiones ejecutadas durante el desarrollo minero de la zona, en la que se asentaron numerosas explotaciones de materiales para la construcción (arcillas, recebos, arenas y agregados, entre otros).

La información estructural, acopiada en el formato de levantamiento estructural, se condensa en figuras y anexos (todos los datos adjuntos en el informe y en los anexos que corresponden a esta notación). Se aunaron en los afloramientos 125 registros estructurales, entre estratificaciones, y diaclasas (véase el *Anexo B.2*). Con el universo muestral, se generaron diagramas de frecuencia, de rosa y estereogramas con red equiángulos, los dos primeros con el ánimo de definir los rumbos promedio de las diaclasas y el tercero para ilustrar las familias principales.

3.4.2.1 DISCONTINUIDADES

Son los rasgos estructurales más abundantes, se trata de superficies de fractura donde el movimiento es imperceptible; se generan a partir de esfuerzos deformacionales propios de la geodinámica terrestre, y ejercen control mecánico en las principales exposiciones de los macizos rocosos, tema que se tratará con algún detalle en el capítulo 6.

Buena Vista III etapa reposa en una pendiente estructural, sin traslocación o cambio de polaridad relevantes. La secuencia estratigráfica descansa con dirección de buzamiento medio 288 e inclinación de 30 grados, pero con variaciones locales que discurren desde los 22 grados hasta los 45 grados. Lo anterior remarca que Buena Vista se encuentra en un único dominio estructural. La estratificación es plana rugosa a plana suave (*Foto 3.4*); los macizos rocosos están transgredidos por cuatro familias de diaclasas: D2=[205/78 – 250/86], D3=[52/61 – 85/65], D4=[112/61 – 178/78], D5=[205/78 – 250/86]; ellas son planas rugosas y planas suaves, cerradas o ligeramente abiertas, de persistencia poco continua. El *Anexo B.2* condensa el conjunto de datos estructurales levantados, divididos por estaciones y el *Plano 4* su ubicación geográfica.

3.4.2.2 LINEAMIENTOS FOTOGEOLÓGICOS

Se deducen exclusivamente de la evaluación fotogeológica, algunos se fijan a nivel regional y dos en el marco local. Estos últimos se exponen con azimuts de rumbo 083º y 102º y carecen de control alguno en las laderas (véase el *Plano 4*) Si bien no se encontraron evidencias para definirlos y catalogarlos como fallas, cabe anotar que son similares al rumbo de la falla de Bogotá, por lo que es menester recabar más información antes de lanzar un juicio definitivo.



FOTO 3.4 PLANO ESTRUCTURAL SOBRE LAS ARCILLOLITAS DE LA SECUENCIA DESCRITA

3.5 GEOMORFOLOGIA LOCAL

3.5.1 MORFOESTRUCTURAL (FORMAS)

El emplazamiento del Barrio Buenavista Suroriental tuvo lugar sobre la pendiente estructural originada por la inversión de la secuencia lito estratigráfica cretáceo-terciaria de los cerros orientales de la ciudad. Si bien es cierto que hasta hace algunos años allí se adelantaron indiscriminadas labores de minería a cielo abierto para la extracción de materiales de construcción (arenas, gravas, recebos, arcillas para la fabricación de ladrillos, entre otras) que posiblemente coadyuvaron en la morfodinámica hoy día; buena parte de estas evidencias han quedado cubiertas por la expansión de la ciudad hacia estos lugares; expansión forjada, en esta década, gracias al retrollenado con residuos provenientes de las antiguas explotaciones o de urbanizaciones aledañas, y con desechos sólidos de las comunidades cercanas.

En este orden de ideas y sin perder el concepto geomorfológico de pendiente estructural original, según lo confirman las aerofotos de 1955, se identifican dos unidades de ladera así: la no intervenida y la de alta intervención por actividades extractivas. Esta última sometida a procesos morfodinámicos significativos, que involucran principalmente los materiales de relleno; y procesos erosivos incipientes, acentuados por la acción combinada de la escorrentía superficial y la poca protección generada por la cobertura vegetal presente (pastos y maleza).

3.5.1.1 UNIDAD DE LADERAS NO INTERVENIDAS (LNI)

Ocupa la parte superior de las laderas, al sureste de la zona de estudio (véase el *Plano 6*), en ella la actividad extractiva está ausente, los estratos de arcillolita aún conservan su cobertura original; cobertura fincada en suelos orgánicos de arcillolita y un delgado depósito fluvio torrencial, conformado por bloques de arenisca embebidos en matrices finas; unos y otros se posan con su ángulo de reposo sin que a la fecha muestren signos de inestabilidad (antiguos o recientes), excepto tal vez cerca al límite de la frontera de explotación en

el que relucen incipientes desprendimientos. Su topografía es ondulada y sus intervalos típicos de pendiente oscilan entre los 15 y los 30º, que la clasifican como empinada (Van Zuidam, 1985), y está parcialmente cubierta por pastos, arbustos y algunos árboles dispersos.

3.5.1.2 UNIDAD DE LADERA ESTRUCTURAL CON ALTA INTERVENCIÓN POR ACTIVIDADES EXTRACTIVAS (LEI)

Es la sumatoria de frentes de explotación, patios y rellenos generados por la explotación de las arcillas. Aquí se Incluyen los escarpes mecanizados y las explanaciones antrópicas. Esta unidad se divide en sub unidades tal como se describe a continuación:

Taludes Extractivos en Roca (LEI-tex)

Se define así al conjunto de escarpes producidos por la actividad extractiva. Sus pendientes son cercanas a los 45º, que las clasifica como muy empinadas (Van Zuidam, 1985), y las superficies expuestas favorecen la profundización del perfil de meteorización y son proclives a la acumulación de detritos en las franjas media y baja de los cortes (véase la *Foto 3.5*). Además de esta fenomenología son latentes los procesos erosivos difusos a concentrados (surcos). Residen al sur de la urbanización en la periferia a los juegos infantiles (*Plano 5*) y al noroccidente de las viviendas.



FOTO 3.5 TALUDES EXTRACTIVOS EN ARCILLOLITAS

Explanación en Roca (LEI-exp)

Son escenarios antrópicamente reconformados, relativamente planos a ligeramente inclinados (menor a 5°, Van Zuidam, 1985), en los que el substrato rocoso (i.e. arcillolitas y areniscas), afectado por la explotación, quedó al descubierto, y en los que se adecuaron patios de maniobras del laboreo minero. Estas explanaciones no fueron recuperadas ambientalmente, solo a través de los años se fue acumulando una delgada capa de material de textura granular fina, combinada con desechos de construcción y basuras que no supera los 0.5m de espesor. Muestra evidencia de erosión laminar difusa.

Explanación para Desarrollo Urbanístico (LEI-edu)

Son el resultado de la reconformación con rellenos antrópicos y cortes posteriores que permitieron ampliar las áreas dejadas por la explanación en roca durante por la explotación minera. Se distinguen la explanación

inclinada a manera de rampa en la calle 31 sur y las plataformas de las áreas de juegos en el umbral de la ladera (v.g. las canchas de baloncesto y la zona de juegos infantiles), y de urbanización (espacio destinado al conjunto habitacional, esquema sintetizado en la *Foto 3.6*) en la parte media, todas con pendientes inferiores a los 10° (i.e planas, ligeramente inclinadas e inclinadas, Van Zuidam, 1985).



FOTO 3.6 TALUD DE RELLENOS PERIMETRALES A LA EXPLANACIÓN

Explanación y Reconformación Escalonada (LEl-exr)

Esta subunidad integra los módulos escalonados labrados y realzados con llenos antrópicos, para recibir la IV etapa de la urbanización (*Foto 3.7*). En el pasado se adelantó allí una intensa explotación de los niveles arcillosos. Hoy día las bermas dibujan anchos desde 6m hasta 16m y los contrapasos cuasiverticales alcanzan alturas de 1.5m, reciben el retrabajamiento de la erosión pluvial: surcos y surquillos, y de los desprendimientos de suelo, expresión concentrada en los escarpes de los taludes.

Es el esquema morfológico dominante al norte de la III etapa de la urbanización (véase el *Plano 5*), encerrado por las subunidades LEl-tra al este y al oeste. Su cobertura vegetal la compone una propagación natural de retamo espinoso y maleza



FOTO 3.7 EXPLANACIONES Y RECONFORMACIÓN ESCALONADA

Taludes de Relleno Antrópico (LEl-tra)

Se define así a los depósitos antrópicos, recreados en la periferia de las explanaciones escalonadas (subunidades LEl-exr, *Plano 5*) y la ladera no intervenida: LNI. Las superficies libres dibujan pendientes desde 35° hasta 45º, y están cubiertas por pastos, retamos y algunos arbustos de porte bajo a medio.

Explanación y Relleno para Conformación de Patios (LEl-rep)

Está compuesta por formas suaves de los patios de cantera. Los gradientes suelen ser inferiores a los 10º. Se ubican adyacentes a los taludes de la antigua explotación minera y dadas sus bajas pendientes y el hecho de tener macizo rocoso cercano, sin rellenos, o con ellos, pero muy delgados, son estables.

Taludes de Relleno Antrópico Traslocado (LEl-trat)

Son acumulaciones antropogénicas sometidas por procesos hidro-gravitacionales. Configuran los taludes orientales de la urbanización, y dan vida a los escarpes y cuerpos de deslizamiento. Su pendiente bordea los 30º, la morfología es lobulada y escalonada, y cóncava, y la cobertura vegetal responde a retamos, pastos y algunos arbustos de porte bajo y medio. En estas subunidades ocupan lugar los abombamientos en la pata, los escarpes laterales, la concentración del flujo, la saturación en la masa, y los vestigios de tuberías perforadas, instaladas a manera de subdrenes posiblemente para despresurizar la masa. Se distinguen dos cuerpos, uno mayor, el DT001-AA (*Foto 3.8*), causante de las emergencias del 17 de diciembre de 2008, del 27 y 30 de enero de 2009 y del 12 de febrero de 2009, y de la evacuación de las familias, y otro de menor velocidad ligado al primero, pero gestado al sur (el DT 002-AA).



FOTO 3.8 ESCARPE DEL DESLIZAMIENTO DT001-AA

3.5.2 PROCESOS MORFODINÁMICOS

La identificación de las unidades geomorfológicas contribuye al entendimiento de los procesos de degradación del terreno. Cada unidad posee rasgos morfológicos particulares que dependen, entre otros, de los procesos denudativos que en ella se desarrollan. Tales rasgos permiten dilucidar el tipo de fenómeno esperado, las causas intrínsecas y extrínsecas (detonantes), y su estado y desarrollo.

Las laderas naturales talladas por los frentes de explotación no sólo se transfiguraron en su morfometría, por el avance de los cortes, por la disposición de los rellenos y por la adecuación de áreas para el desarrollo urbanístico, sino por la mayor predisposición a los agentes de intemperismo, y por la modificación en el patrón de drenaje. Como resultado de la convolución de tales eventos acaecen diversas expresiones morfodinámicas así:

- Meteorización
- Erosión en surcos y cárcavas.
- Procesos de Remoción en Masa: caída de bloques, deslizamientos traslacionales en roca y suelo y deslizamientos rotacionales en suelos.

3.5.2.1 METEORIZACIÓN

Es el conjunto de procesos externos (físico-químicos) que causan la alteración y desintegración de los componentes de las rocas y los suelos. El principal factor de meteorización es de tipo hídrico, ejercido por el flujo del agua de escorrentía a través de la fracturas y de la superficie, desde los sitios de mayor gradiente hidráulico, sobre la pendiente estructural. En el macizo rocoso se lleva a cabo el lavado constante de ciertos minerales en las unidades líticas, así como la concentración de otros, todo esto lleva al cambio de la roca original a suelo residual. El perfil de meteorización se traduce, entonces, en una costra de fragmentos líticos embebidos en matriz arcillosa o arenosa, según sea la unidad de roca dominante, que alcanza espesores diversos: desde los pocos centímetros hasta los dos metros, escenario preferencial para la formación de deslizamientos traslacionales, y flujos de detritos los dos gestados toda vez que se saturaren los horizontes de suelo, especialmente en temporada de lluvia.

3.5.2.2 PROCESOS DE EROSIÓN

Es el grupo de eventos por medio de los que el material rocoso o los suelos son desprendidos y removidos con influencia de agentes externos a lo largo de un eje lineal. La erosión Hídrica es un fenómeno ocasionado por acción de fuerzas hidráulicas, que actúan sobre las partículas del terreno produciendo su desprendimiento, transporte (flujo superficial) y posterior depositación.

El flujo superficial sucede cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración, generándose un excedente de agua en la superficie que corre ladera abajo a lo largo de la máxima pendiente. Los surcos delinean profundidades hasta de 0.10 m, son el resultado combinado de la acción del golpeteo de la lluvia sobre el terreno, y del flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, que forma inicialmente microsurcos de erosión que paulatinamente se transforma en surcos de erosión, dentro de los que se transporta el material. La erosión en cárcavas, es la continuidad de la erosión en surcos, que al profundizarse y ampliarse, se convierten en canales de arrastre (microcanales).

De este amplio abanico de expresiones son dominantes en los cortes (descubiertos) y explanaciones en roca los surcos y las cárcavas, sus huellas reposan en las subunidades geomorfológicas: LEI-tex y LEI-exp, resultado del retrabajamiento de las lluvias (véase el *Plano 5*). De este conjunto el de mayor trascendencia es el carcavamiento en la LEI-exp, su expresión es propia del reforjamiento del drenaje, desaparecido en los años 70 y 80 (*Plano 5*); el zanjón alcanza profundidades hasta de 1.20m y anchos que oscilan entre los pocos

centímetros y el metro, la forma es en V y las paredes alcanzan gradientes cercanos a los 70° y están talladas en los paquetes de arenisca Tpb-A2.

3.5.2.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM)

Aunque poseen poca representativa en la evolución geomorfológica de los frentes de explotación, y sus expresiones hoy por hoy son de amplia trascendencia. Son esencialmente deslizamientos traslacionales en suelo: DT-001AA (*Foto 3.9*), y DT-002AA (*Foto 3.10*), de actividad y desarrollo: activos avanzados; tienen profundidades de hasta 8m, con anchos en la parte media de cuarenta metros: el DT-001AA y veinte metros: el DT-002AA, y longitudes de cincuenta y cuatro y treinta y un metros, respectivamente. Los escarpes principales tocan los ocho (en el DT-001AA) y los tres metros (DT-002AA), y las masas movidas alcanzan los 12.000 m^3, en lo que atañe al primero, y los 1200 m^3 si responde al segundo. Su movilización es facilitada por: la consonancia geométrica entre la estratificación y la pendiente de las laderas, por el manejo inadecuado del drenaje, por saturación parcial y por las altas pendientes topográficas (superiores a los ángulos de fricción básicos del lleno).



FOTO 3.9 PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA DT-001AA

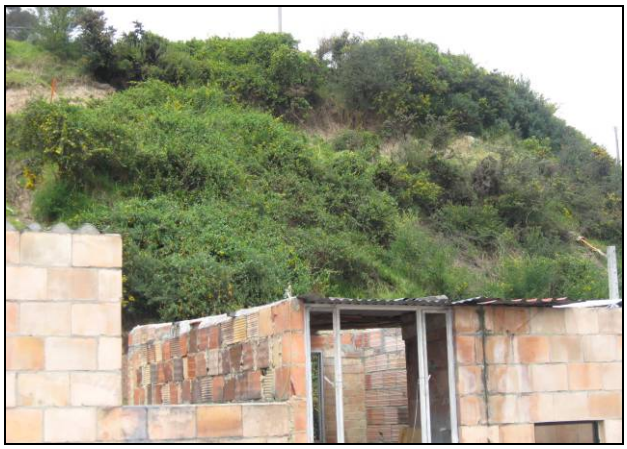


FOTO 3.10 PROCESO DE REMOCIÓN EN MASA DT-002AA

De los dos movimientos el de mayor envergadura (o trascendencia) en el complejo es el DT-001AA, su superficie de deslizamiento reposa en los contactos lleno-roca y lleno-suelo residual, su distancia de viaje bordea los trece metros, y su capacidad de destrucción dio lugar a la pérdida total de nueve viviendas y de treinta metros de muro en cantiliver, y daños indirectos, vinculados a efectos en cadena, en otras nueve edificaciones. Sus primeros signos de actividad datan del segundo semestre de 2007, específicamente de septiembre, fecha en la que se hizo manifiesta la grieta en la cancha de baloncesto (evidencia maquillada por el constructor de la urbanización –información suministrada por algunos residentes-); su evolución aunque paulatina tuvo sus momentos álgidos en diciembre de 2008, y en enero y febrero de 2009 (véase el numeral 1.4 del capítulo 1), circunstancias que lo revelan como un proceso progresivo en el tiempo pero retrogresivo en la distribución (de actividad). La tasa de movimiento (por lo menos en el periodo de ejecución del proyecto) es en el mejor de los casos muy bajo (Varnes, 1978, citado por Cruden y Varnes, 1996), de milímetros por año: la morfología y la morfometría del escarpe, casi invariable en los dos últimos meses, y los registros de los puntos de control en la cabeza del movimiento así lo confirman; velocidad que contrasta con la del primer movimiento (ocurrido el 7 de diciembre de 2008) y la del segundo (registrado en enero de 2009) clasificada entre moderada y rápida (acorde con la escala de Cruden y Varnes, 1996). Si bien su repercusión es incuestionable, su extinción es irremediable hacia el futuro: el uso venidero depende de su tratamiento y estabilización.

El deslizamiento menor (DT-002AA) aunque de imprecisa cronología (pero posiblemente ligado a enero o febrero de 2009), comparte con el DT-001AA la distribución de actividad y la velocidad durante y post detonación. En él al igual que en el DT-001, se conservan latentes los agentes condicionantes, entorno que abre la puerta a replicas, es decir que subraya su carácter retrogresivo, y que deja de manifiesta la posibilidad de extenderse hasta el extremo oriental de las canchas de juego, máxime si se recalca que los llenos allí alcanzan espesores hasta de 6.0 metros y que el contacto depósito-roca es próximo al ángulo de fricción básica del cuerpo antrópico.

El *Plano 5* integra la ubicación espacial de los dos procesos y el *Anexo B.4* y el numeral 1.4 del capítulo 1, resalta detalles adicionales de las causas intrínsecas y extrínsecas, entre otras: la secuencia estratigráfica, las propiedades de los materiales (fijadas con elementos de razonamiento aproximado), la frecuencia del fenómeno, su actividad y desarrollo, y los agentes detonantes y contribuyentes.

3.6 ANTECEDENTES DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA LA ZONA

La morfodinámica en el Barrio se relaciona fundamentalmente con la extracción desordenada y antitécnica de materiales pétreos. Las fotografías aéreas previas a la intervención minera exponen laderas estables, sin evidencias de problemas de remoción en masa. La explotación de materiales de construcción en la Sabana de Bogotá comienza en firme a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, muy vinculada con el crecimiento de la capital. El primer alcantarillado subterráneo, cubierto con bóveda de ladrillo, se construyó en Bogotá hacia el año 1872, pero hasta los años 1920 se construyó con las técnicas mestizas de la albañilería española y la cultura indígena, porque, la mayoría de casas eran de tapia pisada con techos de paja. Luego hicieron su aparición el cemento, el hierro y el vidrio, con lo que el paisaje de la región cambió sustancialmente (Ingeominas, 2002, citado por GIA-Geocing, 2006).

En la Sabana de Bogotá y sus alrededores se explotan diversos materiales de construcción de los cuales se puede mencionar, agregados pétreos (gravas y arenas), recebos, arcillas y rocas ornamentales. Para la

obtención de agregados pétreos (gravas y arenas naturales) se explotan principalmente los conos aluviales del río Tunjuelo (Fm. Río Tunjuelo), pero también se pueden obtener por trituración de la Formación Arenisca Dura. Las Formaciones Arenisca Tierna y Labor son las más empleadas para la extracción de arenas y rocas ornamentales (en todo Usaquén, y anteriormente en Chapinero alto y en los Rosales). Los recebos, se extraen en especial de la Formación Plaeners y las arcillas de las formaciones Bogotá (en San Cristóbal y Mochuelo), Usme (en Santa Librada y Rafael Uribe) y aun de suelos arcillosos: Fm. Tilatá (GIA-Geocing, 2006).

A fe de realizar la descripción de los antecedentes históricos de los procesos denudativos en la Urbanización Buenavista, se recurrió a la consulta e interpretación de aerofotos de los años 50, 70, 80 y 90, registro condensado en la *Tabla 3.2* y en el *Anexo B.3*. La tarea se centró en la ubicación y diagramación de los procesos erosivos y de remoción en masa actuales en fotografías aéreas recientes; y en la esquematización de la acción humana sobre la ladera: cultivos, uso pecuario, extracción de materiales, cortes de taludes para construcción de viviendas, etc (véase el *Anexo B.3*).

3.6.1 AÑO 1955 (VUELO IGAC C-743_9)

La otrora Autopista a Villavicencio, hoy conocida como Carretera a Oriente, está rodeada por frentes de extracción activos; las ladrilleras El Tabor, La Esperanza, Santa Elena y La Cuesta, propietaria de los predios en los que se erige hoy día la urbanización Buenavista, y la Fábrica de Ladrillos La Gidel, integran los frentes las minas a cielo abierto de extracción activa (véase la *Figura 3.1*).

El desarrollo urbanístico es incipiente, sobresalen los trazos de algunas vías interbarriales, todas a nivel de afirmado, y construcciones aisladas; completa el marco de intervención el trazo (línea en rojo) de la conducción Regadera-Vitelma en dirección aproximada E-W; la carretera que conduce al tanque de almacenamiento Los Alpes, y una escueta red de caminos, tallados en las laderas orientales al espacio que ocupará la urbanización.

La morfología es suave y ondulada forjada en secuencias de rocas arcillosas y arenosas, cubiertas por elongados cuerpos coluviales. Sobresale el escarpe rocoso al norte del cuadrángulo de estudio, en lo que es el límite predial entre la urbanización y la ladrillera El Tabor. La diagramación general de la vertiente como sucesión de laderas estructurales es bastante clara, imagen sólo interrumpida por las depresiones de los cuerpos de agua. Los lomos y los filos rocosos (escarpes) trasiegan en sentido N30E, próximos al rumbo de los planos de estratificación.

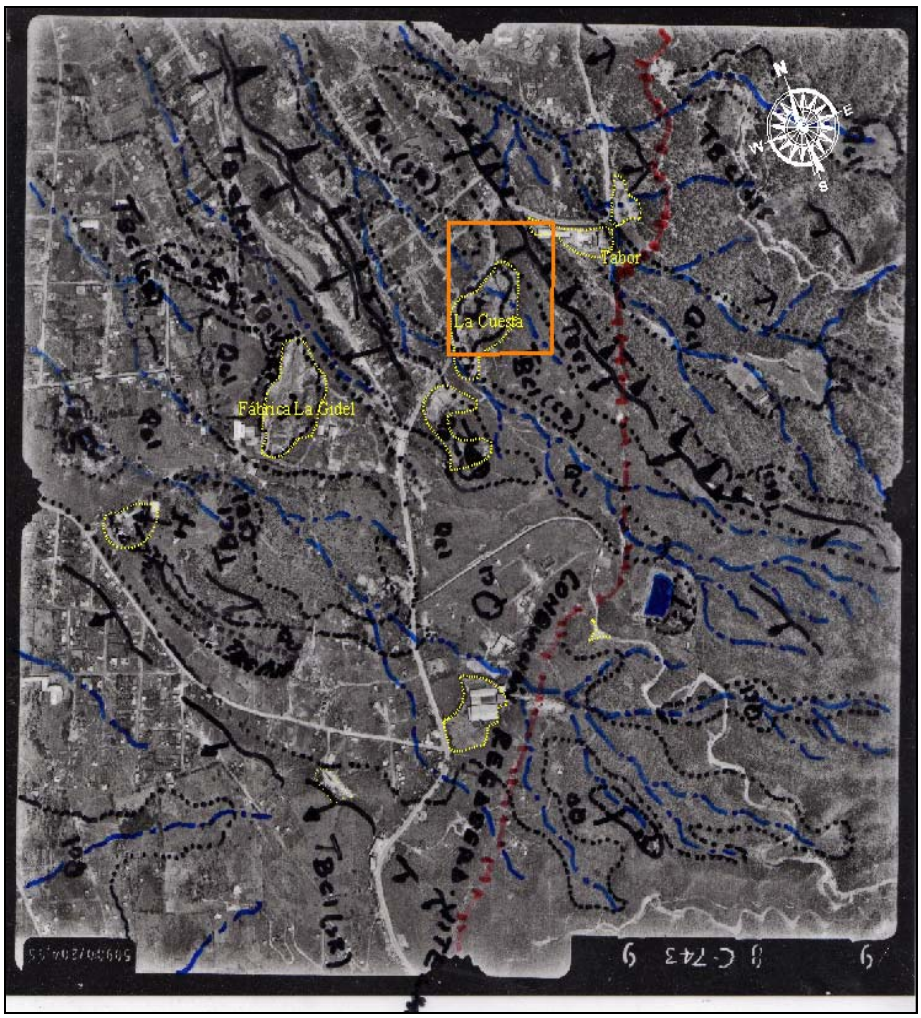
Los procesos morfodinámicos se circunscriben en buen número a los taludes extractivos, en especial los de la fábrica Cidel, incubados por la consonancia entre el rumbo de los cortes y el del plano de estratificación; y al derecho de vía de la conducción Regadera – Vitelma, y a la carretera al tanque, procesos moldeados en llenos antrópicos a media ladera. Empero adquieren mención especial dos cuerpos de deslizamiento: uno gestado al suroccidente de Buena Vista, pero próximo a ella, en aparente reposo (i.e. dormido) y otro al suroriente en el recinto de la microcuenca, sin injerencia en la urbanización. Abanico que remarca el potencial inherente del material a movilizarse.

El patrón de drenaje varía de paralelo a subparalelo, rasgo último dominante en la microcuenca que acoge a Buenavista Suroriental. Las corrientes de agua son de tipo antecedente, ligadas a las líneas de mayor pendiente y al sistema de lineamientos de falla. Los primeros procesos intervencionistas del drenaje tienen

lugar en el recinto en el que se construirá la urbanización; la disección en el curso de agua al norte del predio es el rasgo más dominante.

La frontera minera, en Buenavista suroriental, se aproxima al extremo occidental de las edificaciones, y el proceso de explotación es irregular: los taludes son heteromorfos, con buzamientos variables, y retrabajados por deslaves y desprendimientos locales. En la *Figura 3.1* se esquematizan las apreciaciones reseñadas en los párrafos anteriores.

FIGURA 3.1 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-743_9

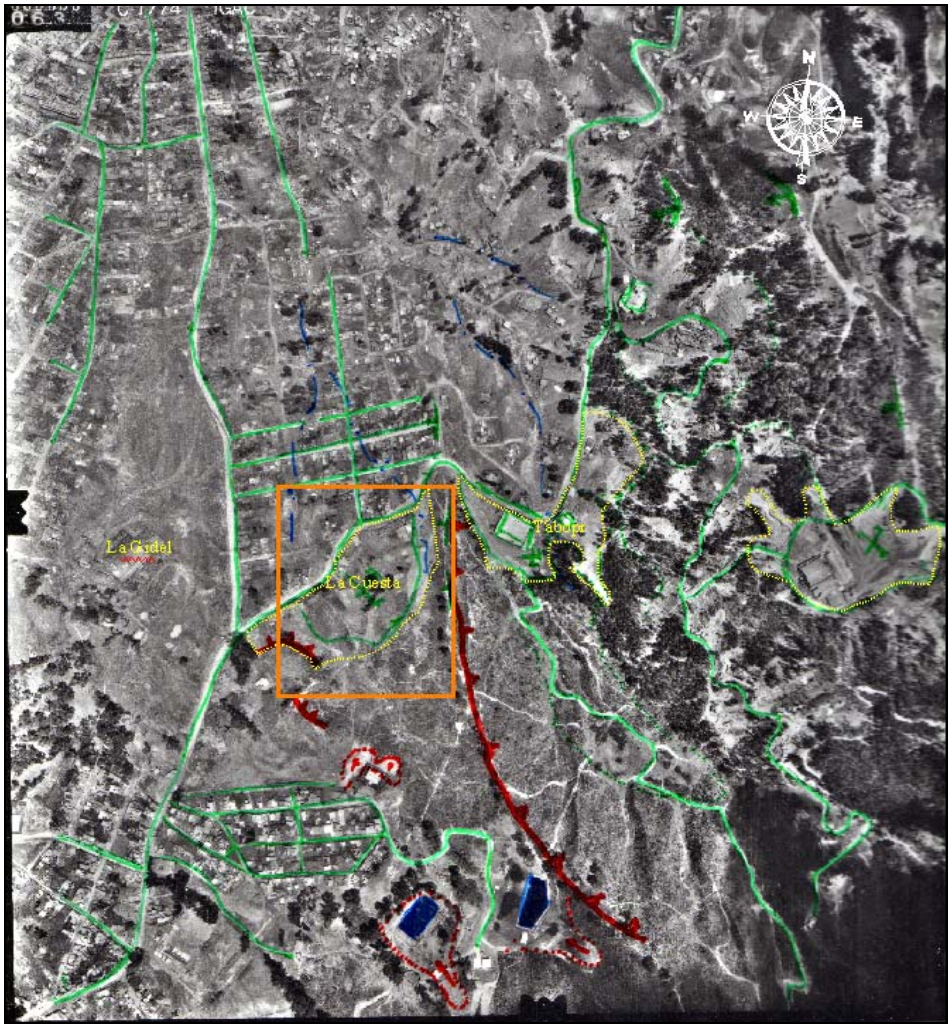


3.6.2 AÑO 1977 (VUELO IGAC C-1774_68)

La actividad extractiva continúa su avance desordenado, calificativo aún más acentuado. Se trabaja con intensidad hacia el oriente, i.e. ladera arriba, y norte de las explotaciones pre-existentes. El crecimiento es notorio en las ladrilleras El Tabor (cimentada al norte de Buenavista, pero contigua a ella), La Cuesta

(industria asentada en los predios ocupados por la urbanización) y en la Fábrica de ladrillos Gidel, esta última remarcada por su desbordante y desordenada ocupación (*Figura 3.2*). En todos los casos los frentes de explotación son irregulares, caracterizados por alternancias de cortes y explanaciones, algunas de formas ovoides, y sin corredores viales definidos. Los procesos de inestabilidad están a la orden del día, los flujos de tierra y los desprendimientos labran los taludes de corte.

FIGURA 3.2 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-1774_68



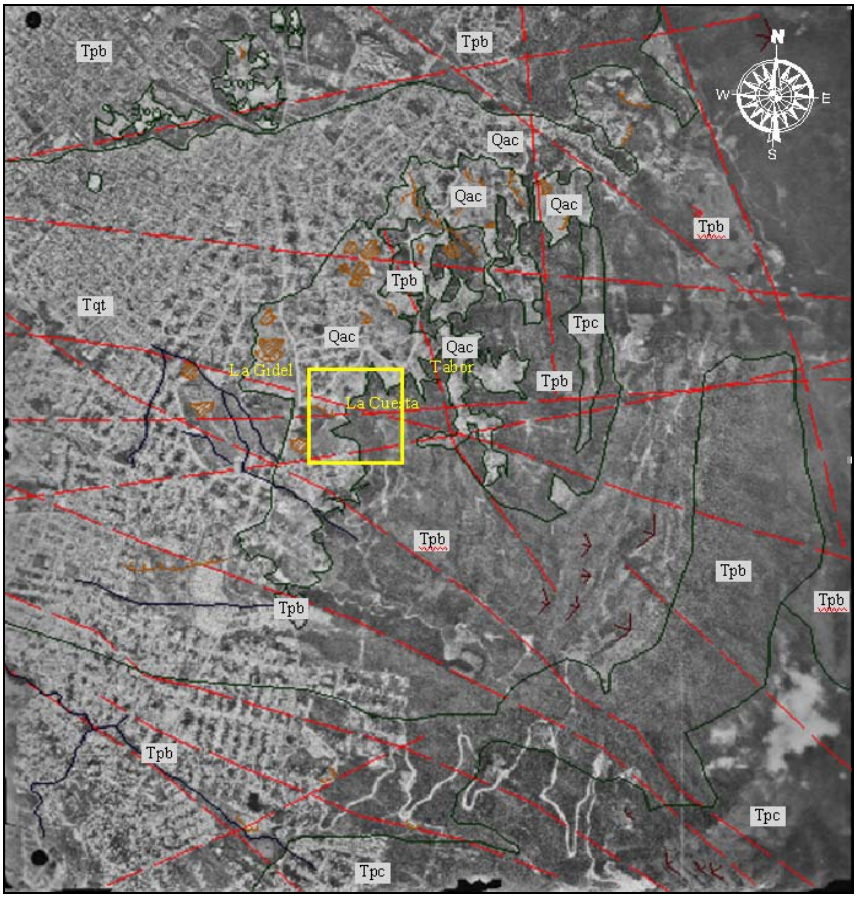
La actividad extractiva en La Cuesta se extiende en un solo frente hasta el espacio hoy día ocupado por las viviendas (véase el *Plano 5*). El pulso depredador ha borrado los cuerpos de agua y en su lugar ha construido algunos reservorios; ha suprimido o enmascarado algunas de las evidencias geológicas; ha alterado la imagen morfológica estructural de la pendiente estructural; y ha dado un vuelco irreversible en el uso del suelo. El patio de explotación crece dramáticamente y aún no hay vestigio alguno de la urbanización.

Hacia el sur de Buenavista (en el recuadro), el desarrollo urbanístico adquiere dinamismo: Los Alpes y San Vicente toman estructura casi completa, y el barrio Ramajal adquiere cuerpo, las viviendas crecen en número y las vías definen mejor las manzanas. Igual suerte acontece al occidente de la fábrica Gidel, aunque con tintes más erráticos que los barrios mencionados. Las conclusiones anteriores y los trazos que las representan quedan patentes en la *Figura 3.2*.

3.6.3 AÑO 1984 (VUELO IGAC C-2128-150)

La expansión urbanística, sin control, reduce al mínimo los predios baldíos alrededor de la Carretera a Oriente. Ramajal, Los Alpes, San Vicente, entre otros barrios alcanzan su máxima expansión y consolidación. La explotación minera (a cielo abierto) restringe su proliferación al norte y sur y se desborda al oriente. En La Cuesta los frentes extractivos cubren buena parte de la plataforma de la III Etapa de Buenavista, y casi la totalidad del lote de las etapas I y II (véase el *Plano 5*, la *Figura 3.3* y el *Anexo B.3*). La explotación permanece errática y desordenada, las bermas están ausentes y los cortes alcanzan alturas superiores a la decena de metros. El procesamiento descrito se plasma en la *Figura 3.3* y en el *Anexo B.3*.

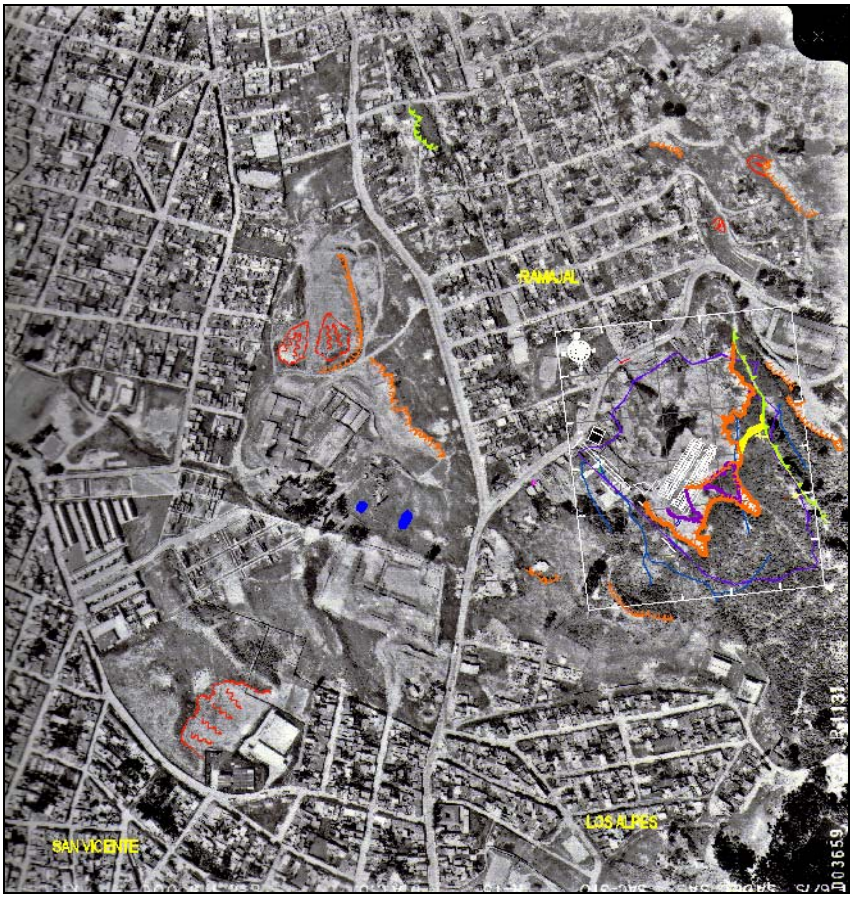
FIGURA 3.3 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-2128_150



3.6.4 AÑO 1991 (VUELO IGAC R-1131-3659)

Las industrias extractivas ceden su papel protagónico a los núcleos urbanos, mayoritariamente erráticos, y carentes de planeación. Sobrevivien vestigios de la ladrillera Guidel, y las fabricas El Tabor y La Cuesta (propietaria inicial de los predios de Buena Vista Suroriental). Los barrios Ramajal, Los Alpes y San Vicente cesan su crecimiento e inician su transformación urbanística (o consolidación), que abarca la pavimentación de las vías, la incorporación de parques, y la estabilización de los espacios neurálgicos.

FIGURA 3.4 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO R-1131_3659



La Cuesta prosigue su acelerada propagación hacia el oriente, al punto de ocupar las canchas de juegos múltiples (específicamente la de microfútbol), el camino de ascenso, y la plataforma destinada para la cuarta etapa de la urbanización. Sólo permanecen incólumes -del avance minero- tres fajas, remarcadas por su cubierta vegetal, la más importante y extensa recorre la esquina noroccidental de la tercera etapa (espacio virgen que se remonta desde la década de los cincuenta). La extracción enfatiza como procedimiento el desconfinamiento en la base y la descarga descendente (diagramado en cortes con ángulos pronunciados), y da pie (i.e. coadyuva) a la formación de dos cuerpos inestables, uno cohabita en el mismo espacio ocupado hoy día por el deslizamiento principal, y otro opera circunvecino a las viviendas 72 a 76. A estos dos signos

morfodinámicos se le suman las cicatrices de dos antiguos procesos, atadas a las laderas al sur, en los extramuros a Buenavista.

Por último, las plataformas industriales (o de proceso) adquieren su punto culminante; las bodegas y los centros de producción, abundantes en número, se consolidan contiguos a la Carretera a Oriente, pero con énfasis en las esquinas noroccidental y suroccidental del espacio de estudio.

3.6.5 AÑO 2002 (FOTO SATELITAL GOOGLE EARTH)

Ilustran la reconformación morfológica post-explotación y el ensanchamiento de la frontera urbana. La actividad minera sede su lugar a las tres etapas de la urbanización, y los últimos vestigios subsisten al norte de Buenavista, en los dominios de la Ladrillera El Tabor, esquema ratificado en la *Figura 3.5*. Los movimientos de tierra son los rasgos característicos; el talud al oriente de las futuras viviendas cobra vida, su conformación es regular y se erige en materiales antropogénicos (hipótesis fijada en el tono oscuro de la imagen), su forma en planta y su perfil son rectilíneos, y su orientación es NE/NW, pero con buzamiento fuerte (superior a los treinta grados), y la cubierta superficial es escasa, tan sólo tienen asiento un pequeño parche de vegetación en la franja media. La superficie libre (i.e el talud) está enmarcada por la terraza, que le servirá de albergue a las canchas de juego, y la vía principal de la antigua ladrillera, estructura que se convertirá en la franja de aislamiento de la urbanización con los predios contiguos a la Carretera a Oriente.

La morfología al occidente es irregular, matizada entre taludes irregulares de altura diversa, un pequeño circuito vial y restos de explanaciones y manchas vegetales. Los procesos de inestabilidad carecen de expresión en superficie, si subsisten yacen en mascarados, en su lugar los procesos de erosión tienen cabida. La red de drenaje brilla por su ausencia. Y el desmantelamiento de las instalaciones de la ladrillera es progresivo, permanecen algunas construcciones menores al occidente del predio, síntesis visible en la *Figura 3.5*.

FIGURA 3.5 IMAGEN GOOGLE EARTH (2002)



3.6.6 AÑOS 2005 Y 2008 (FOTOS SATELITALES GOOGLE EARTH)

La tercera (III) etapa de Buenavista tiene indudable expresión en este periodo, si bien las edificaciones poseen cuerpo cierto y completo, la canchas de baloncesto y microfútbol y la zona de juegos infantiles sólo tienen cabida posterior al 2005 (véanse la *Figura 3.6* y la *Figura 3.7*), diferencia única en la evolución urbanística. Las huellas de inestabilidad son inocuas.

FIGURA 3.6 IMAGEN SATELITAL GOOGLE EARTH (2005)

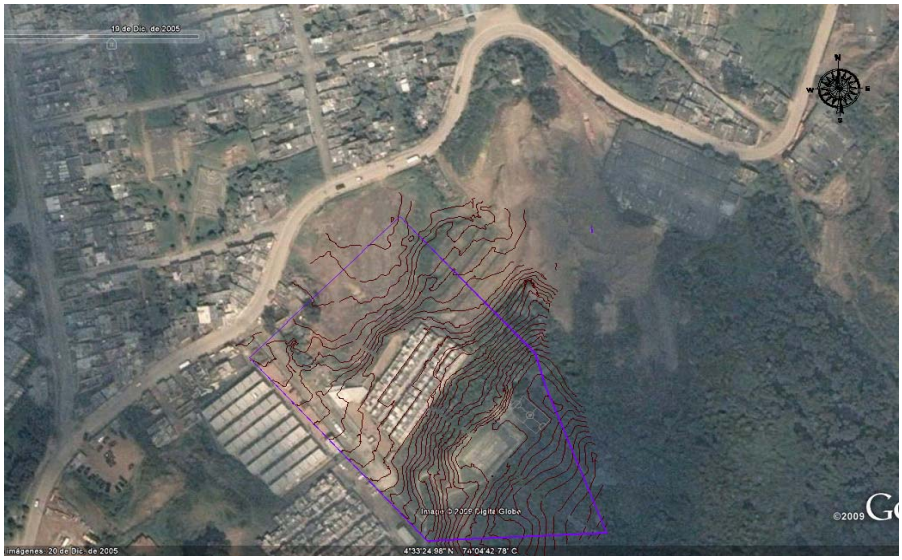


FIGURA 3.7 IMAGEN SATELITAL GOOGLE EARTH (2005)



3.7 HIDROGEOLOGÍA

3.7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Para describir el comportamiento hidrogeológico se utiliza la descripción litoestratigráfica esbozada en el numeral 3.4.1 de este capítulo y la percepción junto con el reconocimiento en campo. El depósito fluviotorrencial y rellenos antrópicos seleccionados Qra3 y de patios Qra2 se comportan como acuíferos los paquetes sedimentarios que lo componen tienen las características petrofísicas pertinentes para poder no sólo almacenar agua sino también trasmitirla con facilidad. Estos acuíferos son del tipo freático, pues el agua que almacena en su interior se encuentra a la presión atmosférica, lo que significa que, cualquier cambio sobre la superficie del terreno afectará el nivel de agua dentro del acuífero, aumentándolo o disminuyéndolo.
Los llenos antrópicos de ladera: Qra1 y los llenos traslocados Qd1 y Qd2, aunque al igual que el fluviotorrencial y los Qra2 y Qra3 son acuíferos freáticos, se diferencian de estos por sus mayores restricciones para transmitir el agua, restricciones soportadas en la matriz arcillosa.

Los acuíferos freáticos son muy lábiles a las condiciones superficiales, así a mayor lluvia los niveles suben y se acercan a la superficie. Una pequeña variación de la presión atmosférica se traduce en un cambio de posición en la freática. Esta eficiencia barométrica es menos importante que la variación que se produce a expensas de la mayor precipitación, pero es pertinente tenerla en cuenta y considerarla, pues ayuda a dilucidar el grado de afectación que poseen los acuíferos a los cambios externos.

Las rocas de la formación Bogotá desempeñan el rol de acuitardos, ellas tienen capacidad de almacenar agua pero no pueden cederla con facilidad. Este es un comportamiento típico para formaciones compuestas por limos y arcillas. Los bancos de areniscas, pueden comportarse como acuíferos, pero confinados, dado que se encuentran sometidos a la presión que le ejercen las unidades suprayacentes. El compendio de las características hidrogeológicas para las unidades litológicas circunscritas en la propiedad de la urbanización se expresa en la *Tabla 3.3*.

3.7.2 RELEVAMIENTO DE PUNTOS DE AGUA

Durante el reconocimiento de campo, se realizó un censo de puntos de agua (perforaciones, pozos de bombeo, manantiales, etc.) en el predio y áreas circunvecinas. De él no se identificaron pozos de bombeo ni freatímetros, en su lugar se halla un cauce en formación al norte de la propiedad próximo al corredor ocupado por el paleodrenaje (véase el plano 5 y los numerales 3.6.1 y 3.6.2 de este capítulo)en el que la tabla de agua es estrictamente estacional, y por consiguiente variable, la respuesta del nivel freático (o de la cabeza de presión) en los sondeos tomados durante la exploración del subsuelo, y el piezómetro instalado en el sondeo S-1, que funge como freatímetro. Unos y otro fijan la tabla de agua aproximadamente a 2m de profundidad respecto de la superficie del terreno.

3.7.3 MOVIMIENTO DEL AGUA

Se define con base en las líneas de flujo subterráneo, que no son más que los trazos perpendiculares a las freatimétricas. El flujo superficial (en apariencia) descarga en las plataformas intermedias, receptora de las viviendas, e inferior, surcada por la carretera al Oriente.

El movimiento del agua, se hace a favor de la pendiente topográfica e sentido NW y W para las laderas sur, NW y N en las superficies libres del norte y nororiente parcialmente condicionado por la memoria hidrogeológica de los antiguos cursos de agua extintos en la década de los 70 (véase el numeral 3.6.2). Los nichos de recarga del acuífero involucran los frentes más altos y los de descarga los más bajos. Prueba de ello es la recurrente infiltración en los apiques AP-2, AP-3, AP-9, AP-8 y AP-5.

Todo lo anterior permite suponer que los estados de trabajo extremos máximos de los llenos antrópicos: involucran bien su saturación, es decir, el nivel freático en superficie, en especial en la masa principal movilizada (Qdi) y en los horizontes en los que se cimientan las viviendas 88 a 96, 63 a 71, y 39 a 46, receptores del paleodrenaje; y los mínimos bien a 2 metros bajo la línea actual del terreno (véanse las perforaciones S1, S2 y S3) o bien seco. Este último escenario deducido de la respuesta en las trincheras TA-2, TA-3, y en los apiques AP-6, AP-7, AP-4 y AP-1, en los que la tabla de agua está ausente.

TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

NOMBRE		DESCRIPCIÓN	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO
DEPÓSITO FLUVIOTORRENCIAL (QFT),		ES MATRIZ SOPORTADO, SU MATRIZ ES ARCILLOSA Y VARÍA A ARCILLO-ARENOSA Y ARCILLO LIMOSA, ES DE CONSISTENCIA DURA Y CONSOLIDACIÓN ALTA. LA PERMEABILIDAD ES BAJA. SU ESPESOR ALCANZA LOS 11,50 METROS.	ACUÍFERO FREÁTICO.
RELLENOS ANTRÓPICOS QRA1, QRA2, QRA3 Y QRA4		INVOLUCRAN PARTÍCULAS HASTA TAMAÑO BLOQUES DE ARENISCAS Y LODOLITAS, ESCOMBROS Y RESIDUOS SÓLIDOS EMBEBIDOS EN MATRIZ ARCILLOSA DE CONSISTENCIA MEDIA. SUS ESPESORES OSCILAN ENTRE EL METRO Y LOS 10 METROS.	ACUITARDOS
RELLENOS ANTRÓPICOS QD1 Y QD2			
FORMACIÓN BOGOTÁ	TPB-L1, TPB-L2, TPB-L3 Y TPB-L4	ESTÁ CONSTITUIDO POR UNA SERIE DE ARCILLOSITAS Y LODOLITAS ABIGARRADAS DE APARIENCIA BIOTURBADA QUE ALTERNAN CON ARENISCAS DE CEMENTO ARCILLOSO. SU ESPESOR PUEDE ALCANZAR 20 METROS.	ACUITARDOS
	TPB-A1, TPB-A2 Y TPB-A3	ARENISCAS CUARZOSAS DE COLOR BLANCO, BLANCO AMARILLENTO Y AMARILLO, CEMENTO ARCILLOSO DE HASTA 10 METROS DE ESPESOR, ENTRE ESTOS SUBNIVELES YACEN LODOLITAS DE COLOR VIOLETA.	ACUÍFEROS CONFINADOS O SEMICONFINADOS

3.8 AMENAZA SÍSMICA

3.8.1 FUENTES SISMOGÉNICAS

El desarrollo de este numeral y la cuantificación de la amenaza sísmica se fundan, exclusivamente, en información secundaria, es decir en estudios regionales y locales que involucran el distrito capital. Información consolidada a continuación:

Estudio General de Amenaza Sísmica (AIS – Ingeominas – Uniandes, 1996)

Este documento, incorporado a la norma NSR-98, califica la amenaza sísmica de Bogotá, idealizándola como un punto. Enmarca a la ciudad capital en la región 5, catalogada como de Amenaza Sísmica Intermedia, y le fija como aceleración máxima horizontal a nivel de roca, Aa, 0.20g, para eventos con periodos de retorno de

475 años. La *Tabla 3.4* condensa y discrimina las fuentes simogénicas relevantes consideradas por la AIS (1996), su tipo de evento y su aporte a la amenaza.

TABLA 3.4 FUENTES SISMOGÉNICAS PARA AMENAZA SÍSMICA EN BOGOTÁ

NOMBRE DE FUENTE ACTIVA	CARÁCTER DEL EVENTO	APORTE A LA AMENAZA
FRONTAL CORDILLERA ORIENTAL	INTRAPLACA	67.60%
SALINAS	INTRAPLACA	27.70%
OTRAS FALLAS	INTRAPLACA E INTERPLACA	4.70%

Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas – Uniandes, 1997)

Define cinco zonas de comportamiento homogéneo en el Distrito capital, caracterizadas por parámetros sísmicos y espectros de respuesta, es decir especifica las aceleraciones pico efectiva Ag y la mínima Ad, con sus períodos de retorno y recurrencia, útiles para el diseño y construcción de líneas vitales. Tales zonas y sus parámetros hacen parte de la Norma de Construcciones Sismorresistentes de la Ciudad.

Acorde con el estudio el universo espacial al que pertenece la Urbanización Buenavista es la Zona 1 – Cerros, y su aceleración pico es 0.24g para un período de retorno de 475 años. De las secciones de análisis se abstrajo por similitud morfológica, que la aceleración máxima en roca utilizada en los análisis pseudos estáticos es equivalente a la aceleración pico.

3.8.2 CUALIFICACIÓN DE AMENAZA LOCAL

Con base en los estudios mencionados para Buenavista se tienen tres sistemas sismogénicos principales:

Fuente Local

Responde a un evento en el dominio del Campo Cercano proveniente de alguna de las fallas que trasiegan al suroriente de la ciudad como son las Fallas de: Bogotá, San Cristóbal, Ruque, Alto del Cabo y Yerbabuena, circunscritas en un radio de acción de 15 Km alrededor de la urbanización, con foco de poca profundidad y Magnitud máxima probable, Ms, entre 6.0 y 6.5. La aceleración máxima horizontal a nivel de roca es de 0.24g. Los acelerogramas típicos esperados son de corta duración y su periodo fundamental pequeño: T<0.30 seg.

Fuente Intermedia

Involucra eventos sísmicos generados por el Sistema de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, también denominado sistema de Guaicaramo, a una distancia de 60 Km. Su profundidad oscila entre los 15 Km y los 60 Km. Esta fuente contribuye con el 67.6% de la amenaza sísmica para el campo intermedio y sus eventos tienen una magnitud máxima probable, Ms, de 7.5; la aceleración máxima horizontal esperada en roca es de 0.20g.

Fuente Lejana

Designa a los eventos producidos en la Zona de Subducción del Pacífico, a una distancia entre 350 Km y 400 Km de Buenavista Oriental y con una aceleración horizontal en roca de 0.04g.

3.8.3 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO

Si bien los modelos de respuesta de sitio que se esbozan en adelante son a todas luces una simplificación gruesa, pues implican exclusivamente la mayoración (cualitativa) del coeficiente de aceleración horizontal en roca en función del tipo de material y de su espesor, y del escenario de aceleración máxima horizontal, i.e. de la fuente sismogénica, no se ignora que el desarrollo riguroso del tema implica: a) la definición de los acelerogramas típicos para cada fuente sismogénica, b) la determinación de los parámetros estáticos y dinámicos de las unidades de suelo y roca, i.e. relación de poisson, velocidad de corte y Módulo de corte máximo, Gmax, y las curvas de amortiguamiento por material, entre otros, y c) la modelación; tal procedimiento está fuera de los alcances del estudio.

Bajo este panorama, los factores de amplificación, Fv y Fa, son tomados de fuentes secundarias: bien de Medvedev, 1965, o bien del NSR, 1998. En el primer caso Fv se asume igual a la unidad y Fa es una constante que toma valores entre 0.10 y 3.90, según el perfil lo domine rocas duras o depósitos antrópicos, respectivamente. La discriminación del conjunto de coeficientes se ilustra en la *Tabla 3.5*.

TABLA 3.5 FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO (MEDVEDEV, 1965)

NO	GRUPO DE ROCAS	SUELO TIPO NSR-98	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN, FA
1	ROCAS DURAS	A	0.1 - 0.8
2	ROCAS ALTERADAS	B	0.7 - 1.1
3	DEPÓSITOS GRANULARES NO COHESIVOS: BLOQUES, GRAVAS, ARENAS.	C	0.9 - 1.5
			1.2 - 1.8
4	DEPÓSITOS BLANDOS COHESIVOS: ARCILLAS, LIMOS.	D	1.2 - 1.6
			1.3 - 1.8
5	ANTRÓPICOS: ESCOMBRERAS, SUELOS ORGÁNICOS.	E	2.3 - 2.6
			2.6 - 3.0
6	DEPÓSITOS SATURADOS: BLOQUES, GRAVAS, ARENOSOS, ARCILLOSOS ANTRÓPICOS.	F	1.6 - 2.0
			2.0 - 2.4
			2.4 - 2.8
			3.3 - 3.9

Si la herramienta técnica recae en el NSR, es pertinente el tratamiento de los siguientes elementos básicos: a) el periodo fundamental de la fuente sismogénica; b) el perfil típico en la ladera; c) los coeficientes de amplificación: Fa y Fv según el periodo de análisis, y d) el espectro de diseño, así:
Fuente Sismogénica:

Si es local el periodo de vibración fundamental es inferior a 0.30 seg, registro extraído del acelerograma de Loma Prieta – Corralitos (1989); y si es frontal o lejana el periodo oscila entre 0.90 seg y 1.0 seg, el primero tomado del sismo de México (1985 – Fuente lejana) y el segundo del de Riviera.

Perfil Típico:

Está constituido casi en esencia por módulos cuaternarios, Qft, Qra1, Qra2, Qra3, Qd1 y Qd2 y de suelo residual, en caso alguno con espesor superior a 12 metros, que descansan, espacialmente, sobre potentes bancos de lodolitas o arcillolitas, lo que indefectiblemente los clasifica dentro de perfiles Tipo B o D (véase la Tabla H-1-1 de la NSR,1998). La secuencia indiferenciada se describe a continuación:

- Depósitos fluviotorrencial (Qft): Agrupan suelos arcillosos, en ocasiones con fragmentos pétreos de gran tamaño, con espesores menores al metro, ubicados indiferentemente en laderas inclinadas.

- Depósitos antrópicos (Qra1, Qra2, Qra3, Qd1 y Qd2): Son masas heterogéneas, que aglutinan bloques y cantos de areniscas, lodolitas y elementos cerámicos, y residuos sólidos (plásticos, zapatos, etc) en una matriz arcillosa. Los espesores típicos trasiegan desde los 6 metros hasta los 10 metros.

- Suelos residuales (Tpb-Lsr y Tpb-Asr): entrelaza suelos arcillosos a areno-arcillosos, con fragmentos arcillosos. Espacialmente subyace a los cuerpos fluviotorrenciales y antrópicos. En general su espesor es inferior a los 2 m y yacen con ángulos próximos a los veinticinco grados.

- Formación Bogotá: está marcada por secuencias de areniscas cuarzosas, con matriz arcillosa, de cementación moderada, lodolitas y arcillolitas están dispuestas en capas gruesas y muy gruesas (de 14 a 20 metros de espesor, de acuerdo con los sondeos y la columna estratigráfica levantada) y configuran bancos hasta de 60 m (extraído de la secuencia en los dos primeros niveles).

Los Coeficientes de Amplificación, Fa y Fv

Hacen referencia a los valores fijados en las figuras H-1-3 y H-1-4 de la NSR (1998). Acorde con los perfiles referidos atrás los coeficientes son:

- Fa = Fv = 1.0, si se trata del perfil tipo B, y
- Fa = 1.20 o 1.70 y Fv = 1.60 a 2.0, en lo que atañe al Perfil Tipo D, según el coeficiente de aceleración máximo sea de 0.24g o 0.20g, respectivamente.

Espectro de Diseño

Como el periodo fundamental de los sismos de referencia es próximo al segundo, se adopta como espectro fundamental:

$$Sa = 1.20*Aa*Fv*I/T$$

donde:

Aa: es la aceleración máxima horizontal en roca
Fv: Coeficiente de amplificación tomado de la Tabla H-1-4 (NSR,1998)

I: Coeficiente de importancia, equivalente a uno.
T: periodo del sismo, en este caso 1 segundo.

De la conjunción de las variables anteriores, para uno u otro procedimiento (o fuente técnica), las aceleraciones a nivel de superficie oscilan entre 0.24g y 0.50g. El primer coeficiente toda vez que la secuencia sea exclusivamente rocosa, y el segundo en el irrestricto escenario del Cuaternario: llenos traslocados o fluviotorrenciales. La *Tabla 3.6* agrupa las aceleraciones máximas en superficie y las aceleraciones para diseño que se adoptan al amparo de este proyecto. Este tema será retomado en el capítulo 6 "Análisis de Estabilidad y Evaluación de Amenaza".

TABLA 3.6 ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE Y DE DISEÑO

MATERIAL	TIPO DE SUELO NSR-98	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN			ACELERACIÓN EN SUPERFICIES SA		ACELERACIÓN DE DISEÑO
		MEDVEDEV	NSR - 1998		MEDVEDEV (1965)	NSR (1998)	
		FA	FA	FV			2/3 *SA
QFT	D	1.20 A 1.60 (SE ADOPTA 1.40)	1.2	1.8	0.349 G	0.518 G	0.22 G
QRA1							
QRA2							
QRA3							
QD1							
QD2							
TPB-LSR							
TPB-A	B	0.7 - 1.10 (SE ADOPTA 1.0)	1.1	1.6	0.24 G	0.460 G	0.16 G
TPB-B	B	0.7 - 1.10 (SE ADOPTA 1.0)	1	1	0.24 G	0.24 G	0.16 G

REFERENCIAS

- BRAVO L. ÁLVARO C. (2008) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3944, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTO 95599. BOGOTÁ D.C.
- CARO PEÑA, PABLO ENRIQUE. 1986. CONVENIO 200-86, DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN DEL DISTRITO ESPECIAL DE BOGOTÁ.
- DE PORTA J.(1974) "LÉXICO ESTRATIGRÁFICO". CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. PARÍS.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2009A) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3996, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTO 96939 – EMERGENCIA 2610. BOGOTÁ D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2009B) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3991, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTOS 95992, 96633 Y 96851. BOGOTÁ D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2008A) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3848, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTOS 91103,94051 Y 94080. BOGOTÁ D.C.
- HEWITT V. VÍCTOR M. (2008B) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3882, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTO 94913. BOGOTÁ D.C.
- HIDROGEOLOGÍA Y GEOTECNIA LTDA (2000). "ESTUDIO DE ZONIFICACIÓN DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA EN LOS BARRIOS TRIÁNGULO, TRIÁNGULO ALTO Y CORINTO DE LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL, SANTA FE DE BOGOTÁ D. C". FOPAE-DPAE. SANTA FE DE BOGOTÁ.

- GIA LTDA Y GEOCING LTDA. (2006). "ESTUDIO DE RIESGOS POR REMOCIÓN EN MASA, EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN Y DISEÑOS DETALLADOS DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN EN LOS BARRIOS EL CODITO, MIRADOR DEL NORTE, Y VILLA NIDIA DE LA LOCALIDAD DE USAQUÉN". DPAE. BOGOTÁ D. C.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO LUIS I Y OTROS (2004). "INGENIERÍA GEOLÓGICA". PEARSON PRENTICE HALL. MADRID.
- GUTIÉRREZ & COLEGIAL (1987). GEOLOGÍA Y ASPECTOS GEOTÉCNICOS DE LA PARTE CENTRAL DEL SECTOR DENOMINADO "CIUDAD BOLÍVAR" EN EL DISTRITO ESPECIAL DE BOGOTÁ. TRABAJO DE GRADO. DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- IFCAYA (1988). "ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO DE ALGUNOS SITIOS CRÍTICOS EN LOS BARRIOS GRAN COLOMBIA, TRIÁNGULO, CORINTO Y RAMAJAL". ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ, SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS. DIVISIÓN DE ESTUDIO. BOGOTÁ D. E.
- INGEOCIM LTDA.-UPES–FOPAE (1998). "ZONIFICACIÓN POR INESTABILIDAD DEL TERRENO PARA DIFERENTES LOCALIDADES EN LA CIUDAD DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ D. C." MAPA GEOLÓGICO. BOGOTÁ D.C.
- INGEOMINAS (2003). "ASPECTOS GEOAMBIENTALES DE LA SABANA DE BOGOTÁ". INGEOMINAS. BOGOTÁ D. C.
- INGEOMINAS – UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (1997). "MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTA FE DE BOGOTÁ". CONVENIO INTERADMINISTRATIVO 01-93. SANTA FE DE BOGOTÁ D. E.
- JULIVERT, M. (1968). "LEXIQUE ESTRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE". VOL. V FASC. 4ª. PARIS.
- JULIVERT, M. (1961). OBSERVACIONES SOBRE EL CUATERNARIO DE LA SABANA DE BOGOTÁ. BOLETÍN DE GEOLOGÍA NO. 7:5-36, BUCARAMANGA.
- PÉREZ HERNANDO (2007). "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3460, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA, BOGOTÁ D.C.
- REYES G. JOSÉ L. (2005) "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3996, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA, BOGOTÁ D.C.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (2006). "DIAGNÓSTICO GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL DE 11 (ONCE) PROYECTOS DE VIVIENDA DE LA CAJA DE VIVIENDA POPULAR". INFORME FINAL. TOMO 8. URBANIZACIÓN: BUENAVISTA ORIENTAL III ETAPA. ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTA. CAJA DE VIVIENDA POPULAR. BOGOTÁ D. C.
- VAN DER HAMMEN, T. (1955). "PLIOCENO Y PLEISTOCENO DEL ALTIPLANO DE BOGOTÁ Y ALREDEDORES". ANÁLISIS GEOGRÁFICOS NO. 24. PUBLICACIÓN IGAC. BOGOTÁ.
- VAN DER HAMEN, T. (1995). "MEMORIA EXPLICATIVA DE LOS MAPAS DEL NEÓGENO Y CUATERNARIO DE LA SABANA DE BOGOTÁ". REVISTA ANÁLISIS GEOGRÁFICOS NO. 24. IGAC. BOGOTÁ.
- VAN ZUIDAM, R. (1985). "AERIAL PHOTO-INTERPRETATTION IN TERRAIN ANALYSIS AND GEOMORFHOLOGIC MAPPING". INTERNATIONAL INSTITUTE FOR AEROSPACE SURVEY AND EARTH SCIENCES (ITC). NETHERLANDS.
- VILLAMIL V. TULIO I. (2008). "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-3633, BARRIO BUENAVISTA ORIENTAL". DPAE, COORDINACIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA. EVENTO 86303. BOGOTÁ D.C.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO GEOTÉCNICO

CAPÍTULO 4

ESTUDIO GEOTÉCNICO

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

4.1 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO

4.1.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

4.1.1.1 MÉTODO DE TRABAJO

Tan compleja y amplia como la imagen hoy día revelada por los deslizamientos en Buenavista Oriental III Etapa, es el acervo de interrogantes que envuelven su formación. Acervo que justifica el programa de exploración y que deja en evidencia sus pretensiones. Propósitos que involucraron: a) reconocer y describir, o en el peor escenario idealizar, más allá de lo evidente, la cobertura espacial (en extensión superficial y profundidad) y el papel del cuaternario y de las actividades antrópicas precedentes (se destaca que el corredor hizo parte de un antiguo chircal) en el comportamiento reciente de las unidades de ladera y de las edificaciones (i.e de las viviendas); b) dilucidar la participación (rol) del macizo rocoso y de los planos de discontinuidad, específicamente de la estratificación, en la gestación de las masas inestables: Buenavista III Etapa descansa en una ladera estructural; c) validar o replantear el patrón estructural y su función en la porción de la vertiente (receptora de la Urbanización), es decir en el comportamiento de los materiales y en la estabilidad de las superficies libres; las fuentes secundarias, entre ellas Ingeocim (1998), destacan la limpieza estructural, premisa que para GIA se antoja errática, más aún por la proximidad de la falla de Bogotá; d) deducir la posición de la superficie de deslizamiento y de la tabla de agua o de la cabeza de presión, elementos trascendentes para el retroanálisis y para el estudio de la posibilidad de progresión o retrogresión del movimiento; y e) facilitar y coadyuvar en la exploración geológica.

En este sentido y a fe de dar respuesta a tan generoso abanico de preguntas, el programa de investigación del subsuelo se define con base en las facilidades y limitaciones otorgadas por la zona de estudio, traducidas en el escaso número y extensión de los cortes o frentes expuestos, y se soporta en la hipótesis de que morfoestructuralmente Buena Vista Oriental III Etapa descansa en una ladera estructural, sin traslocaciones, aunque con algunos cambios en el azimut de buzamiento (inferiores a los treinta grados) Los sitios para la

realización de las labores de exploración se seleccionaron cuidadosamente, y buscaron la mayor calidad en la información. El panorama descrito reveló la necesidad de emplear como bastión los métodos directos y de diagramar un plan de acción por etapas. Su máxima utilidad surtir del mayor número de elementos de juicio a los contextos geológico y geotécnico.

Los métodos indirectos como la refracción sísmica y los sondeos geoeléctricos verticales (SEV) se descartaron como herramienta de apoyo, puesto que: las expresiones morfométricas son escarpadas; la secuencia litoestratigráfica, es homogénea en todos los frentes de explotación (afloramientos); las variaciones estructurales brillan por su ausencia; el dominio espacial está gobernado por los espesos depósitos antrópicos de matriz arcillosa y las lodolitas y arcillolitas de la Formación Bogotá. La síntesis del conjunto de información se consolidó en resúmenes gráficos que facilitaron la caracterización de los materiales y su comprensión mediante secciones de análisis geológico-geotécnicas.

4.1.1.2 MÉTODOS DIRECTOS

La exploración se abordo en tres etapas. La primera está dirigida a la identificación y descripción básica de la secuencia estratigráfica y por ende a la ubicación y a la detección de la continuidad lateral y longitudinal de los horizontes de roca y suelo, y a la deducción de flujos locales de agua que puedan incidir en la actividad de las masas potenciales. Está solventada mediante la toma de una columna estratigráfica y cinco (5) trincheras; el levantamiento de datos estructurales; la ejecución de cinco (5) apiques, uno en el trasdós del escarpe principal del deslizamiento: el AP-1, y los restantes distribuidos alrededor de las viviendas (nomenclados desde el AP-2 hasta el AP-5); y el inventario de procesos.

La columna se destina y entrelaza las exposiciones del macizo rocoso a fe de: dilucidar el arreglo estratigráfico general, facilitar la toma de datos estructurales, abstraer evidencias cinemáticas de fallamiento (p.e. orientación de planos o estrías de falla), reconocer el estado del material y del macizo rocoso (para su clasificación) y tomar muestras inalteradas (exclusivamente de bloques); se efectúa perpendicular al rumbo de los estratos y en arreglo de oriente a occidente (condicionamiento fijado por el escenario de trabajo), de manera tal que se tuviera la mayor cobertura del orden litológico y el mejor barrido del patrón estructural.

Las trincheras se circunscriben a los límites norte y occidental del predio, tres (3) en el primero y dos (2) en el segundo. Y los apiques recorren el espacio edificado y el baldío occidental confinado por la malla de cerramiento. Los levantamientos estructurales, resumidos en 125 registros, se concentran en la toma de los datos representativos de las familias de discontinuidades en las exposiciones del macizo rocoso –es decir en los escarpes al norte de la urbanización. Tales datos incluyen entre otros por menores, información sobre las tendencias generales de orientación: azimut de buzamiento y buzamiento, y las características físicas como: abertura, espaciamiento, rugosidad y persistencia.

La segunda fase está basada en cuatro (4) sondeos mecánicos, apodados como S-1, S-2, S-3 y S-4, con avance bien de percusión y lavado o bien de rotación, dispuestos a lo largo de los ejes de deslizamiento, en el cuerpo principal el S-1 y el S-2, y por fuera, pero contiguo a él (en el cuerpo del segundo deslizamiento) los otros dos (el S-3 y el S-4), y cuatro (4) apiques, designados como AP-6, AP-7, AP-8 y AP-9. Sus intenciones: relacionar las capas guías, es decir concluir sobre la continuidad longitudinal (NE-SW) de la secuencia litoestratigráfica; deducir los cambios en la polaridad (premisa difícilmente validada) de los planos de estratificación; dilucidar la continuidad de las tendencias de falla -en especial las de rumbo-, hipótesis que perdió todo asidero; confirmar los espesores del cuaternario y las posiciones de la superficie de deslizamiento

y de la tabla de agua, tarea última solventada gracias a la instalación de un par de inclinómetros-piezómetros abiertos; y corroborar la calidad y tipo de la cimentación de las viviendas y del muro de contención, requerimiento que recayó, exclusivamente, en los apiques. Su ubicación planimétrica y altimétrica se abstrajo de un análisis de sensibilidad en el que se tomó como variable relevante el buzamiento de los planos de estratificación y se fijaron como puntos de partida los niveles estratigráficos de la primera y la segunda perforación (entendidos éstos como condiciones y elementos de borde).

Aunque este análisis, en principio, despreció los saltos, probables pero jamás comprobados, provenientes de las fracturas, v.g las fallas de rumbo, tuvo sus mayores réditos en la interpretación final, puesto que se desestimo cualquier corrección estratigráfica importante. Beneficio recibido gracias a la homogénea disposición del plano de estratificación: los traslapos en los extremos de las perforaciones y la consistencia estadística de los registros estructurales así lo confirman.

La tercera etapa encierra la participación de ocho sondeos mecánicos (bautizados como: S-5, S-6, S-7, S-8, S-9, S-10, S-11 y S-12). Con estos elementos se pretendió completar los puntos ciegos dejados por los trabajos de las etapas previas, completar la secuencia estratigráfica alrededor de los módulos de las viviendas más deterioradas (16 a 23 y 39 a 46), y redondear la investigación sobre el modelo estructural, i.e las fracturas. Se destino casi exclusivamente a los cuerpos antrópicos que diagraman el relieve al oriente, i.e. en los espacios recreativos, y al norte, propio de la cuarta etapa de la urbanización; uno y otro de trascendencia por su repercusión en los transeúntes y semovientes.

Así las cosas, el trabajo de exploración deja entrever que la secuencia estratigráfica es normal y heterogénea; enmarca variaciones laterales asociadas con el ambiente de depositación, con alternancia en el crecimiento del grano y del grado de litificación; sin dislocaciones ligadas a trazas o brechas de falla; y con disposiciones multicapa, configuradas en bancos espesos de arcillolitas (de hasta 20 m de talle, baste con señalar la Tpb-L1) y niveles, poco más o menos, de 4 m de areniscas (v.g la Tpb-A2), entrelazados en sucesiones de estratificación gruesa bien de grano fino o bien de grano medio, irregularmente cubiertos por rellenos antrópicos, que alcanzan, medida cuenta, los 10 m de espesor, suelos residuales delgados (inferiores al metro de espesor) y discontinuos, y depósitos fluviotorrenciales que en caso alguno superan el metro de talla, restringidos al la divisoria de aguas (diagramados al oriente del polígono de estudio, véase el *Plano 4*) del antiguo cuerpo de aguas, hoy desaparecido, y que en adelante se denominara Quebrada Buenavista.

Los paquetes lodolíticos (o arcillolíticos) recorren la secuencia a profundidades variables, y sobrellevan parte de la responsabilidad en la generación de los deslizamientos, debido a la configuración geométrica del patrón estructural, en clara consonancia con la de la ladera (propios de una pendiente estructural), al estado de esfuerzos presente, a la alta posibilidad de alteración del material rocoso, y a su marcada exposición y comparecencia en las superficies libres. Cabe reseñar que en las unidades de investigación: apiques, trincheras y columnas, no se detectó el nivel freático, pero en ellas como en los cortes libres son recurrentes las emanaciones o vertimientos de agua en las caras expuestas; particularidad que ligada al reporte de la tabla de agua en las perforaciones S-1 y S-2, fijada a los 2.00 metros de profundidad, indican que el patrón hidrogeológico puede estar ligado a la variación estacional de las lluvias, aunque matizado por una posición superficial de la tabla de agua.

En el *Plano 4* se muestra la distribución en planta de las trincheras, los sondeos, las columnas, los apiques y los afloramientos superpuesta a la geología de superficie y en el *Anexo C.1* se disponen los registros obtenidos representados en forma gráfica. De igual manera, en la *Tabla 4.1* se citan las coordenadas y profundidades de los sondeos ejecutados, y en la *Tabla 4.2* la descripción de los horizontes detectados.

TABLA 4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE EXPLORACIÓN DIRECTA DEL SUBSUELO

PUNTO DE EXPLORACIÓN	COORDENADAS		PROFUNDIDAD (M)	NIVEL FREÁTICO (M)
	NORTE (M)	ESTE (M)		
Sondeo 1	95667.3	2841.5	14.00	2.00
Sondeo 2	95681.0	99549.4	14.50	2.40
Sondeo 3	95645.9	99548.2	11.30	6.80
Sondeo 4	95660.0	99529.6	4.30	0.40
Sondeo 5	95645.7	99585.7	6.30	N. E.
Sondeo 6	95721.2	99533.8	11.6	2.40
Sondeo 7	95622.1	99521.0	4.70	N. E.
Sondeo 8	95738.5	99559.7	5.05	N. E.
Sondeo 9	95627.0	99550.8	8.55	N. E.
Sondeo 10	95713.9	99512.4	9.50	1.20
Sondeo 11	95693.6	99594.5	4.08	N. E.
Sondeo 12	95615.8	99566.7	4.82	N. E.
Apique 1	95623.9	99560.0	1.75	0.90
Apique 2	95709.7	99542.1	1.80	N. E.
Apique 3	95682.8	99521.3	0.90	0.65
Apique 4	95685.9	99493.2	0.40	N. E.
Apique 5	95712.2	99512.1	1.00	N. E.
Apique 6	95652.9	99520.1	0.35	N. E.
Apique 7	95639.4	99509.2	0.75	N. E.
Apique 8	95714.5	99538.6	1.40	N. E.
Apique 9	95663.7	99507.2	1.20	N. E.
*Trinchera 1	95764.0	99632.4	6.60	N. E.
*Trinchera 2	95713.9	99559.7	6.00	N. E.
*Trinchera 3	95731.6	99537.6	6.90	N. E.
*Trinchera 4	95722.2	99505.3	7.50	N. E.
*Trinchera 5	95697.8	99487.0	7.60	N. E.

N.E: NO DETECTADO

*LAS COORDENADAS REPORTADAS ES DE LA CABEZA DE LA TRINCHERA.

TABLA 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES ESTRATIGRÁFICOS

NIVEL	SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1 y 2	Qd1-Qd2	Depósito de deslizamiento	Cantos y gravas gruesas y medias de areniscas cuarzosas, de color amarillo, arcillolitas y restos de ladrillos, embebidos en arcillas arenosas. El depósito es matriz soportado; su humedad es media; su plasticidad es media; su compresibilidad es baja; y su consistencia oscila entre media y firme su color muta de gris oscuro (producto de la mezcla con niveles orgánicos) en los primeros metros, a café claro e intermedio con vetas grises y amarillas
3	Qra1	Relleno Antrópico 1	Depósito antrópico y heterogéneo compuesto por cantos centimétricos y decimétricos, gravas gruesas y medias, angulares y subangulares de areniscas; arcillolitas y cerámicos (v.g. ladrillos, tejas, etc.) vidrios, residuos sólidos y plásticos embebidos en arcillas, ligeramente arenosas; su plasticidad es media, su humedad y su compresibilidad son bajas y su consistencia divaga de baja a media. La proporción de la fracción gruesa, en volumen, alcanza el 35%
4	Qra2	Relleno Antrópico 2	Involucra escombros y residuos sólidos, entremezclados con suelos limo-arenosos o areno-limosos, de consistencia o compacidad medias, aglutinados y compactados para la configuración de plataformas de parqueo y bloques y guijos de areniscas cuarzosas y lodolitas. Su espesor es inferior a los dos metros.
5	Qra3	Relleno Antrópico 3	Relleno seleccionado, heterogéneo areno-gravoso o areno-arcilloso de compacidad media a suelta y humedad baja. La componente gruesa está definida por gravas gruesas y medias de areniscas cuarzosas friables, y la fracción fina es arcillosa, de humedad baja y plasticidad media.
6	Qra4	Relleno Antrópico 4	Responden a fragmentos angulares de arcillolitas entremezclados con algunos líticos de areniscas, depositados mecánicamente en la parte media y baja de los escarpes occidentales de explotación.
7	Qft	Depósitos Fluviotorrencales	Engloba fragmentos de diferente tamaño: cantos, guijos y bloques, de areniscas cuarzosas, blancas, bien litificadas, y limolitas, con formas subangulares a subredondeados, embebidos en matriz areno-limosa o areno-arcillosa. Son matriz soportados; exhiben tonalidades amarillas o grisáceas, con manchas de color naranja a rojizo y con alto contenido de óxido de hierro.
8	Tpb-L-sr	Suelo Residual Formación Bogotá	Arcillas de color rojizo con vetas grises; su plasticidad es media, su humedad es baja y su consistencia es firme. Horizonte IC del perfil de meteorización de Deer y Patton (1971).
9	Tpb-L	Formación Bogotá	Son arcillolitas y lodolitas abigarradas de coloración violeta, con trazas habanas y ocres. Los cambios de coloración parecen no estar relacionados con los grados de alteración. Su resistencia es blanda; y se exponen en capas gruesas, desde los 2m hasta los 10m. Integra cuatro niveles, diferenciados cartográficamente y rotulados como: Tpb-L1, Tpb-L2, Tpb-L3 y Tpb-L4.
10	Tpb-A	Formación Bogotá	Secuencia de areniscas cuarzosas, grano crecientes, masivos y de cemento arcillosa, intercaladas con los paquetes de arcillolitas. Sus colores son blanco, blanco-amarillento y amarillo; son friables; el tamaño del grano varía de fino a medio y son bien seleccionadas (i.e. el grano es uniforme). La resistencia divaga de blanda a media; las capas no siempre son continuas (posiblemente resultado de la explotación) y sus espesores van desde los dos (2) metros (Tpb-A1 y Tpb-A3) hasta los cuatro (4) metros: Tpb-A2.

4.1.1.3 ENSAYOS DE CAMPO

El avance en los sondeos, en los horizontes dominantes de suelo, se llevó a cabo mediante el ensayo de penetración estándar, SPT, éste se consideró adecuado dado el carácter heterogéneo de los suelos

encontrados, dominantemente arcilloso-arenosos, y la premisa de que el muestreo inalterado en este tipo de suelos se dificulta. Asimismo, con el desarrollo del ensayo se consigue al unísono, muestras alteradas para clasificación, y para la deducción de la resistencia del material a fe de constatar los contactos litológicos. Los registros para cada uno de los sondeos aparece graficado en los registros de perforación dispuestos en el *Anexo C.1*.

El ensayo se practicó con equipo mecánico y pesa de 140 lb, el número de golpes registrado en campo (N_{45}) fue normalizado con el objeto de tener en cuenta el confina
miento del material y la relación de energía promedio aplicada, de acuerdo con la siguiente expresión:

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

En donde:

- N'_i : NÚMERO DE GOLPES CORREGIDO PARA UN DETERMINADO NIVEL DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA
- C_N : FACTOR DE AJUSTE PARA TENER EN CUENTA EL ESFUERZO GEOSTÁTICO, σ'_v. SE EVALUÓ CON BASE EN LAS PROPUESTAS DE PECK, SEED, MEYERHOFF-ISHIHARA, LIAO-WHITMAN, SKEMPTON, SEDD-ISDRISS, SCHMERTMANN Y GONZÁLEZ, CUIDANDO SIEMPRE QUE ESTE FACTOR NO RESULTARA MAYOR QUE 2. ESTOS VALORES POSTERIORMENTE SE PROMEDIARON
- η_1 : FACTOR DE CORRECCIÓN POR EFICIENCIA DE ENERGÍA TRANSMITIDA DEL MARTILLO AL VARILLAJE Y AL TOMAR MUESTRAS. SE OBTIENE COMO LA RELACIÓN ENTRE LAS EFICIENCIAS MEDIAS DE CADA PAÍS ASÍ, PARA JAPÓN LA EFICIENCIA ES DEL 72%, PARA USA DEL 60% Y PARA COLOMBIA DEL ORDEN DE 45%.
- η_2 : FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD DEL VARILLAJE.
- η_3 : FACTOR DE CORRECCIÓN POR PRESENCIA DE REVESTIMIENTO. DEBIDO A QUE NO SE UTILIZÓ REVESTIMIENTO, EL FACTOR DE CORRECCIÓN ES 1.0.
- η_4 : FACTOR DE CORRECCIÓN POR DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN. LOS DIÁMETROS DE LAS PERFORACIONES FUERON INFERIORES A 12 CM, POR LO CUAL EL FACTOR DE CORRECCIÓN ES 1.0

Con el fin de estimar los valores del ángulo de fricción equivalente, ϕ_{eq}, se promediaron los resultados obtenidos de las siguientes expresiones (véase la *Tabla 4.3*):

TABLA 4.3 EXPRESIONES PARA CORRELACIONAR EL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DEL SPT

KISHIDA	$\phi = 15 + \sqrt{(20*N72)}$	EC. 4.2
JRB	$\phi = 15 + \sqrt{(15*N72)}$	EC 4.3
SHIOU & FUKUI	$\phi = 27 + 0.36 * N72$	EC. 4.4
JNR	$\phi = 27 + 0.30 * N72$	EC. 4.5

Adicionalmente, y con el ánimo de evaluar cualitativamente los resultados del ensayo de penetración, en la *Tabla 4.4* y en *Tabla 4.5* se reseñan algunos criterios de Terzaghi y Peck, que relacionan la resistencia a la penetración con la compacidad relativa en arenas y con la consistencia en suelos finos, respectivamente. La valoración de estas propiedades en los materiales encontrados también se relaciona en la *Tabla 4.7*. Nótese que el relleno antrópico (Qra1) y los rellenos antrópicos traslocados (Qd1 y Qd2) se caracterizan por una consistencia blanda a media; el suelo residual de la formación Bogotá posee consistencia firme, y la arcillolita se posiciona en dura.

TABLA 4.4 RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD RELATIVA Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, N (GOLPES/PIE)	COMPACIDAD RELATIVA
0 – 4	MUY SUELTA
4 – 10	SUELTA
10 – 30	MEDIA
30 – 50	COMPACTA
>50	MUY COMPACTA

TABLA 4.5 RELACIÓN ENTRE LA CONSISTENCIA Y LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, N (GOLPES/PIE)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE (KG/CM^2)	CONSISTENCIA
<2	<0.25	MUY BLANDA
2 – 4	0.25 – 0.50	BLANDA
4 – 8	0.50 – 1.00	MEDIA
8 – 15	1.00 – 2.00	FIRME
15 – 30	2.00 – 4.00	MUY FIRME
>30	>4.00	DURA

Para terminar, se estiman los parámetros c' y ϕ' por tipo de material a partir de la propuesta de González, A.J. (1999) que consiste en graficar puntos (σ_v', τ) en planos Mohr-Coulomb, en los que los coeficientes de una regresión lineal representan los parámetros geomecánicos efectivos. El esfuerzo efectivo vertical se calcula como la diferencia entre el esfuerzo geostático total y la presión de poros y, el esfuerzo cortante a la profundidad del ensayo, se obtiene como el producto del esfuerzo efectivo vertical por la tangente del ángulo de fricción equivalente estimado antes.

Así la ecuación de la envolvente de cada material se expone en la *Figura 4.1* y en la *Figura 4.2*, junto con los parámetros de resistencia, los que se resumen en la *Tabla 4.6*. Los grupos de materiales aparecen diferenciados por colores en ella y fueron obtenidos mediante la interpretación simultánea y retroalimentada de la información geológica (plano y secciones), los registros de exploración del subsuelo y las propiedades físicas y geomecánicas resultantes de este mismo proceso. Adicionalmente, el procedimiento descrito se puede constatar en la *Tabla 4.7* y en la *Tabla 4.8* que incluye la normalización del ensayo (SPT).

TABLA 4.6 RESUMEN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN CONDICIÓN DRENADA A PARTIR DEL SPT

NO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	γ (TON/M^3)	COHESIÓN (TON/M^2)	ϕ (°)
1	QAR1, QD1 Y QD2	RELLENOS ANTRÓPICOS Y RELLENOS ANTRÓPICOS TRASLOCADOS	2.08	0.060	26.2
2	TPB-L	FORMACIÓN BOGOTÁ – LODOLITAS	2.25	0.00	44.0

FIGURA 4.1 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL: QD1, QD2 Y QRA1

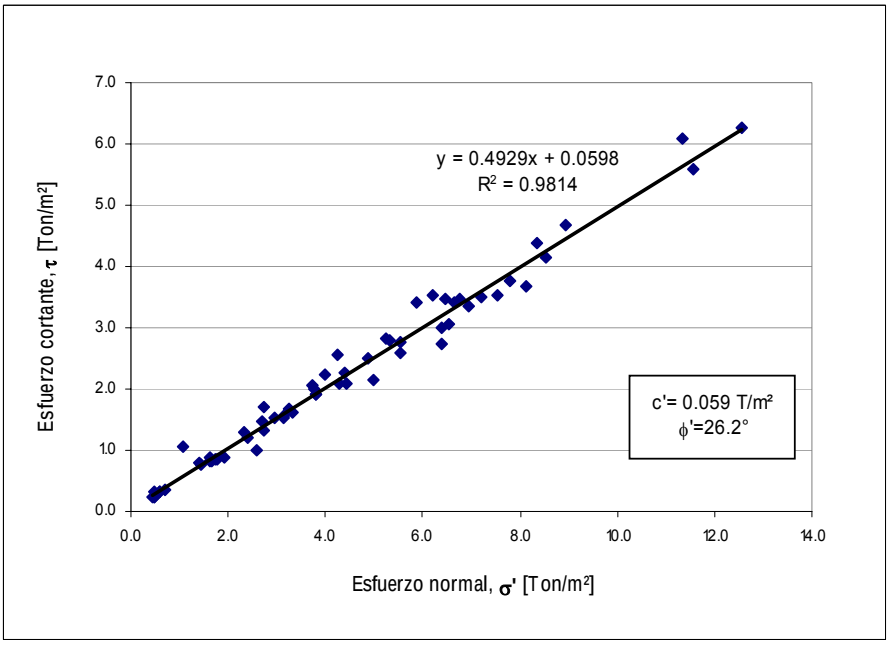


FIGURA 4.2 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL TPB-L

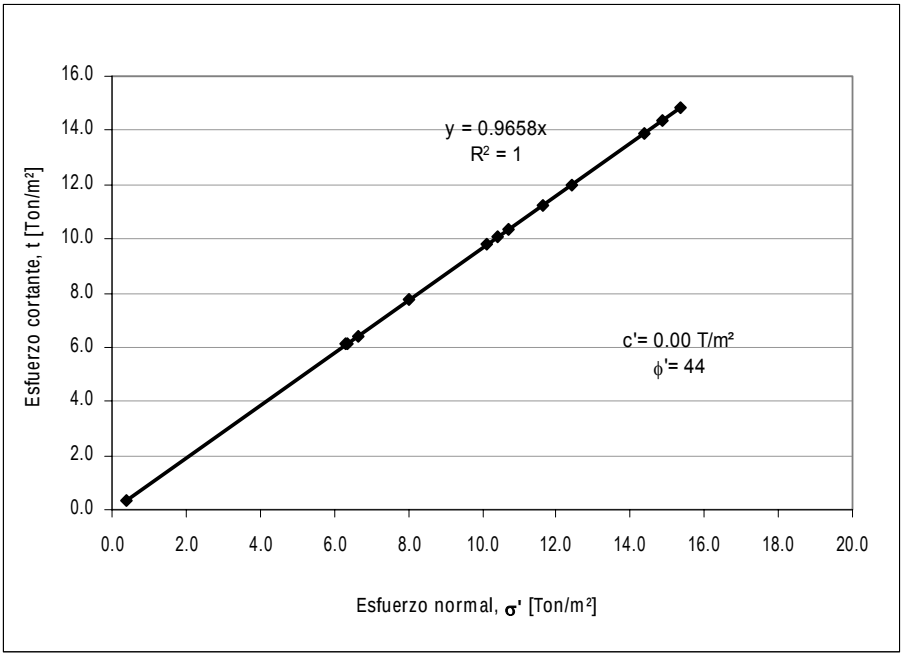


TABLA 4.7 NORMALIZACIÓN DEL SPT

Perf.	Muestra	Profundidad (m) de	a	Media	Golpes/pie 1	2	3	N_{45}	NF	Tipo	γ (T/m³)	σ_v (Ton/m²)	σ_v' (Ton/m²)	R_s
												0.00	**0.00**	
1	1	0.00	0.45	0.225	4	15	10	25	2	1	2.07	0.47	0.47	0.05
	2	0.45	0.90	0.675	6	7	6	13	2	1	2.07	1.40	1.40	0.14
	3	0.90	1.35	1.125	6	8	5	13	2	1	2.07	2.33	2.33	0.23
	4	1.35	1.80	1.575	4	4	5	9	2	1	2.07	3.26	3.26	0.33
	7	3.10	3.55	3.325	4	4	5.5	9.5	2	1	2.07	6.88	5.56	0.56
	9	5.50	5.95	5.725	3	2	3	5	2	1	2.07	11.85	8.13	0.81
	11	8.50	8.65	8.575	10	30	30	>50	2	3	2.25	18.22	11.65	1.16
												0.00	**0.00**	
2	1	0.00	0.45	0.225	3	4	4	8	2.4	1	1.96	0.44	0.44	0.04
	9	4.00	4.45	4.225	7	7	6	13	2.4	1	1.96	8.28	6.46	0.65
	11	5.60	6.05	5.825	10	12	20	32	2.4	1	1.96	11.42	7.99	0.80
	12	6.05	7.00	6.525	10	30	30	>50	2.4	1	1.96	12.79	8.66	0.87
	13a	8.00	8.10	8.050	10	40	40	>50	2.4	3	2.25	16.08	10.43	1.04
												3.96	**3.96**	
3	5	2.00	2.45	2.225	4	4	5	9	n.e	1	1.98	4.41	4.41	0.44
	7	4.00	4.45	4.225	4	7	6	13	n.e	1	1.98	8.37	8.37	0.84
	9	5.50	5.95	5.725	8	8	9	17	n.e	1	1.98	11.34	11.34	1.13
	11	7.30	7.60	7.450	30	45	45	>50	n.e	3	2.06	14.87	14.87	1.49
												0.00	**0.00**	
4	1	0.00	0.30	0.150	8	40	40	>50	0.4	3	2.53	0.38	0.38	0.04
												1.44	**1.44**	
5	1	0.70	1.15	0.925	2	2	2	4	n.e	1	2.06	1.91	1.91	0.19
	2	1.20	1.65	1.425	3	4	5	9	n.e	1	2.06	2.94	2.94	0.29
	3	1.70	2.15	1.925	4	7	7	14	n.e	1	2.06	3.97	3.97	0.40
	4	3.05	3.50	3.275	3	5	7	12	n.e	1	2.06	6.76	6.76	0.68
	5	3.55	4.00	3.775	4	4	4	8	n.e	1	2.06	7.79	7.79	0.78
	6	4.05	4.50	4.275	4	15	21	36	n.e	2	2.09	8.83	8.83	0.88
	7	4.55	5.00	4.775	20	15	12	27	n.e	2	2.09	9.87	9.87	0.99
	8	5.05	5.30	5.175	14	30	30	>50	n.e	3	2.22	10.73	10.73	1.07
												0.22	**0.22**	
6	1	0.10	0.55	0.325	2	2	3	5	2.3	1	2.15	0.70	0.70	0.07
	2	0.60	1.05	0.825	2	3	2	5	2.3	1	2.15	1.77	1.77	0.18
	3	1.55	2.00	1.775	2	3	5	8	2.3	1	2.15	3.82	3.82	0.38
	4	2.05	2.50	2.275	5	5	5	10	2.3	1	2.15	4.89	4.89	0.49
	5	2.55	3.00	2.775	17	21	10	31	2.3	1	2.15	5.97	5.49	0.55
	6	3.55	4.00	3.775	9	6	5	11	2.3	1	2.15	8.12	6.64	0.66
	7	4.05	4.50	4.275	6	4	3	7	2.3	1	2.15	9.19	7.22	0.72
	8	5.55	6.00	5.775	9	6	7	13	2.3	1	2.15	12.42	8.94	0.89
	9	6.00	6.12	6.060	10	30	30	>50	2.3	3	2.14	13.03	9.27	0.93
	11	6.80	6.82	6.810	30	30	30	>50	2.3	3	2.14	14.63	10.12	1.01
	13	8.80	8.85	8.825	30	30	30	>50	2.3	3	2.14	18.95	12.42	1.24
	15	10.50	10.60	10.550	30	30	30	>50	2.3	3	2.14	22.64	14.39	1.44
												1.16	**1.16**	
7	1	0.55	1.00	0.775	3	4	3	7	n.e	1	2.11	1.63	1.63	0.16
	2	1.05	1.50	1.275	3	5	6	11	n.e	1	2.11	2.68	2.68	0.27
	3	1.55	2.00	1.775	4	6	7	13	n.e	1	2.11	3.74	3.74	0.37
	4	2.05	2.00	2.025	7	6	15	21	n.e	1	2.11	4.26	4.26	0.43
	5	2.55	3.00	2.775	10	20	28	48	n.e	1	2.11	5.84	5.84	0.58
	6	3.05	3.20	3.125	10	35	35	>50	n.e	3	0.00	6.32	6.32	0.63
												0.11	**0.11**	
8	1	0.05	0.50	0.275	6	6	6	12	n.e	1	2.15	0.59	0.59	0.06
	2	0.55	1.00	0.775	4	2	4	6	n.e	1	2.15	1.67	1.67	0.17
	3	1.05	1.50	1.275	2	3	3	6	n.e	1	2.15	2.74	2.74	0.27
	4	1.55	2.00	1.775	2	3	4	7	n.e	1	2.15	3.82	3.82	0.38
	6	2.25	2.70	2.475	4	6	5	11	n.e	1	2.15	5.32	5.32	0.53
	7	2.75	3.20	2.975	2	1	2	3	n.e	1	2.15	6.40	6.40	0.64
	8	3.25	3.70	3.475	2	10	20	30	n.e	1	2.15	7.47	7.47	0.75
	9	3.70	3.75	3.725	10	30	30	>50	n.e	4	2.14	8.01	8.01	0.80

Perf.	Muestra	C_N Peck	Seed	Meyerhoff-Ishihara	Liao-Whitman	Skempton	Seed-Idriss	Schmert-mann	C_N promedio
1	1	2.000	2.000	2.000	2.000	1.911	2.000	2.000	1.987
	2	1.657	2.000	2.000	2.000	1.755	2.000	2.000	1.916
	3	1.486	1.791	1.822	2.000	1.622	1.892	2.000	1.802
	4	1.374	1.608	1.657	1.751	1.508	1.686	1.932	1.645
	7	1.196	1.319	1.354	1.341	1.286	1.360	1.513	1.338
	9	1.069	1.113	1.124	1.109	1.103	1.127	1.217	1.123
	11	0.949	0.917	0.912	0.927	0.924	0.939	0.960	0.933
2	1	2.000	2.000	2.000	2.000	1.916	2.000	2.000	1.989
	9	1.146	1.238	1.263	1.245	1.215	1.268	1.395	1.253
	11	1.075	1.122	1.134	1.119	1.112	1.137	1.230	1.133
	12	1.048	1.078	1.085	1.074	1.072	1.088	1.170	1.088
	13a	0.986	0.977	0.975	0.979	0.979	0.983	1.036	0.988
3	5	1.274	1.445	1.491	1.507	1.388	1.502	1.698	1.472
	7	1.060	1.097	1.106	1.093	1.089	1.109	1.196	1.107
	9	0.958	0.932	0.927	0.939	0.937	0.950	0.979	0.946
	11	0.868	0.785	0.777	0.820	0.804	0.841	0.805	0.814
4	1	2.000	2.000	2.000	2.000	1.927	2.000	2.000	1.990
5	1	1.553	1.899	1.908	2.000	1.680	2.000	2.000	1.863
	2	1.409	1.665	1.710	1.844	1.546	1.750	2.000	1.703
	3	1.308	1.501	1.550	1.587	1.432	1.566	1.780	1.532
	4	1.131	1.213	1.236	1.217	1.194	1.240	1.359	1.227
	5	1.083	1.136	1.150	1.133	1.124	1.153	1.250	1.147
	6	1.042	1.068	1.074	1.064	1.062	1.076	1.156	1.077
	7	1.004	1.007	1.008	1.006	1.006	1.008	1.075	1.016
	8	0.976	0.962	0.959	0.965	0.965	0.972	1.016	0.974
6	1	1.888	2.000	2.000	2.000	1.869	2.000	2.000	1.965
	2	1.577	1.939	1.938	2.000	1.699	2.000	2.000	1.879
	3	1.322	1.523	1.572	1.619	1.448	1.590	1.811	1.555
	4	1.239	1.388	1.430	1.430	1.343	1.438	1.615	1.412
	5	1.200	1.325	1.361	1.349	1.291	1.367	1.522	1.345
	6	1.137	1.222	1.246	1.227	1.202	1.251	1.372	1.237
	7	1.109	1.177	1.196	1.177	1.162	1.200	1.308	1.190
	8	1.037	1.061	1.066	1.058	1.056	1.069	1.146	1.070
	9	1.025	1.041	1.045	1.039	1.038	1.047	1.120	1.051
	11	0.996	0.993	0.993	0.994	0.994	0.995	1.057	1.003
	13	0.928	0.882	0.875	0.897	0.892	0.913	0.918	0.901
	15	0.879	0.803	0.795	0.834	0.820	0.855	0.825	0.830
7	1	1.605	1.984	1.970	2.000	1.719	2.000	2.000	1.897
	2	1.439	1.714	1.755	1.930	1.577	1.805	2.000	1.746
	3	1.329	1.534	1.583	1.636	1.456	1.603	1.827	1.567
	4	1.285	1.463	1.509	1.532	1.402	1.522	1.724	1.491
	5	1.179	1.292	1.324	1.308	1.263	1.329	1.473	1.310
	6	1.153	1.250	1.277	1.258	1.226	1.281	1.412	1.265
8	1	1.944	2.000	2.000	2.000	1.888	2.000	2.000	1.976
	2	1.598	1.973	1.962	2.000	1.714	2.000	2.000	1.892
	3	1.432	1.703	1.745	1.910	1.570	1.792	2.000	1.736
	4	1.322	1.523	1.572	1.619	1.448	1.590	1.811	1.555
	6	1.211	1.342	1.380	1.371	1.305	1.386	1.547	1.363
	7	1.149	1.243	1.269	1.250	1.220	1.274	1.402	1.258
	8	1.097	1.158	1.175	1.157	1.145	1.179	1.281	1.170
	9	1.074	1.121	1.133	1.117	1.111	1.136	1.228	1.131

Perf.	Muestra	η_1 U.S.A.	η_1 Japón	η_2	η_3	η_4	$N_{normalizado}$ U.S.A.	$N_{normalizado}$ Japón	$\phi_{equivalente}$ Kishida	Schmertmann	JRB	Shiou & Fukui	JNR	ϕ_{prom} (°)
1	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	27	23	36.45	43.20	33.57	35.28	33.90	35
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	14	11	29.83	36.91	27.85	30.96	30.30	30
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	13	10	29.14	36.22	27.25	30.60	30.00	29
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	6	25.95	31.84	24.49	29.16	28.80	27
	7	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	5	25.00	30.68	23.66	28.80	28.50	26
	9	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	3	2	21.32	23.98	20.48	27.72	27.60	24
	11	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
2	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	7	26.83	31.84	25.25	29.52	29.10	28
	9	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	10	8	27.65	33.82	25.95	29.88	29.40	28
	11	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	23	19	34.49	41.64	31.88	33.84	32.70	33
	12	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
	13a	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
3	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	6	25.95	30.68	24.49	29.16	28.80	27
	7	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	9	7	26.83	32.87	25.25	29.52	29.10	28
	9	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	10	8	27.65	33.82	25.95	29.88	29.40	28
	11	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
4	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
5	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	4	3	22.75	26.13	21.71	28.08	27.90	25
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	7	26.83	31.84	25.25	29.52	29.10	28
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	12	10	29.14	35.48	27.25	30.60	30.00	29
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	6	25.95	31.84	24.49	29.16	28.80	27
	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26
	6	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	24	20	35.00	42.05	32.32	34.20	33.00	34
	7	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	17	14	31.73	38.74	29.49	32.04	31.20	31
	8	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
6	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	29.38	23.66	28.80	28.50	26
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	6	25.95	30.68	24.49	29.16	28.80	27
	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	23	19	34.49	41.64	31.88	33.84	32.70	33
	6	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	6	25.95	30.68	24.49	29.16	28.80	27
	7	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26
	8	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	8	7	26.83	31.84	25.25	29.52	29.10	28
	9	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
	11	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
	13	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
	15	0.75	0.63	1.00	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
7	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	7	6	25.95	30.68	24.49	29.16	28.80	27
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	10	9	28.42	33.82	26.62	30.24	29.70	29
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	11	9	28.42	34.68	26.62	30.24	29.70	29
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	17	14	31.73	38.74	29.49	32.04	31.20	31
	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	35	29	39.08	45.72	35.86	37.44	35.70	37
	6	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44
8	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	13	11	29.83	36.22	27.85	30.96	30.30	30
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	29.38	23.66	28.80	28.50	26
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	29.38	23.66	28.80	28.50	26
	6	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	7	26.83	31.84	25.25	29.52	29.10	28
	7	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	2	1	19.47	21.18	18.87	27.36	27.30	23
	8	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	19	16	32.89	39.80	30.49	32.76	31.80	32
	9	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44

Perf.	Muestra	Consistencia o Compacidad
1	1	Firme
	2	Firme
	3	Firme
	4	Media
	7	Media
	9	Blanda
	11	Firme
2	1	Media
	9	Media
	11	Firme
	12	Firme
	13a	Firme
3	5	Media
	7	Media
	9	Media
	11	Firme
4	1	Firme
5	1	Blanda
	2	Media
	3	Firme
	4	Media
	5	Blanda
	6	Firme
	7	Firme
	8	Firme
6	1	Blanda
	2	Blanda
	3	Media
	4	Media
	5	Firme
	6	Media
	7	Media
	8	Media
	9	Firme
	11	Firme
	13	Firme
	15	Firme
7	1	Media
	2	Firme
	3	Firme
	4	Firme
	5	Firme
	6	Firme
8	1	Firme
	2	Media
	3	Blanda
	4	Media
	6	Media
	7	Muy blanda
	8	Firme
	9	Compacta

Sondeo-Muestra	Consecutivo	σ_v' (Ton/m²)	τ (Ton/m²)
1 M-1	1	0.47	0.32
M-2	1	1.40	0.80
M-3	1	2.33	1.30
M-4	1	3.26	1.67
M-7	1	5.56	2.77
M-9	1	8.13	3.67
M-11	3	11.65	11.25
2 M-1	1	0.44	0.23
M-9	1	6.46	3.46
M-11	1	7.99	5.24
M-12	1	8.66	8.37
M-13a	3	10.43	10.08
3 M-5	1	4.41	2.25
M-7	1	8.37	4.39
M-9	1	11.34	6.08
M-11	3	14.87	14.36
4 M-1	3	0.38	0.37
5 M-1	1	1.91	0.89
M-2	1	2.94	1.54
M-3	1	3.97	2.22
M-4	1	6.76	3.46
M-5	1	7.79	3.77
M-6	2	8.83	5.87
M-7	2	9.87	5.96
M-8	3	10.73	10.36
6 M-1	1	0.70	0.34
M-2	1	1.77	0.86
M-3	1	3.82	1.90
M-4	1	4.89	2.50
M-5	1	5.49	3.60
M-6	1	6.64	3.40
M-7	1	7.22	3.49
M-8	1	8.94	4.69
M-9	3	9.27	8.95
M-11	3	10.12	9.78
M-13	3	12.42	12.00
M-15	3	14.39	13.89
7 M-1	1	1.63	0.83
M-2	1	2.68	1.47
M-3	1	3.74	2.05
M-4	1	4.26	2.57
M-5	1	5.84	4.40
M-6	3	6.32	6.10
8 M-1	1	0.59	0.34
M-2	1	1.67	0.83
M-3	1	2.74	1.33
M-4	1	3.82	1.90
M-6	1	5.32	2.79
M-7	1	6.40	2.75
M-8	1	7.47	4.67
M-9	4	8.01	7.73

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

	MATERIALES		Peso Unitario γ_t (Kg/cm³) S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Qra	Relleno mixto	1	2.070	1.980	1.980		2.063	2.130	2.105	2.150
Tpb-L-sr	Suelo Residual Lodolita	2					2.090			
Tpb-L	Lodolita	3	2.250	2.250	2.060	2.530	2.220	2.140		
Tpb-A	Arenisca	4								2.140

TABLA 4.8 NORMALIZACIÓN DEL SPT

Perf.	Muestra	Profundidad (m)			Golpes/pie			N_{45}	NF	Tipo	γ (T/m³)	σ_v (Ton/m²)	σ_v' (Ton/m²)	R_s
		de	a	Media	1	2	3							
												1.30	**1.30**	
	1	0.65	1.10	0.875	2	2	3	5	n.e	1	2.00	1.75	1.75	0.18
	2	1.15	1.60	1.375	2	1	19	20	n.e	1	2.00	2.75	2.75	0.28
	3	1.65	2.10	1.875	5	5	6	11	n.e	1	2.00	3.75	3.75	0.38
	4	3.05	3.50	3.275	2	3	3	6	n.e	1	2.00	6.55	6.55	0.66
9	5	3.55	4.00	3.775	2	3	3	6	n.e	1	2.00	7.55	7.55	0.76
	6	4.05	4.50	4.275	3	3	4	7	n.e	1	2.00	8.55	8.55	0.86
	7	5.55	6.00	5.775	3	4	5	9	n.e	1	2.00	11.55	11.55	1.16
	8	6.05	6.50	6.275	3	4	7	11	n.e	1	2.00	12.55	12.55	1.26
	9	6.55	8.55	7.550	5	30	30	>50	n.e	3	2.25	15.36	15.36	1.54
												0.10	**0.10**	
	1	0.05	0.50	0.275	4	5	5	10	1.2	1	2.09	0.57	0.57	0.06
	2	0.55	1.00	0.775	5	6	5	11	1.2	1	2.09	1.62	1.62	0.16
	3	1.05	1.50	1.275	1	0	0	0	1.2	1	2.09	2.66	2.59	0.26
	4	1.55	2.00	1.775	2	3	3	6	1.2	1	2.09	3.71	3.13	0.31
10	5	2.75	3.20	2.975	2	3	2	5	1.2	1	2.09	6.22	4.44	0.44
	6	3.25	3.70	3.475	2	1	2	3	1.2	1	2.09	7.26	4.99	0.50
	7	3.75	4.20	3.975	3	3	3	6	1.2	1	2.09	8.31	5.53	0.55
	8	4.55	5.00	4.775	3	2	3	5	1.2	1	2.09	9.98	6.40	0.64
	9	5.05	5.50	5.275	3	3	4	7	1.2	1	2.09	11.02	6.95	0.69
	10	6.00	6.07	6.035	30	30	30	>50	1.2	3	0.00	11.50	6.66	0.67
												0.00	**0.00**	
	1	0.00	0.45	0.225	2	2	3	5	n.e	1	2.12	0.48	0.48	0.05
	2	0.45	0.90	0.675	6	5	4	9	n.e	1	2.12	1.43	1.43	0.14
	3	0.90	1.35	1.125	5	4	4	8	n.e	1	2.12	2.39	2.39	0.24
	4	1.35	1.80	1.575	3	3	3	6	n.e	1	2.12	3.34	3.34	0.33
11	5	1.80	2.25	2.025	5	4	3	7	n.e	1	2.12	4.29	4.29	0.43
	6	2.25	2.70	2.475	4	5	8	13	n.e	1	2.12	5.25	5.25	0.52
	7	2.70	3.15	2.925	6	7	12	19	n.e	1	2.12	6.20	6.20	0.62
	8	3.15	3.50	3.325	12	18	40	>50	n.e	4	2.14	7.09	7.09	0.71
												2.65	**2.65**	
	2	1.25	1.70	1.475	7	4	3	7	n.e	1	2.12	3.13	3.13	0.31
12	3	2.55	3.00	2.775	5	9	11	20	n.e	1	2.12	5.88	5.88	0.59
	4	3.05	3.32	3.185	18	35	35	>50	n.e	3	0.00	6.36	6.36	0.64
												0.00	**0.00**	
13	1	0.00	0.45	0.225	2	2	4	6	n.e	1	2.12	0.48	0.48	0.05
	2	0.45	0.57	0.510	40	40	40	>50	n.e	1	2.12	1.08	1.08	0.11

Perf.	Muestra	C_N							C_N promedio
		Peck	Seed	Meyerhoff-Ishihara	Liao-Whitman	Skempton	Seed-Idriss	Schmertmann	
	1	1.582	1.946	1.943	2.000	1.702	2.000	2.000	1.882
	2	1.431	1.701	1.744	1.907	1.569	1.791	2.000	1.734
	3	1.327	1.532	1.581	1.633	1.455	1.601	1.825	1.565
	4	1.141	1.230	1.255	1.236	1.208	1.259	1.383	1.245
9	5	1.094	1.153	1.168	1.151	1.140	1.172	1.273	1.164
	6	1.052	1.085	1.093	1.081	1.078	1.096	1.179	1.095
	7	0.952	0.922	0.916	0.930	0.928	0.942	0.966	0.937
	8	0.924	0.877	0.870	0.893	0.887	0.909	0.911	0.896
	9	0.857	0.767	0.760	0.807	0.789	0.828	0.785	0.799
	1	1.953	2.000	2.000	2.000	1.891	2.000	2.000	1.981
	2	1.608	1.988	1.972	2.000	1.721	2.000	2.000	1.898
	3	1.451	1.733	1.773	1.965	1.589	1.827	2.000	1.763
	4	1.387	1.630	1.677	1.766	1.523	1.710	1.962	1.668
10	5	1.271	1.440	1.486	1.500	1.385	1.497	1.691	1.467
	6	1.232	1.378	1.418	1.416	1.334	1.426	1.599	1.400
	7	1.198	1.321	1.356	1.344	1.288	1.362	1.516	1.341
	8	1.149	1.242	1.268	1.250	1.219	1.273	1.401	1.257
	9	1.121	1.198	1.219	1.200	1.180	1.223	1.337	1.211
	10	1.136	1.221	1.245	1.225	1.200	1.249	1.370	1.235
	1	2.000	2.000	2.000	2.000	1.909	2.000	2.000	1.987
	2	1.649	2.000	2.000	2.000	1.750	2.000	2.000	1.914
	3	1.478	1.778	1.811	2.000	1.615	1.878	2.000	1.794
	4	1.366	1.595	1.644	1.731	1.499	1.672	1.914	1.632
11	5	1.282	1.459	1.505	1.526	1.399	1.518	1.718	1.487
	6	1.215	1.350	1.388	1.381	1.312	1.395	1.559	1.371
	7	1.160	1.259	1.288	1.270	1.234	1.293	1.426	1.276
	8	1.115	1.187	1.207	1.188	1.170	1.211	1.322	1.200
	2	1.388	1.631	1.679	1.788	1.524	1.712	1.964	1.669
12	3	1.177	1.288	1.320	1.304	1.259	1.325	1.468	1.306
	4	1.151	1.246	1.272	1.254	1.222	1.277	1.406	1.261
13	1	2.000	2.000	2.000	2.000	1.909	2.000	2.000	1.987
	2	1.743	2.000	2.000	2.000	1.805	2.000	2.000	1.935

Perf.	Muestra	η_1		η_2	η_3	η_4	$N_{normalizado}$		ϕ equivalente						Consistencia o Compacidad
		U.S.A.	Japón				U.S.A.	Japón	Kishida	Schmertmann	JRB	Shiou & Fukui	JNR	ϕ_{prom} (°)	
	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	19	16	32.89	39.80	30.49	32.76	31.80	32	Firme
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	9	8	27.65	32.87	25.95	29.88	29.40	28	Media
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	4	3	22.75	26.13	21.71	28.08	27.90	25	Blanda
9	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	3	3	22.75	23.98	21.71	28.08	27.90	25	Blanda
	6	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	4	4	23.94	26.13	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	7	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	8	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	7	5	25.00	30.68	23.66	28.80	28.50	26	Media
	9	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44	Firme
	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	11	9	28.42	34.68	26.62	30.24	29.70	29	Firme
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	11	9	28.42	34.68	26.62	30.24	29.70	29	Firme
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	0	0	15.00	0.00	15.00	27.00	27.00	21	Muy blanda
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
10	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	4	3	22.75	26.13	21.71	28.08	27.90	25	Blanda
	6	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	2	1	19.47	21.18	18.87	27.36	27.30	23	Muy blanda
	7	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	4	3	22.75	26.13	21.71	28.08	27.90	25	Blanda
	8	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	4	3	22.75	26.13	21.71	28.08	27.90	25	Blanda
	9	0.75	0.63	0.85	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	10	0.75	0.63	0.95	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44	Firme
	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	9	8	27.65	32.87	25.95	29.88	29.40	28	Media
	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	8	6	25.95	31.84	24.49	29.16	28.80	27	Media
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
11	5	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	5	4	23.94	27.89	22.75	28.44	28.20	26	Blanda
	6	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	10	8	27.65	33.82	25.95	29.88	29.40	28	Media
	7	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	13	11	29.83	36.22	27.85	30.96	30.30	30	Firme
	8	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44	Compacta
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	29.38	23.66	28.80	28.50	26	Media
12	3	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	14	12	30.49	36.91	28.42	31.32	30.60	30	Firme
	4	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44	Firme
13	1	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	6	5	25.00	29.38	23.66	28.80	28.50	26	Media
	2	0.75	0.63	0.75	1.00	1.00	50	50	46.62	49.18	42.39	45.00	42.00	44	Firme

Perf.	Muestra	Sondeo-Muestra	Consecutivo	σ_v' (Ton/m²)	τ (Ton/m²)
	1	9 M-1	1	1.75	0.85
	2	M-2	1	2.75	1.72
	3	M-3	1	3.75	2.01
	4	M-4	1	6.55	3.07
9	5	M-5	1	7.55	3.54
	6	M-6	1	8.55	4.14
	7	M-7	1	11.55	5.59
	8	M-8	1	12.55	6.25
	9	M-9	3	15.36	14.84
	1	10 M-1	1	0.57	0.32
	2	M-2	1	1.62	0.89
	3	M-3	1	2.59	0.99
	4	M-4	1	3.13	1.52
10	5	M-5	1	4.44	2.08
	6	M-6	1	4.99	2.14
	7	M-7	1	5.53	2.59
	8	M-8	1	6.40	3.00
	9	M-9	1	6.95	3.36
	10	M-10	3	6.66	6.43
	1	11 M-1	1	0.48	0.23
	2	M-2	1	1.43	0.77
	3	M-3	1	2.39	1.22
	4	M-4	1	3.34	1.62
11	5	M-5	1	4.29	2.08
	6	M-6	1	5.25	2.82
	7	M-7	1	6.20	3.54
	8	M-8	4	7.09	6.85
	2	12 M-2	1	3.13	1.56
12	3	M-3	1	5.88	3.42
	4	M-4	3	6.36	6.14
13	1	13 M-1	1	0.48	0.24
	2	M-2	1	1.08	1.04

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

MATERIALES			Peso Unitario γ_t (Kg/cm³) S9	S10	S11
Qra	Relleno mixto	1	2.000	2.09	2.12
Tpb-L-sr	Suelo Residual Lodolita	2			
Tpb-L	Lodolita	3	2.250		
Tpb-A	Arenisca	4			2.14

4.1.1.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

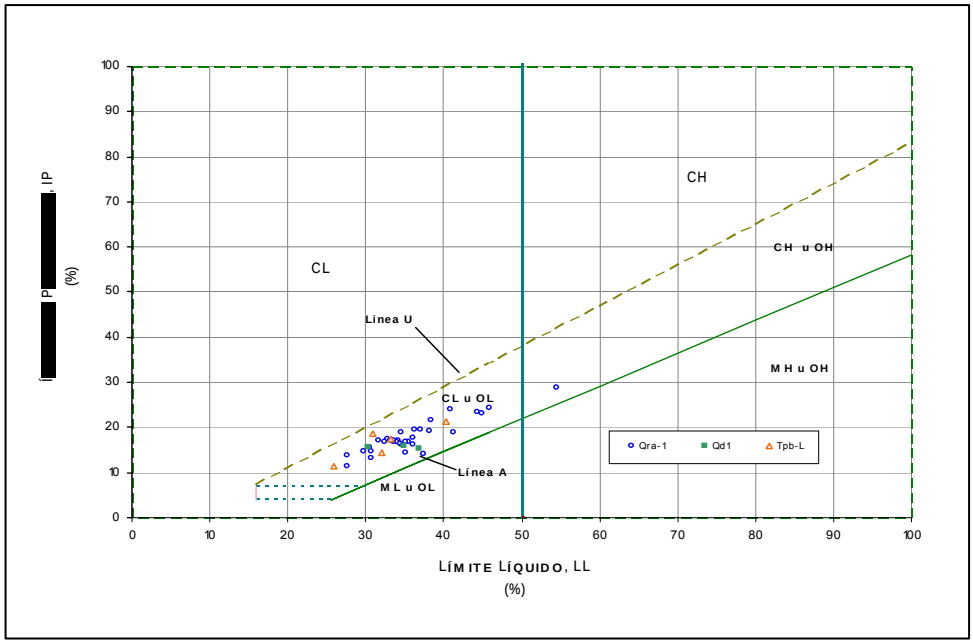
Para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de las unidades de roca, del depósito fluviotorrencial, de los rellenos antrópicos y de los suelos residuales, potenciales escenarios de movilización, se llevó a cabo un programa discreto de muestreo, en el que prevaleciese el barrido continuo, para la posterior caracterización en laboratorio de los especimenes extraídos: inalterados, tipo shelby (con diámetros entre 3 y 4 pulgadas y longitudes de hasta 0.30 m) y bloque (prismáticos e irregulares con aristas medias de 0.20 m, 0.40 m y 0.50 m) y alterados split spoon. En la *Tabla 4.9* se discrimina la cantidad y el tipo de ensayos de clasificación y resistencia ejecutados.

TABLA 4.9 RELACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO URBANIZACIÓN BUENAVISTA

ENSAYO			CANTIDAD (UN)
WN	:	CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	59
LL Y LP.	:	LÍMITES DE CONSISTENCIA	42
GRANULOMETRÍA	:	GRANULOMETRÍA	16
PT200	:	PASA TAMIZ NO. 200	16
GS	:	GRAVEDAD ESPECÍFICA	14
γT	:	PESO UNITARIO TOTAL	70
γD	:	PESO UNITARIO SECO	51
CC, CR	:	CONSOLIDACIÓN (RÁPIDA)	3
	:	EXPANSIÓN LAMBE	3
CD	:	CORTE DIRECTO	14
q_u	:	PENETRÓMETRO DE BOLSILLO	19
$q_u(S)$	:	COMPRESIÓN INCONFINADA EN SUELO	12
$q_u(R)$	:	COMPRESIÓN INCONFINADA EN ROCA	9
CP	:	CARGA PUNTUAL	5

Se hizo especial hincapié en la toma de muestras en los paquetes arcillolíticos de la Formación Bogotá y con el propósito de establecer tanto las propiedades físicas como mecánicas del material, y de los planos de discontinuidad (básicamente el de la estratificación), máxime si se considera que estos últimos pueden gobernar la estabilidad de la mayor parte de laderas. En cuanto al cuaternario reciente se le dio mayor importancia a los rellenos antrópicos Qd1, Qd2, Qra1 y Qra2, puesto que presiden gran parte de las superficies libres y son los escenarios a priori móviles, y por consiguiente los de mayor condición de amenaza. La selección de los testigos, irradiada de las masas occidental, sur y norte, busco cotejar (o corroborar) la premisa sustancial de la prevalencia de un único escenario de llenos, en el entendido que su respuesta geomecánica es homogénea e indiferente de su expresión geomorfológica hoy día. Supuesto validado por los parámetros efectivos: c', ø', obtenidos y por su consistente representación en la carta de plasticidad (véase la *Figura 4.3*).

FIGURA 4.3 CARTA DE PLASTICIDAD



Los cortes directos se llevaron a cabo en condición inundada, y a los niveles de esfuerzo a los que estaban sometidas las unidades de suelo o roca en campo, y a muy baja velocidad a fe de simular estados drenados, es decir de manera tal que los coeficientes de resistencia se aproximen lo más posible a los efectivos. Se ensayaron muestras próximas a la superficie de deslizamiento del cuerpo principal, en las masas inalteradas de los llenos y en el suelo de fundación de las edificaciones (viviendas).

Las muestras de roca, por excelencia de bloque: la E-10 M-1; la E-11 M-1, la T-5 M-1, fueron precortadas de manera tal que el ensayo simulará el papel del plano de estratificación (datado en el sitio como E1=288/30). Respondían a los dos horizontes expuestos de arenisca y al más relevante banco de arcillolita el Tpb-L3 (catalogado así por su trascendencia en las décadas anteriores como fuente de producción).

La consolidación y la expansión se destinaron casi exclusivamente a la deducción de los parámetros operativos del suelo de fundación en la urbanización (i.e. el lleno); no obstante, la fisuración de la masa repercutió en la repetición de los ensayos. A pesar del impace, los esfuerzos de preconsolidación (σ'_p= 19 ton/m^2) y expansión sugieren desde ya para las condiciones de carga de las viviendas (carga viva más carga muerta), próximos a las 12 Ton/m^2 (para el ancho del cimiento de 0.30 m, abstraído de los planos de diseño de la urbanización), estados de trabajo en recompresión, que se traducen en asentamientos pequeños, e inocua incidencia de las deformaciones, por expansión o compresión, en el deterioro de las construcciones (aún cuando la humedad es inferior al límite plástico).

Ante la dificultad de descifrar cabalmente las funciones de distribución, y por ende el promedio y la desviación estándar, de los parámetros de resistencia para cada material, elementos trascendentes para la evaluación de amenaza, se acopiaron los resultados de laboratorio de áreas circunvecinas, gracias a que los materiales constitutivos son comunes en todas. Su importancia recae en mejorar la información estadística. En este sentido se recurre a los trabajos de Geoingeniería (2000), Ingeniería y Geotecnia Ltda. (1995),

Investigaciones Geotécnicas Ltda. (2000), Ingeniería y Georiesgos Ltda. (2005), Geocing Ltda. (2007), Gia C. L. (2007), Hidrogeología y Geotecnia Ltda. (2000) e Ifcaya (1998). Estos últimos serán empleados en la determinación del espectro probable de los parámetros de resistencia; tema que será tratado en el capítulo 6.

Las memorias de cálculo de los ensayos (geomecánicos) ordenadas por GIA C. L. se recopilan en el *Anexo C.2*, y los resultados de las pruebas de contenidos de humedad natural, límites de consistencia, pesos unitarios totales, tamizado, gravedad específica, compresión inconfinada, cortes directos, consolidación y expansión, entre otros, se sintetizan en la *Tabla 4.10*, la *Tabla 4.11*, y la *Tabla 4.12*. Y los ensayos de laboratorio ordenados bajo el amparo de otros consultores pero que involucran a la formación Bogotá se compilan en el *Anexo C.3*.

4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

4.2.1 SUELOS

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

Material 1: Rellenos Antrópicos de Reconformación (Qra1 y Qra2)
Material 2: Rellenos Antrópicos Traslocados (Qd1 y Qd2)
Material 3: Rellenos Antrópicos Seleccionados (Qra3)
Material 4: Depósitos Antrópicos de Sobretamaños (Qra4)
Material 5: Depósitos Fluviotorrenciales (Qft)
Material 6: Suelos Residuales ($Q_{Tpb\text{-}L\text{-}sr}$)

4.2.1.1 MATERIAL 1: RELLENOS ANTRÓPICOS DE RECONFORMACIÓN, Q_{RA1} Y Q_{RA2}

Aunque granulométricamente son disímiles, pues responden bien a arcillas-arenosas o a arcillas, de plasticidad y humedad baja, y de consistencia media a blanda, que entrelazan residuos sólidos de origen doméstico (ladrillos, zapatos y escombros) y cantos subangulares de areniscas cuarzosas y lodolitas, si se trata del Qra1; o bien a fragmentos de areniscas, lodolitas y cerámicos (ladrillos, baldosines, etc) de tamaños gravas, guijos y cantos, embebidos en arenas-arcillosas o en arcillas-arenosas, pero con dominio de estas últimas de compacidad media y ocasionalmente suelta o de consistencia media, de baja plasticidad y humedad, en lo que atañe al Qra2; su comportamiento geomecánico está gobernado por la matriz, similar en los dos tanto física como mecánicamente. En tal sentido y a fe de llevar a cabo la evaluación de estabilidad se designarán en adelante como un solo material, rotulado como Qra1.

Su espesor alcanza los 10 m en lo que refiere al Qra1 (véanse las perforaciones: S-5, S-6, S-7, S-8, S-9 y S-10, los apiques AP-1, AP-2, AP-3, AP-5 y AP-8, y las trincheras TA-1, TA-2 y TA-3); o variar entre los pocos centímetros y los dos (2) metros (deducidos de la prospección geológica), si se trata del Qra2. Junto con el Qd1 y el Qd2, son el universo de materiales de mayor susceptibilidad, y los nichos de incubación de los procesos de inestabilidad. En la *Tabla 4.14* se compilan algunos de sus parámetros geomecánicos.

TABLA 4.10 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

SONDEO	MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	MATERIAL	PROFUNDIDAD (m)			USCS	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	%G	%A	%F	γ_t (Ton/m³)	γ_d (Ton/m³)	Gs	PT200 (%)	q_u Penetrómetro (Kg/cm²)	$q_{u\ ROCA}$ (Kg/cm²)	$q_{u\ suelo}$ (Kg/cm²)	c' (Kg/cm²)	ϕ' (°)	c'residual (Kg/cm²)	ϕ residual (°)	Expansión Lambe		Cc	Cr
				de	a	media																					Esfuerzo (Kg/cm²)	Estado		
1	1	SS	Qd1	0,00	0,45	0,23		13,60								2,07	1,82													
	3	SS	Qd1	0,90	1,15	1,03										2,16														
	4	SS	Qd1	1,35	1,80	1,58	CL	27,20	36,90	21,60	15,30	0,37	6,60	35,20	58,30				58,30											
	5	SH	Qd1	2,20	2,70	2,45	CL	26,90	30,40	14,80	15,60	0,78				2,00	1,58	2,67					0,10	34,70						
	6	SH	Qd1	2,70	3,10	2,90																	0,23	29,20						
	7	SS	Qd1	3,10	3,55	3,33												2,78												
	8	SH	Qd1	5,00	5,50	5,25	CL	24,10	35,00	19,20	15,80	0,31				2.08 - 2.11	1,67 - 1,70					0,244								
	10	SH	Qd1	7,00	7,50	7,25	SC	20,60	25,90	14,60	11,30	0,53	11,60	41,50	46,80	1,99	1,65	2,75	46,80				0,20	15,70						
	11	SH	Qd1	8,50	8,65	8,58	CL	9,50	30,90	12,40	18,50	-0,16				2,01	1,84													
	14	SH	Tpb-L1	10,00	11,00	10,50		12,60								2,24	1,99	2,64					0,30	30,40	0,10	29,60				
	15	SH	Tpb-L1	11,00	12,00	11,50										2,49														
2	2	SH	Qd1	0,50	1,00	0,75																								
	3	SH	Qd1	1,00	1,50	1,25	CL	18,00	30,70	16,00	14,80	0,14				1,96	1,66					0,191								
	4	SH	Qd1	1,50	2,00	1,75		16,50								2,14	1,84					2,377								
	5	SH	Qd1	2,00	2,50	2,25	CL	24,70	31,70	14,70	17,00	0,59				1,98	1,59	2,73				2,073								
	6	SH	Qd1	2,50	3,00	2,75	CL	16,91	30,50	15,00	15,50	0,12				1,95	1,66	2,76											0,178	0,039
	7	SH	Qd1	3,00	3,50	3,25		20,60								2,04	1,69					1,954								
	8	SH	Qd1	3,50	4,00	3,75	CL	22,48	38,30	16,60	21,60	0,27				1,94	1,58	2,71					0,18	21,80						
	9	SS	Qd1	4,00	4,45	4,23										2,15														
	10	NX	Qd1	5,00	5,60	5,30							100,00	0,00	0,00	2,36			0,00											
	11	SS	Qd1	5,60	6,05	5,83												2,74												
	13	NX	Tpb-A1	7,15	8,00	7,58							100,00	0,00	0,00				0,00											
	14	NX	Tpb-L2	8,10	9,00	8,55							0,80	35,70	63,50	2,19			63,50											
3	3	SH	Qd2	1,00	1,50	1,25	CL	29,30	37,40	23,40	14,00	0,42				1,85	1,43					1,014								
	4	SH	Qd2	1,50	2,00	1,75	CL	22,60	41,30	22,30	19,00	0,02				2,00	1,63	2,75				0,075								
	5	SS	Qd2	2,00	2,45	2,23										1,95		2,75												
	6	SH	Qd2	3,50	4,00	3,75	CL	20,70	29,80	15,00	14,80	0,39				2,06	1,71	2,67				0,211								
	7	SS	Qd2	4,00	4,45	4,23										2,12														
	8	SH	Qd2	5,00	5,50	5,25	CL	22,70	45,00	22,00	23,00	0,03				2,05	1,67						0,14	27,20	0,13	22,71				
	9	SS	Qd2	5,50	5,95	5,73	CL	21,50	44,40	21,00	23,50	0,02				2,03		2,74												
	10	SH	Tpb-L1	7,00	7,30	7,15	CL	8,86	40,30	19,00	21,30	-0,48				1,91	1,75						0,50	40,96						
	11	SS	Tpb-L1	7,30	7,60	7,45		13,60								2,06	1,81													
4	3	NX	Tpb-L2	0,90	1,80	1,35		3,00								2,48	2,41													
	4	NX	Tpb-L2	1,80	2,50	2,15										2,54					51,03									
	5	NX	Tpb-L2	2,50	3,40	2,95										2,50					53,47									
	6	NX	Tpb-L2	3,40	4,30	3,85		4,00								2,57	2,47				52,23									

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.11 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO (CONTINUACIÓN)

SONDEO	MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	MATERIAL	PROFUNDIDAD (m)			USCS	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	%G	%A	%F	γ_t (Ton/m³)	γ_d (Ton/m³)	Gs	PT200 (%)	q_u Penetrómetro (Kg/cm²)	$q_{u\ ROCA}$ (Kg/cm²)	$q_{u\ suelo}$ (Kg/cm²)	c' (Kg/cm²)	ϕ' (°)	c'residual (Kg/cm²)	ϕ'residual (°)	Expansión Lambe		Cc	Cr
				de	a	media																					Esfuerzo (Kg/cm²)	Estado		
5	2	SS	Qra1	1,20	1,65	1,43		20,10								2,16 - 2.20	1,80 - 1,83			2,80										
	3	SS	Qra1	1,70	2,15	1,93	CL	22,32	35,59	18,86	16,73	0,21	9,00	16,50	74,50	2.07 - 2.08	1,69 - 1,70		74,50	2,75										
	3A	SH	Qra1	2,30	2,60	2,45	CL	19,31	34,46	18,10	16,36	0,07				2,09	1,76			1,75			0,25	20,57						
	5	SS	Qra1	3,55	4,00	3,78	CH	35,38	54,43	25,74	28,69	0,34				1.91 - 1.93	1,41 - 1,43			2,90										
	6	SS	Tpb-L-sr	4,05	4,50	4,28																								
	7	SS	Tpb-L-sr	4,55	5,00	4,78	CL	14,56	36,10	18,28	17,82	-0,21				2,09	1,82			>4,5		3,184								
	8	SS	Tpb-L1	5,05	5,30	5,18		7,89								2.17 - 2.26	2,01 - 2,10			>4,5										
6	2	SS	Qra1	0,60	1,05	0,83	CL	10,77	37,10	17,69	19,41	-0,36				2.06 - 2.16	1,86 - 1,95													
	3	SS	Qra1	1,55	2,00	1,78																								
	4	SS	Qra1	2,05	2,50	2,28	CL	11,30	34,40	17,86	16,54	-0,40				2.28 - 2.34	2,05 - 2,10													
	5	SS	Qra1	2,55	3,00	2,78		6,79					0,00	1,80	98,20				98,20	>4,5										
	6	SS	Qra1	3,55	4,00	3,78																								
	7	SS	Qra1	4,05	4,50	4,28	CL	9,93	34,26	17,24	17,02	-0,43				2.02 - 2.13	1,84 - 1,94			1,70										
	8	SS	Qra1	5,50	6,00	5,75	CL	14,17	32,87	15,35	17,52	-0,07				2.07 - 2.15	1,81 - 1,88			2,50										
	10	NQ	Tpb-A2	6,12	6,80	6,46		5,25					0,00	9,70	90,30	1.97 - 2.11	1,87 - 2,01		90,30	>4,5										
	12	NQ	Tpb-L3	6,82	8,80	7,81																								
	15	NQ	Tpb-L3	10,50	10,60	10,55		6,89								2.14 - 2.33	2,00 - 2,18													
7	2	SS	Qra1	1,05	1,50	1,28		5,83								1.94 - 2.04	1,83 - 1,93													
	4	SS	Qra1	2,05	2,50	2,28		8,09								2.17 - 2.27	2,01 - 2,10			>4,5										
	5	SS	Qra1	2,55	3,00	2,78																								
	6	SS	Tpb-L2	3,05	3,20	3,13		6,91								2,04 - 2,30	1,91 - 2,15													
8	2	SS	Qra1	0,55	1,00	0,78	CL	13,22	40,91	16,87	24,04	-0,15				2,18	1,93			>4,5										
	4	SS	Qra1	1,55	2,00	1,78																								
	6	SS	Qra1	2,25	2,70	2,48		13,21					1,90	7,90	90,20	2.10 - 2.17	1,86 - 1,92		90,20	2,30										
	8	SS	Tpb-A2	3,25	3,70	3,48	CL	16,90	32,13	17,58	14,55	-0,05				2.12 - 2.17	1,81 - 1,86			>4,5										

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.12 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO (CONTINUACIÓN)

SONDEO	MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	MATERIAL	PROFUNDIDAD (m)			USCS	w_n (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	%G	%A	%F	γ_t (Ton/m³)	γ_d (Ton/m³)	Gs	PT200 (%)	q_u Penetrómetro (Kg/cm²)	$q_{u\ ROCA}$ (Kg/cm²)	$q_{u\ suelo}$ (Kg/cm²)	c' (Kg/cm²)	ϕ' (°)	c'residual (Kg/cm²)	ϕ'residual (°)	Expansión Lambe		Cc	Cr
				de	a	media																					Esfuerzo (Kg/cm²)	Estado		
9	2	SS	Qra1	1,15	1,60	1,38	CL	19,53	33,97	17,13	16,84	0,14				1.97 - 2.00	1,65 - 1,67			1,63										
	3	SS	Qra1	1,65	2,10	1,88																								
	4	SS	Qra1	3,05	3,50	3,28	CL	16,82	35,10	20,65	14,45	-0,27				1.90 - 2.01	1,63 - 1,72													
	5	SS	Qra1	3,55	4,00	3,78																								
	6	SS	Qra1	4,05	4,50	4,28	CL	13,76	30,74	17,66	13,08	-0,30				2.02 - 2.11	1,78 - 1,86			1,70										
	7	SS	Qra1	5,55	6,00	5,78																								
10	2	SS	Qra1	0,55	1,00	0,78	CL	7,17	27,66	16,37	11,29	-0,81				2.13 - 2.19	1,99 - 2,04			2,10										
	4	SS	Qra1	1,55	2,00	1,78																								
	6	SS	Qra1	3,25	3,70	3,48	CL	17,24	36,16	19,83	16,33	-0,16				2.00 - 2.08	1,71 - 1,77			1,20										
	7	SS	Qra1	3,75	4,20	3,98																								
	8	SS	Qra1	4,55	5,00	4,78																								
	9	SS	Qra1	5,05	5,50	5,28	CL	13,33	33,54	16,62	16,92	-0,19				2.04 - 2.10	1,80 - 1,85			2,20										
	11	NQ	Tpb-L3	6,07	7,90	6,99		3,16								2,40	2,33				47,50						1,12	Marginal		
11	2	SS	Qra1	0,45	0,90	0,68																								
	4	SS	Qra1	1,35	1,80	1,58	CL	14,70	38,20	18,90	19,30	-0,22				2,19	1,91													
	6	SS	Qra1	2,25	2,70	2,48							15,60	25,40	59,00	2,07			59,00											
	8	SS	Tpb-L1	3,15	3,50	3,33	CL	19,30	35,10	18,10	16,90	0,07	12,10	21,10	66,70	2,10	1,76		66,70											
Ap2	1	BL	Qra1	0,30	0,60	0,45	CL	9,80	33,50	16,50	17,00	-0,39				2,19	1,99	2,68				1,87					0,57	No crítico	0,11	0,027
Ap3	1	BL	Tpb-L-sr	0,50	0,80	0,65	CL	3,30	27,60	13,90	13,70	-0,77	0,00	11,10	88,90	2,54	2,46		88,90		107,00		0,16	24,10	0,04	23,05 (21,73)				
	2	BL	Qra1	0,10	0,40	0,25	CL	11,10	33,30	15,90	17,40	-0,28				2,21	1,99						0,39	25,70	0,23	25,70				
Ap5	1	BL	Qra1	1,10	1,50	1,30	CL	10,20	36,30	16,80	19,50	-0,34	0,60	13,00	86,40	2,15	1,95		86,40			2,54					0,74	No crítico		
Ap6	1	BL	Tpb-L2	0,30	0,65	0,48										2,49					103,00									
Ap8	1	SS	Qra1	1,40	1,60	1,50	CL	10,60	34,50	15,50	19,00	-0,26	0,00	12,10	87,90	2,33	2,18	2,70	87,90										0,081	0,03
Ap9	1	BL	Tpb-L-sr	0,45	0,70	0,58	CL	9,70	32,50	15,70	16,80	-0,36				2,30	2,10						0,40	28,80	0,09	26,09				
	2	BL	Tpb-L2	0,70	1,00	0,85										2,48					44,00									
	3	BL	Qra3	0,30	0,40	0,35	SC	6,30	NL	NP			16,50	55,70	27,80				27,80											
T1	2	BL	Qra1	1,00	1,30	1,15	CL	29,40	45,90	21,60	24,30	0,32				1,93	1,49					1,46	0,18	28,50	0,06	34,00				
T4	1	BL	Qra1	-	-	-	CL	5,60	33,20	16,10	17,10	-0,61	6,20	19,60	74,20				74,20											
T5	1	BL	Tpb-L3	0,40	0,70	0,55										2,59					85,00									
E10	1	BL	Tpb-A1	-	-	-										2,10							0,19	30,30	0,12	30,00				
E11	1	BL	Tpb-A2	-	-	-										2,29					90,00		0,18	31,30	0,11	29,94				

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.13 CARGA PUNTUAL

SONDEO - MUESTRA	UNIDAD	ESPECIMEN No.	L (cm)	D (cm)	W (cm)	De (cm)	De2 (cm2)	P (Kgf)	Is (Kgf/cm^2)	$F_{corrección}$	Is_{50} (Kgf/cm^2)	Is_{50} (Kgf/cm^2)	σ_u (Kgf/cm^2)
E11-M1	Tpb-A2	1	9.40	4.20	8.60	6.78	45.99	128	7.27	1.15	8.34	6.29	151.05
		2	6.21	5.61	7.60	7.37	54.29	106	3.38	1.19	4.02		
		3	7.79	4.00	8.10	6.42	41.25	125	7.79	1.12	8.72		
		4	4.47	5.72	5.41	6.28	39.40	146	4.47	1.11	4.95		
		5	8.60	4.00	6.20	5.62	31.58	164	10.28	1.05	10.83		
		6	8.61	4.61	7.20	6.50	42.26	117	5.52	1.13	6.21		
		7	7.30	5.02	5.84	6.11	37.33	175	6.96	1.09	7.62		
		8	11.00	5.72	4.82	5.92	35.10	132	4.03	1.08	4.35		
		9	9.80	6.20	7.75	7.82	61.18	128	3.34	1.22	4.09		
		10	8.02	6.41	6.53	7.30	53.29	132	3.21	1.19	3.81		
AP6-M1	Tpb-L2	1	11.60	4.75	6.95	6.48	42.03	77	3.43	1.12	3.86	5.11	122.63
		2	11.90	5.60	6.75	6.94	48.13	190	6.05	1.16	7.01		
		3	12.20	8.62	7.30	8.95	80.12	201	2.70	1.30	3.51		
		4	10.51	7.77	6.00	7.70	59.36	164	2.72	1.21	3.30		
		5	9.01	6.01	7.05	7.34	53.95	143	3.95	1.19	4.70		
		6	10.72	5.40	8.30	7.55	57.07	99	3.40	1.20	4.09		
		7	9.51	4.51	9.15	7.25	52.54	99	4.88	1.18	5.77		
		8	9.80	4.32	7.80	6.55	42.90	143	7.65	1.13	8.64		
T5-M1	Tpb-L3	1	7.40	6.20	9.60	8.71	75.78	103	2.68	1.28	3.44	3.86	92.57
		2	11.40	5.11	9.35	7.80	60.83	103	3.94	1.22	4.81		
		3	10.44	5.74	6.70	7.00	48.97	77	2.35	1.16	2.73		
		4	11.59	5.00	6.19	6.28	39.41	88	3.53	1.11	3.91		
		5	10.10	5.81	7.49	7.44	55.41	114	3.37	1.20	4.03		
		6	10.80	7.51	15.12	12.02	144.58	117	2.08	1.48	3.09		
		7	11.12	5.00	10.80	8.29	68.75	99	3.97	1.26	4.98		
AP9-M2	Tpb-L	1	11.36	5.16	7.75	7.14	50.92	186	7.00	1.17	8.21	10.90	261.66
		2	11.17	3.86	0.39	1.38	1.92	237	15.91				
		3	7.59	5.06	5.32	5.85	34.27	212	8.27	1.07	8.88		
		4	8.23	4.86	8.21	7.13	50.80	197	8.35	1.17	9.79		
		5	10.16	3.90	8.01	6.31	39.77	230	15.11	1.11	16.77		
		6	7.54	4.32	8.20	6.72	45.10	215	11.53	1.14	13.17		
		7	8.32	4.89	8.11	7.11	50.49	175	7.33	1.17	8.59		
E10-BL1	Tpb-A1	1	9.00	7.50	8.30	8.90	79.26	128	2.28	1.30	2.96	4.09	98.10
		2	9.00	7.00	9.20	9.06	82.00	106	2.17	1.31	2.83		
		3	10.60	6.75	7.05	7.78	60.59	125	2.73	1.22	3.33		
		4	8.10	7.35	8.60	8.97	80.48	146	2.71	1.30	3.53		
		5	9.85	6.80	6.80	7.67	58.87	164	3.04	1.21	3.69		
		6	12.00	7.50	7.50	8.46	71.62	117	4.48	1.27	5.68		
		7	7.80	7.25	9.00	9.11	83.08	175	3.34	1.31	4.38		
		8	13.39	5.50	9.80	8.28	68.63	132	4.36	1.26	5.47		
		9	11.70	5.78	10.31	8.71	75.87	128	3.84	1.28	4.93		

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 1: QRA1 Y QRA2

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		CL	
Contenido de Humedad, w (%)		3.30 - 35.38	Bajo a medio
Límite Líquido, LL (%)		27.6 - 54.43	Bajo a medio*
Índice de Plasticidad, IP (%)		11.29 - 28.69	Bajo a medio**
Gravedad Específica, Gs		2.68 – 2.70	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)		1.90 - 2.28	
Peso Unitario Seco (Ton/m^3)		1.41 - 2.46	
Granulometría	G (%)	0 -15.60	
	A (%)	11.10 - 25.40	
	F (%)	59 – 98.20	
Resistencia a la Compresión Simple, q_u (Kg/cm^2)		1.014 - 2.540	Firme a muy firme
Coeficiente de Compresión, Cc		0.11	
Coeficiente de Recompresión, Cr		0.03	
Esfuerzo de Expansión (Kg/cm^2)		0.57 - 0.74	No crítico
Cohesión, c (Kg/cm^2)		0.10 (CD, S1M5) - 0.40 (CD, AP3M2)	
Angulo de Fricción, ϕ (°)		24.10 (CD, AP3M1) – 34.70 (CD, S1M5)	
Cohesión Residual, c_r (Kg/cm^2)		0.04 (CD) – 0.06 (CD)	
Angulo de Fricción Residual, ϕ_r (°)		23.05 (CD) – 26.09 (CD)	

*FUENTE: GÓMEZ N. JOSÉ (2008). "NOTAS DE CLASE". **FUENTE: SOWERS G. F. (1979), CITADO POR KULHAWY AND MAYNE (1990)

4.2.1.2 MATERIAL 2: RELLENOS ANTRÓPICOS TRASLOCADOS, Q_{D1} Y Q_{D2}

Integran los cuerpos principales de los deslizamientos. Son matriz soportados, mal gradados, arcillosos, e idénticos en su composición y en sus propiedades índice al Qra1, pero difieren de él en los parámetros de resistencia, los que están más ligados a los residuales. El deterioro acelerado de la masa en los últimos meses, y las deformaciones acumuladas, que superan el 12%, por lo menos en el Qd1, así lo ratifican. Su espesor toca los 7.00 metros; su color dominante es el café claro, aunque encierra diversidad de matices: negros, rojos, violeta y grises; su consistencia es media, su compresibilidad y su plasticidad son bajas, y se clasifican como CL. En la *Tabla 4.15* se relacionan sus características más relevantes.

4.2.1.3 MATERIAL 3: RELLENOS ANTRÓPICOS SELECCIONADOS, QRA3

Bajo esta designación se conjugan las acumulaciones de material seleccionado, compactado al 90% del proctor modificado, que dan vida a la estructura de pavimento (base y subbase) de la calle 31 sur. Yacen cubiertas por una capa de concreto, con espesor inferior a los 0.50m, pormenor que inhibió su investigación

geotécnica. Son areno-gravosos, bien gradados, su humedad es baja a media, y su compacidad es densa. Descansan en rampas con 13% de pendiente distantes de la urbanización y del alto relieve. Su peso unitario es cercano a los 1.80 Ton/m^3 y sus coeficientes de resistencia pueden fijarse en: c'= 0 Ton/m^2 y ϕ'= 32º (datos asumidos). Algunos de sus parámetros geomecánicos se relacionan en la *Tabla 4.16*.

TABLA 4.15 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 2: QD1 Y QD2

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		CL	
Contenido de Humedad, w (%)		9.50 – 29.30	Bajo
Límite Líquido, LL (%)		25.9 - 45	Bajo a medio*
Índice de Plasticidad, IP (%)		11.30 - 23.50	Bajo a medio**
Gravedad Específica, Gs		2.67 - 2.76	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m3)		1.85 - 2.11	
Peso Unitario Seco (Ton/m3)		1.43 - 1.84	
Granulometría	G (%)	6.60 – 11.60	
	A (%)	0 - 41.50	
	F (%)	46.80 - 58.30	
Resistencia a la Compresión Simple, qu (Kg/cm2)		0.191 – 1.014	Muy blanda a media
Coeficiente de Compresión, Cc (Kg/cm2)		0.18	
Coeficiente de Recompresión, Cr		0.04	
Cohesión, c (Kg/cm2)		0.06 (SPT) – 0.20 (CD, S1M10)	
Ángulo de Fricción, □ (°)		15.70 (CD, S1M10) - 34.70 (CD, S1M5)	

* FUENTE: GÓMEZ N. JOSÉ (2008). ** FUENTE: SOWERS G. F. (1979), CITADO POR KULHAWY AND MAYNE (1990)

TABLA 4.16 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 3: QRA3

PROPIEDAD	VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)	SC	
Contenido de Humedad, w (%)	6.30	Bajo*
Límite Líquido, LL (%)	NL	No líquido
Índice de Plasticidad, IP (%)	NP	No plástico
Peso unitario Húmedo (Ton/m3)	1.90	(Tomado del Qra1)
Peso Unitario Seco (Ton/m3)	1.63	(Tomado del Qra1)
Cohesión, c (Kg/cm2)	0	
Angulo de Fricción, □ (°)	32	

* FUENTE: GÓMEZ N. JOSÉ (2008)

4.2.1.4 MATERIAL 4: DEPÓSITOS ANTRÓPICOS DE SOBRETAMAÑOS, QRA4

Responde a las acumulaciones de roca (v.g lodolitas y areniscas) de origen antrópico, hechas durante o posterior a las fases de explotación de la ladrillera. Están localizados hacia el borde occidental del predio, adosados a la base de la ladera; puntualmente alcanzan espesores de hasta 2 m y sobreyacen al nivel de lodolitas Tpb-L3. Debido a su disposición morfológica (diagramados en superficies con muy bajo ángulo de inclinación), y a su variación temporal, inferior a los dos años, distan de jugar papel importante como gestores de los procesos de remoción en masa, razón por la que no se caracterizaron física ni geomecánicamente.

4.2.1.5 MATERIAL 5: DEPÓSITOS FLUVIOTORRENCIALES, QFT

Son en su matriz de areno-limosa a areno-arcillosa, encierran en su estructura fragmentos líticos, desde bloques métricos hasta cantos, subangulares a subredondeados, de areniscas cuarzosas, blancas, bien litificadas, de cemento silíceo, de resistencia media a moderadamente dura y de grano fino. Su humedad es media y su compacidad es media a densa. Exhiben tonalidades amarillas o grisáceas, con manchas de color naranja a rojizo y con alto contenido de óxido de hierro. Residen en el perímetro oriental del predio, con espesores inferiores al metro. Exponen como principales atributos mecánicos los señalados en la *Tabla 4.17*, atributos extrapolados por su similitud morfológica y de composición de la parte baja de la vertiente oriental del Rio Tunjuelito, localidad de Usme (estudio llevado a cabo por GIA, en el año 2008).

TABLA 4.17 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 5: QFT

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (UCS)		SC	-----
Contenido de humedad, w (%)		18.5	Medio*
Límite líquido, LL (%)		28.2	Bajo*
Índice de plasticidad, IP (%)		12.7	Bajo**
Peso unitario Húmedo (Ton/m3)		2.003	-----
Peso Unitario Seco (Ton/m3)		1.693	-----
Granulometría	G (%)	0.0	-----
	A (%)	61.2	-----
	F (%)	38.8	-----
Cohesión, c (Ton/m2)		0.11 (CD)	------
Angulo de fricción, □ (°)		35 (CD)	------

TOMADO DE GIA (2008)

* FUENTE: GÓMEZ N. JOSE (2008). ** FUENTE: SOWERS G. F. (1979), CITADO POR KULHAWY AND MAYNE (1990)

4.2.1.6 MATERIAL 6: SUELOS RESIDUALES $Q_{TPB-L-SR}$

Si bien genéticamente provienen de materiales diferentes, la composición de su matriz –predominantemente arcillosa-, y la similar respuesta mecánica del esqueleto mineral permitieron agruparlos como un solo material.

Responden a suelos arcillosos, propios del horizonte IC y IIA de Deer y Patton (1971), que contienen fragmentos de roca del tamaño gravas, provenientes de la arcillolita. Ocupa el corredor central de la urbanización, y reposan cubiertos por los rellenos antrópicos de reconformación o por los rellenos traslocados en capas de menos de un metro, según lo ratifican el apique AP-3 y el AP-9, y las perforaciones S-1 y S-5. Exhiben colores desde rojo hasta violeta con manchas habanas y grises. Tienen plasticidad media, humedad de baja a media y consistencia dura. Se clasifican como CL (según la USCS). En la *Tabla 4.18* se definen sus parámetros relevantes.

TABLA 4.18 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 6: QTPB-L-SR

PROPIEDAD	VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)	CL	
Contenido de Humedad, w (%)	9.93 – 14.56	Medio*
Límite Líquido, LL (%)	33.30 – 36.10	Medio*
Índice de Plasticidad, IP (%)	17.02 – 17.82	Medio**
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)	2.02 – 2.48	
Peso Unitario Seco (Ton/m^3)	1.82 – 1.99	
Resistencia a la Compresión Simple, q_u (Kg/cm^2)	3.184	Muy firme
Cohesión, c (Kg/cm^2)	0.39 (CD)	
Angulo de Fricción, ϕ (°)	25.70 (CD)	
Cohesión Residual, c_r (Kg/cm^2)	0.16 (AP3M1) – 0.40 (AP9M1)	
Angulo de Fricción Residual, ϕ_r (°)	24.10 (AP3M1) – 28.80 (AP9M1	

* FUENTE: GÓMEZ N. JOSÉ (2008). ** FUENTE: SOWERS G. F. (1979), CITADO POR KULHAWY AND MAYNE (1990)

4.2.2 MACIZO ROCOSO

Está integrado por las unidades líticas de la Formación Bogotá, principalmente por intercalaciones de lodolitas y areniscas diseminadas a lo largo y ancho de las superficies libres. Sus espesores variables en esencia, divagan desde el metro m hasta los 20 m (expresión marcada por la unidad Tpb-L1). A continuación se reseñan las propiedades de las unidades de roca, de los planos de discontinuidad y del macizo rocoso.

4.2.2.1 MATERIAL ROCOSO

4.2.2.1.1 Material 7: Lodolitas de la Formación Bogotá, T_{PB-L}

En esta denominación se integran cuatro grandes horizontes de arcillolitas y limolitas-arcillosas, de composición silícea, diferenciados en su litología y en su grado de litificación, denominados Tpb-L1, Tpb-L2, Tpb-L3 y Tpb-L4. Su color es violeta con vetas gris o gris con manchas y vetas rojas o violetas. Son de humedad baja a media y de resistencia blanda a moderadamente blanda.

Enmarcan buena parte de la columna estratigráfica y la base de los sondeos S-1 a S-4 y S-5, S-7, S-9, S-10, S-11 y S-12. En otras palabras son los elementos constitutivos por excelencia de la mayor parte de las laderas vertientes. Son los cuerpos rocosos de mayor resistencia y de mayor potencial de degradación; su ángulo de fricción básico bordea los treinta grados y su respuesta mecánica está regida por los planos de discontinuidad, especialmente por la estratificación. Son los receptores de los potenciales procesos de inestabilidad, y en ellos se esculpen los cortes de mayor altura.

A pesar de las diferencias constitutivas, sus propiedades mecánicas y algunas físicas como el color y el tipo de matriz, parecen responder a un mismo universo, salvo por sutiles cambios en el ángulo de fricción. La *Tabla 4.19* condensa algunas de las más importantes.

TABLA 4.19 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 7: TPB-L

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		CL	
Contenido de Humedad, w (%)		3.0 - 19.3	Bajo a medio
Límite Líquido, LL (%)		N.L. - 35.10	Bajo a medio
Índice de Plasticidad, IP (%)		16.9	Medio
Gravedad Específica, Gs		2.64	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)		2.04 – 2.59 (2.25 promedio)	
Peso Unitario Seco (Ton/m^3)		1.76 – 2.47	
Granulometría	G (%)	0.80 - 12.10	
	A (%)	21.10 – 35.70	
	F (%)	63.50 – 66.70	
Resistencia a la Compresión Simple, σ_c (Kg/cm^2)		47.5 – 261.7	Blanda a moderadamente dura*
Esfuerzo de Expansión (Kg/cm^2)		1.12	Marginal**
Cohesión, c (Kg/cm^2)		0.10 (S1M14) – 0.50 (CD, S3M10)	
Angulo de Fricción, ϕ (°)		30.40 (S1M14) – 40.96 (CD, S3M10)	

* FUENTE: ISRM (1981), CITADO POR GONZÁLEZ DE VALLEJO (2004). ** FUENTE: INVIAS (2007)

4.2.2.1.2 Material 8: Areniscas de la Formación Bogotá, T_{PB-A1} y T_{PB-A2}

Son arcillosas, friables, de color blanco amarillento, de grano medio hasta fino, su grado de selección es bueno, su humedad es baja y su resistencia es blanda (ISRM, 1981, citado por González Vallejo, 2004). Debido a su posición estructural; al espacio limitado donde trabajan; a la morfometría en general, definida por la explotación minera (véase el *Plano 4*), ni coadyuvan, ni son gestoras de los procesos morfodinámicos (véase los *Planos 4A* y *4B*). El resumen de sus características geomecánicas básicas se acopia en la *Tabla 4.20*).

TABLA 4.20 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 8: TPB-A

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)		1.97 – 2.29 (2.16 promedio)	
Granulometría	G (%)	100	
	A (%)	0	
	F (%)	0	
Resistencia a la Compresión Simple, σ_c (Kg/cm^2)		98.10 – 151.05	Blanda*
Cohesión, c (Kg/cm^2)		0.18 – 0.19	
Ángulo de Fricción, ϕ (°)		30.3 – 31.3	
Cohesión Residual, c_r (Kg/cm^2)		0.08 – 0.19 (CD, E10M1)	
Angulo de Fricción Residual, ϕ_r (°)		30 (CD, E10M1) – 31.30 (CD, E11M1)	

* FUENTE: ISRM (1981)

4.2.2.2 DISCONTINUIDADES

Descripción Geométrica y física

Las discontinuidades fueron descritas a partir de la información obtenida de los afloramientos, y de las columnas estratigráficas (denominados aquí estaciones de levantamiento estructural), para dar cumplimiento a este objetivo se tomó como base los procedimientos sugeridos por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas, ISRM (1981). Las mediciones en campo alcanzan los 125 datos estructurales (orientación y buzamiento de estratificación y diaclasas) con una cobertura de trece (13) estaciones concentradas en los frentes expuestos. El inventario de los datos obtenidos y las características de las discontinuidades asociadas con ellos, están compilados en el *Anexo B.2*.

La totalidad de las mediciones fue interpretada mediante sus polos y sus vectores directores, con la red de proyección Equiangular y una hoja de cálculo, según la ubicación de las estaciones, la geología, la tendencia de la información y el tipo de dato. El procesamiento de los datos estructurales se llevó a cabo gracias a la aplicación de los métodos de círculo flotante y vectorial (véase la *Figura 4.4*). De allí fue posible precisar la tendencia general de las familias de discontinuidad y concluir que las laderas vertientes pertenecen a una única región estructural o subdominio, constituido por seis familias de discontinuidades, incluida la estratificación, representadas por sus promedios así: E_1= 288/30, D_2= 81/60, D_3= 56/57, D_4= 32/78, D_5= 16/56, D_6= 250/86. El resumen de las familias obtenidas se recopila en la *Figura 4.5*.

Los cambios de polaridad en la estratificación no son significativos, la densidad máxima supera el 20%, expresión que ratifica su confiabilidad. El azimut de buzamiento se enmarca en el dominio [260-325] y el buzamiento en ningún caso supera los 45 o es inferior a los 22, estos dos propios de registros aislados; los modales son: 285 y 30. Respuesta disímil recae en las familias de diaclasas, la dispersión es mayor al punto de tener una alta diseminación estereográfica característica que da pie a suponer una clara influencia tectónica, hipótesis de ninguna manera demostrable, pero latente.

FIGURA 4.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

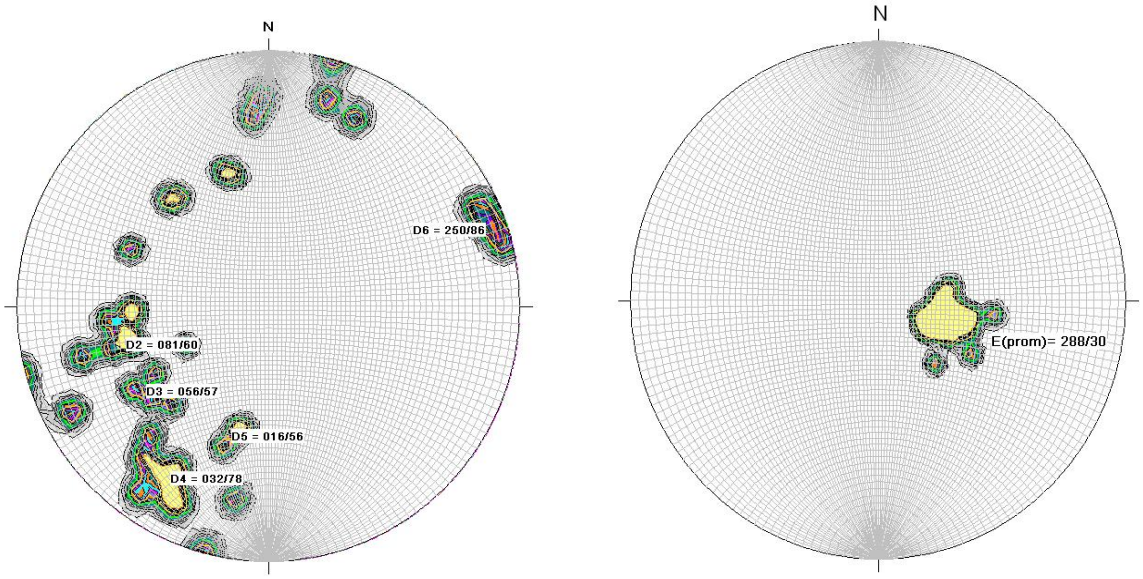
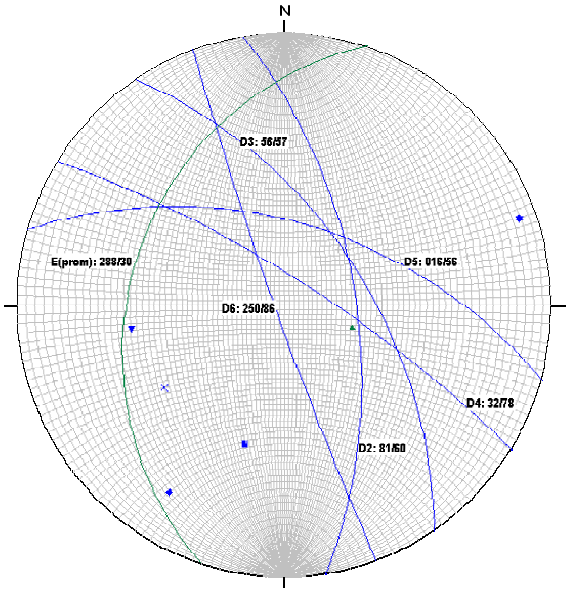


FIGURA 4.5 RESUMEN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES



Las familias de discontinuidades exhiben espaciamientos (S) entre bastante próximas a separadas; persistencia (P) poco continua continuidad media, abertura de cerrada a ligeramente abierta; relleno indeterminado. La rugosidad de las paredes en términos descriptivos puede clasificarse, de acuerdo con la ISRM (1981), como tipo VII y VIII, es decir, plana-rugosa a plana-suave, con valores del JRC entre 2 y 6 si se trata de la estratificación, o v; ondulado rugoso (con JRCs entre 10 y 12) en lo que atañe a las diaclasas. Se

caracterizan por estar secas. El *Anexo B.2* contiene las características de las familias de discontinuidades cuyo levantamiento fue posible en campo.

Características Geomecánicas

Al considerar que las características físicas son similares en todas las discontinuidades, se toman todos los ensayos de corte realizados para las muestras de roca (se reitera que las muestras fueron precortadas). El resumen de datos correspondientes a las propiedades geomecánicas se muestran en la *Tabla 4.21*.

TABLA 4.21 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO

MATERIAL	INTERCEPTO DE COHESIÓN c (Ton/m²)	ANGULO DE FRICCIÓN ϕ (°)
Tpb-A	1.8 – 1.9	30.30 – 31.30
Tpb-L	1.6 – 3.0	24.10 – 30.40

4.2.2.3 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Una vez caracterizados el material rocoso y las discontinuidades, se procedió a la clasificación del macizo rocoso. El cumplimiento de esta tarea se llevo a cabo con base en el Geological Stregth Index, GSI (Hoek, 1976). Sin embargo dada la directa correlación entre el Rock Mass Rating, RMR (Bieniawski, 1976) y el GSI, se planteó el primero como sistema de calibración. Los índices de compresión inconfinada y del espaciamiento son recapitulados de los ensayos de laboratorio y de la caracterización geométrica de las discontinuidades, el primero compilado en la *Tabla 4.11*, *4.12*, y *4.13*, y el segundo ilustrado en el *Anexo B.2*. El RQD se estima bien de los registros de perforación (con valores entre el 30% y el 70%) de los afloramientos con base en correlaciones empíricas como la de Palmstrom, 1975 (en ISMR, 1981, citado por González de Vallejo L.I, 2004 y Salcedo A. D, 1996) y de González de Vallejo L.I (2004) y que versan, respectivamente, así:

$$RQD = 115 - 3.3Jv \quad \text{para } Jv > 4.5 \qquad \text{Ec. 4.6}$$
$$RQD = 100 \quad \text{para } Jv \leq 4.5 \qquad \text{Ec. 4.7}$$

donde Jv: Índice de control volumétrico (No. De diaclasas/metro)

ó

$$RQD \approx 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda+1) \qquad \text{Ec. 4.8}$$

donde λ: Inverso del espaciamiento medio de diaclasas.

En la *Tabla 4.22*, se compilan los extremos de la calificación y clasificación del macizo para ambos sistemas y en la *Tabla 4.25* su distribución espacial y la zonificación del macizo rocoso. Así del ejercicio se desprende que el macizo posee índices de resistencia y RMRs en el dominio [35–45], lo que permite clasificarlo de pobre a regular.

TABLA 4.22 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Región estructural / Criterio de evaluación		Dominio 1		Dominio 1	
σ'_c (Kg/cm^2)	Valor	47,5	261,7	151,0	98,0
	Calificación/15	1	4	2	1
RQD (%)	Valor	30	70	70	30
	Calificación/20	8	13	13	8
S (m)	Valor	0,52	0,9	0,9	0,5
	Calificación/30	20	20	20	20
Estado de las Discontinuidades	Descripción	Medianamente rugosas, separación < 1 mm., la pared es débil	Medianamente rugosas, separación < 1 mm., la pared es débil	Medianamente rugosas, separación < 1 mm., la pared es débil	Medianamente rugosas, separación < 1 mm., la pared es débil
	Calificación/25	12	12	12	12
Agua	Descripción	Húmedo	Húmedo	Húmedo	Húmedo
	Calificación/10	0	0	0	0
RMR	Calificación/100	41	49	47	41
	Descripción	Macizo regular	Macizo regular	Macizo regular	Macizo regular
GSI		35	45	50	35

4.2.2.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MACIZO ROCOSO

Con base en la clasificación del macizo y las propiedades del material rocoso y de las discontinuidades, se establecieron las propiedades mecánicas del macizo con ayuda de la formulación propuesta por Hoek (1996). El método trata la masa como un material isotrópico, homogéneo y elástico (Salcedo, 1996) y utiliza como variables de entrada, el GSI, referido en el numeral 4.2.2.4 la resistencia a la compresión inconfinada (47.50 Kg/cm2 $\leq \sigma_c \leq$ 261.70 Kg/cm2), y una constante mi (equivalente a 9 si son intercalaciones de areniscas y arcillolitas), que depende de las propiedades del material rocoso.

A manera de ejemplo se presenta la deducción de los parámetros de resistencia en la *Tabla 4.23* y en la *Tabla 4.24*. No obstante, los parámetros geomecánicos así obtenidos resultan significativamente superiores a los del universo muestral. Resulta, entonces, más lógico asumir que la respuesta del macizo está gobernada por las discontinuidades y adoptar sus parámetros de resistencia. De esta forma, con miras a los análisis de estabilidad, los parámetros empleados son los consignados para los ambientes arcillosos y arenosos citados en el numeral 4.2.2.1.

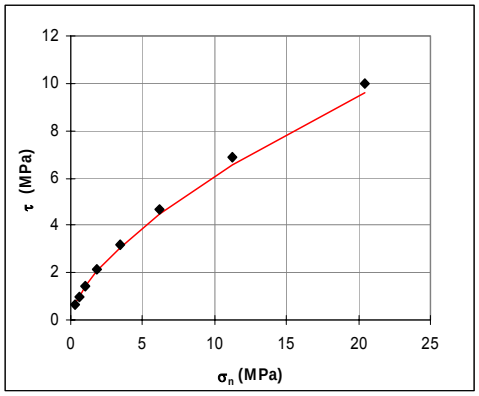
TABLA 4.23 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Datos:

GSI = 45 σ_{ci} (MPa) = 26.1 mi= 9 Material: Areniscas y lodolitas

Resultados

m_b/m_i = 0.14
m_b = 1.262
s = 0.00222
a = 0.50
σ_t = -0.046
A = 1.4
B = 0.64
E = 3831



Ángulo de fricción y cohesión para diferentes esfuerzos normales :

σ_n = 0.2 MPa
τ = 0.43 MPa
ϕ = 58.0 Grados
c = 0.11 MPa

σ_n = 0.5 MPa
τ = 0.85 MPa
ϕ = 48.9 Grados
c = 0.27 MPa

σ_3	σ_1	$\delta\sigma_1 / \delta\sigma_3$	σ_n	$\sigma_n + \sigma_t$	τ	X	Y	XY	X^2	$\tau_{calculado}$
0.10	2.31	8.46	0.34	0.29	0.68	-0.54	-0.17	0.09	0.29	0.70
0.20	3.07	6.74	0.57	0.53	0.96	-0.28	-0.02	0.00	0.08	0.98
0.41	4.27	5.26	1.03	0.98	1.42	-0.01	0.15	0.00	0.00	1.42
0.82	6.14	4.09	1.86	1.82	2.12	0.26	0.33	0.08	0.07	2.08
1.63	9.06	3.22	3.39	3.35	3.16	0.52	0.50	0.26	0.28	3.05
3.26	13.70	2.58	6.18	6.13	4.69	0.79	0.67	0.53	0.62	4.47
6.53	21.24	2.12	11.24	11.20	6.87	1.05	0.84	0.88	1.10	6.55
13.05	33.82	1.79	20.49	20.44	9.96	1.31	1.00	1.31	1.72	9.60
						Σ= 3.11	3.30	3.16	4.15	

Adaptado de Hoek, 1994

4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Previo a los análisis de estabilidad y con el fin de facilitar la labor de asignación de la probabilidad de falla, se establecieron zonas de comportamiento geotécnico similar tanto en la conformación como en la dinámica de las laderas, lo que se logró una vez sintetizada la información geológica, geomorfológica, y geotécnica. Los criterios de zonificación responde a: la forma, la génesis, la litología, la pendiente, la condición estructural y el estado del macizo rocoso (gracias al empleo del GSI como bastión y trascrito en la *Tabla 4.25*).

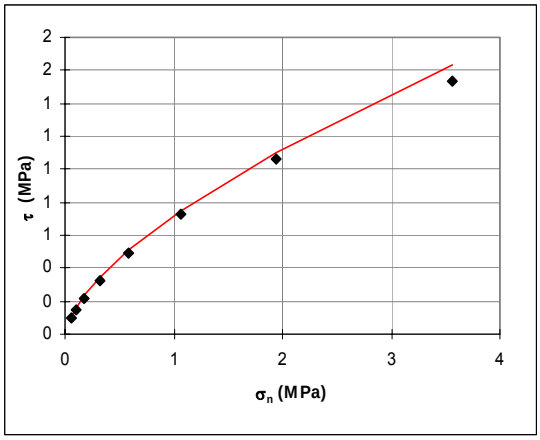
TABLA 4.24 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO (CONTINUACIÓN)

Datos:

GSI = 35 σ_{ci} (MPa) = 4.75 mi= 9 Material: Areniscas y lodolitas

Resultados

m_b/m_i = 0.10
m_b = 0.883
s = 0.00073
a = 0.50
σ_t = -0.004
A = 0.7
B = 0.65
E = 919



Ángulo de fricción y cohesión para diferentes esfuerzos normales :

σ_n = 0.2 MPa
τ = 0.25 MPa
ϕ = 39.3 Grados
c = 0.09 MPa

σ_n = 0.5 MPa
τ = 0.45 MPa
ϕ = 30.6 Grados
c = 0.16 MPa

σ_3	σ_1	$\delta\sigma_1 / \delta\sigma_3$	σ_n	$\sigma_n + \sigma_t$	τ	X	Y	XY	X^2	$\tau_{calculado}$
0.02	0.33	7.83	0.05	0.05	0.10	-1.31	-1.01	1.32	1.71	0.11
0.04	0.45	6.06	0.10	0.09	0.14	-1.04	-0.84	0.87	1.07	0.16
0.07	0.65	4.66	0.18	0.17	0.22	-0.77	-0.66	0.51	0.59	0.23
0.15	0.95	3.62	0.32	0.32	0.33	-0.50	-0.48	0.24	0.25	0.34
0.30	1.42	2.87	0.59	0.58	0.49	-0.23	-0.31	0.07	0.05	0.51
0.59	2.18	2.32	1.07	1.07	0.73	0.03	-0.14	0.00	0.00	0.75
1.19	3.42	1.94	1.95	1.94	1.06	0.29	0.03	0.01	0.08	1.10
2.38	5.53	1.66	3.56	3.56	1.53	0.55	0.18	0.10	0.30	1.63
						Σ=	-2.97	-3.23	3.12	4.06

Adaptado de Hoek, 1994

Las cuatro primeras variables están contempladas en las unidades geomorfológicas, que condensan unidades de ladera con morfología, morfogenética, materiales y morfometría similares. La quinta variable (condición estructural) posee poca incidencia debido a que el comportamiento geométrico y mecánico de las familias de discontinuidades es homogéneo y los mecanismos de deslizamiento distan de estar gobernados o condicionados por ellas. Por ultimo, el estado del macizo y su relación directa con el grado de fracturamiento y fallamiento, es en los ambientes rocosos uno de los discriminantes más relevantes; su calificación, estrictamente visual, delinea de manera alguna junto con las expresiones topográficas, el grado de

susceptibilidad ante los fenómenos de remoción en masa. Bajo este marco, las unidades geomorfológicas sufrieron fraccionamientos o unificaciones de acuerdo con su respuesta geotécnica (incluida la dirección potencial de movilización), con su posición espacial, o con el material constitutivo de la cubierta superficial (condicionamiento de especial importancia para los escenarios configurados en los rellenos antrópicos: Qra1, Qd1 y Qd2). La codificación de las zonas conservó la nomenclatura de la unidad geomorfológica original, y se le añadió a cada subdivisión un identificador alfanumérico compuesto por un número romano y por un arábigo: el primero (número romano o letras) reseña el subdominio estructural al que hace parte, y el segundo –arábigo ascendente- en consonancia con la ubicación geográfica o con los cambios topográficos o con los cambios en la calidad del macizo rocoso, v. gr. la unidad "Taludes de relleno antrópico": LEI-tra, se discretizó en LEI-tra-I-1, LEI-tra-I-2, LEI-tra-I-3, LEI-tra-I-4, LEI-tra-I-5, en la que cada una agrupa unidades con mecanismos de falla similar y están separados espacialmente.

Mención particular merece la unidad "Explanación para desarrollo urbanístico", LEI-edu, que se subdividió en: LEI-edu-I-1, LEI-edu-I-2, y LEI-edu-I-3, acorde con el material subyacente y el estado del macizo; los cuerpos potenciales de deslizamiento se gestan y desarrollan exclusivamente en la cubierta de los llenos, indiferentemente del material subyacente, y el estado del macizo carece de repercusión alguna en la gestación de las masas inestables.

La conjunción de los elementos anteriores dio como resultado la división de la porción de la vertiente en veintiún (21) zonas homogéneas, que fueron estudiadas por lo menos con una sección de análisis sí y sólo sí existe la posibilidad de gestación de procesos de inestabilidad. En este sentido las subunidades LEI-tra-I-4, LEI-rep-I-1, LEI-exp-I-1, LEI-exp-I-2 y LEI-exr-I-2, por sus bondades geométricas, traducidas en planicies con buzamientos inferiores a los cuatro grados, talladas en roca o cubiertas con delgados (inferiores a los dos metros) horizontes de lleno, son abstraídas. La sinopsis del trabajo de zonificación se encuentra en la y la *Tabla 4.25* y en el *Plano 7*. Contienen para cada zona homogénea, la unidad y origen geomorfológico, la secuencia litológica, el patrón estructural, el GSI y el o los mecanismos de falla.

4.4 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS FORENSES

Una de las preguntas más frecuentes al observar los daños en las edificaciones, es si la causa recae sólo en los procesos de remoción en masa, o si coexisten otras fenomenologías. Los asentamientos, las deficiencias por capacidad portante, los suelos expansivos y colapsibles, la erosión interna y la desecación surgen como posibles patologías. Sin embargo, la continuidad del perfil estratigráfico arrojada por los sondeos, los apiques y las trincheras; el elevado régimen pluviométrico de esta parte de la ciudad (contrario a los climas secos o semisecos citados por Coduto, 2001); la casi saturación de los llenos (escenario confirmado por los piezómetros y por las muestras individuales en los apiques 2, 3, 8 y 9 (que ostentan grados de saturación cercanos al 77%); la homogénea y regular expresión de las laderas en superficie, libre de bateas o concavidades; la composición dominantemente arcillosa del cuaternario y su contenido de humedad en el límite líquido inferior al 50% (véase la *Tabla 4.10*, la *Tabla 4.11* y la *Tabla 4.12* y la *Figura 4.3*); y el criterio de Clevenger (1958, citado por Das, 2004), representado en pesos unitarios secos superiores a 1.41 ton/m^3 para el Qra1 y el Qd1 (tal como se puede constatar en la *Tabla 4.14* y en la *Tabla 4.15*), desestiman en enfrentarse a suelos colapsibles, a erosión interna y a desecación.

El papel (o la incidencia) de los fenómenos restantes: asentamientos, expansión y anomalías de la cimentación, es pertinente revisarlo.

TABLA 4.25 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

SÍMBOLO ZONA	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	MORFOLOGÍA	ORIGEN	SECUENCIA LITOLÓGICA	DISCONTINUIDADES	GSI	MECANISMOS DE FALLA
LNI-I-1	LNI	Ondulado	Estructural Denudativo	Qra1 Tpb-L1	E1=288/30 D2=81/60 D3=56/57 D4=196/34 D5=16/56 D6=250/86	40-50	Deslizamiento rotacional y traslacional en llenos
LNI-I-2				Qra1 Tpb-A1 Tpb-L2			
LEI-tex-I-1	LEI-tex	Escarpado	Estructural Antrópico	Tpb-L1		40-50	Deslaves, flujos de detritos y deslizamientos rotacionales en las lodolitas alteradas
LEI-tex-I-2				Tpb-L2			
LEI-tex-I-3				Tpb-L3 Tpb-A2			
LEI-tex-I-4				Tpb-L2			
LEI-exp-I-1	LEI-exp	Suave/ Inclinado	Estructural Antrópico	Tpb-A1 Tpb-L2		50	-
LEI-exp-I-2				Tpb-A3 Tpb-L3			
LEI-edu-I-1	LEI-edu	Suavemente inclinado	Estructural Antrópico	Qra1 Tpb-L2		35-45	Deslizamiento rotacional y traslacional en los llenos antrópicos
LEI-edu-I-2				Qra1 Tpb-A2 Tpb-L2			
LEI-edu-I-3				Qra1 Tpb-L1			
LEI-exr-I-1	LEI-exr	Suavemente inclinado	Estructural Antrópico	Qra1 Tpb-A2 Tpb-L			
LEI-exr-I-2				Tpb-A1 Tpb-L2			
LEI-tra-I-1	LEI-tra	Escarpado	Estructural Antrópico	Qra1 Tpb-A1 Tpb-L2			
LEI-tra-I-2				Qra1 Tpb-L1			
LEI-tra-I-3				Qra1 Tpb-L1			
LEI-tra-I-4				Qra1 Tpb-L3			
LEI-tra-I-5							
LEI.rep-I-1	LEI-rep	Suavemente inclinado	Estructural Antrópico	Qra2 Tpb-L3			
LEI-trat-I-1	LEI-trat	Escarpado	Estructural Antrópico	Qd1 Tpb-L1		35-45	Deslizamiento rotacional y flujos de tierra en los llenos traslocados
LEI-trat-I-2				Qd2 Tpb-L1			

4.4.1 CIMENTACIÓN: CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS

Las fallas por capacidad portante están relacionadas con la sobrestimación de la resistencia del suelo o con el incremento en el tiempo de las cargas de diseño (Day, 1999). Lastimosamente, clarificar cual de estos elementos tiene incidencia en Buena Vista dista mucho de ser una tarea expedita; la ausencia del "estudio de suelos" adelantado por la firma constructora así lo deja de relieve. A fe de subsanar este impace se plantea el dimensionamiento (y contrastación) de la cimentación acorde con las propiedades geomecánicas deducidas por GIA (en este estudio) y con el arquetipo materializado, i.e zapatas corridas (o cimientos continuos) y placa de contrapiso. Labor que abarca la deducción de los asentamientos esperados.

El análisis de falla por corte del suelo (representado en la capacidad de carga última) se lleva a cabo, entonces, tanto para condiciones de trabajo estático como pseudoestático, en estados no drenados (TSA o AET) y drenados (ESA, AEE) y modelos unicapa, configurados en el lleno antrópico (Qra1), atmósfera dominante y más crítica en Buena Vista (estrictamente en los módulos de siete y nueve casas). La primera condición involucra la carga de trabajo, entendida como la participación conjunta de las cargas muerta, CM, y viva, CV, (tasadas en 3.70 ton/m para el elemento más cargado, y entre 0.63 ton/m y 2.4 ton/m para los cimientos restantes según lo confirma el *Anexo E.6.2*) sin modificaciones en la geometría de la estructura o del suelo, y sin la contribución del esfuerzo cortante entre el suelo y el cimiento. Y la segunda comprende, además de los reparos anteriores, cambios en la inclinación del cimiento, deducidos a partir de los coeficientes de aceleración horizontal y vertical y fijados como a_h=0.22g (véase la *Tabla 3.6*, capítulo 3) y a_v=0.073g, de la carga y del peso del suelo de fundación, todos ellos factores reductores de la capacidad. Propuesta que deja de lado la variación de las propiedades del suelo de fundación, tal como lo sugiere Das (1993).

Modelamientos amparados en la solución de Prandtl, gestada en el rigor de la teoría de plasticidad, y considerada de borde superior (Azizi F, 2000 y González A J, 1987), y los métodos de Vesic (1973, 1975), De Beer E E (1970), Hansen J. B (1970, 1984), Meyerhoff (1984), Das B. M (1999) y Bowles (1996) se precisan como las mejores aproximaciones a la respuesta mecánica del complejo suelo de fundación-cimiento (i.e. de la capacidad portante) en el marco de la referida solución. Todas apoyadas en las ecuaciones derivadas por Reissner (1924), Caquot y Kerisel (1953) y Vesic (1973): factores de capacidad portante (Nc, Nq y Nγ).

Requerimientos precedidos de una juiciosa selección de los parámetros de resistencia del suelo, en la que la saturación es una de las variables discriminantes, y que condujo al empleo exclusivo tanto de los valores de resistencia al corte no-drenada de los testigos con saturación próxima al cien por cien, en este caso en particular de la muestra 3 del sondeo 3 (caracterizada por cu=5.07 ton/m^2), como de los coeficientes de resistencia mínimos y promedios (i.e en el Qra1),

Los asentamientos se deducen gracias a la aplicación de los principios de las teorías: elástica y de consolidación (propuesta por Terzaghi), pero ajustados por el efecto de aplicación de la carga, es decir por tridimensionalidad y por la distribución no uniforme de los excesos de presión de poros. Los coeficientes de compresibilidad del suelo, Cc y Cr, y su comportamiento esfuerzo-deformación se extrapola del ensayo de consolidación en la muestra 1 del apique 2 (propio del suelo de soporte de las viviendas).

En este sentido y bajo el marco de acción descrito, la posibilidad de falla por capacidad portante es inobjetable en el tiempo: los esfuerzos admisibles, deducidos para un factor de seguridad de 3.0 y estadios de agua abajo de la profundidad de influencia del cimiento, divagan entre los 6.78 Ton/m^2 y los 8.68 Ton/m^2, en

condición estática, o se posicionan en el dominio [6.17 Ton/m^2 – 7.90 Ton/m^2] bajo estimulación sísmica; estadios siempre inferiores al esfuerzo aplicado (próximo a los 12.4 Ton/m^2, aseveración confirmada en el *Anexo C.4*). El equilibrio entre las cargas aplicadas y la capacidad de soporte del suelo, tiene lugar si y solo sí el factor de seguridad estático es de 1.80, y el seudoestático bordee el 1.50, umbral, a todas luces, inferior al factor de seguridad crítico, Fs crít (igual a 1.64, González, 1987). La falla de las viviendas es, entonces, inminente en la medida en que se preserve la geometría del sistema de cimentación vigente hoy día (definido por una zapata continua de 0.30 m de ancho), y el suelo de fundación cambie sus propiedades, es decir se reblandezca (obsérvese el análisis drenado en el *Anexo C.4*); circunstancia en absoluta lejana, máxime si se precisa que el patrón hidrogeológico juega papel trascendente, y las emanaciones de agua en las viviendas (algunas posiblemente ligadas a los cursos de agua borrados) son parte del cotidiano vivir desde los albores de su ocupación o la tabla de agua ocupe la profundidad de influencia (se acerque a la base de la zapata). Sólo se alcanzaría respuesta funcional satisfactoria si el ancho del cimiento se amplia a los 0.60 m., y la tabla de agua se mantiene a tres metros bajo la superficie del terreno hoy día.

Respuesta corroborada por el basculamiento de los módulos, patente en la distorsión angular y en el espaciamiento entre las residencias 39 y 40, y 16 y 17 (de más de 10 cms) por el espaciamiento relativo entre las esquinas del mismo módulo, evidencia calcada por las casas 39 a 46; por la ausencia de grietas principales en la franja media de las edificaciones (indicativas de suelos expansivos); por la marcada concentración de fracturas longitudinales contiguas a los elementos más cargados (véase el *Anexo E.4* y el *Anexo E.6.2*) y el desprendimiento de grietas conjugadas (de menor abertura) transversales en la placa de contrapiso; y por el recurrente deterioro (agrietamiento y basculamiento) de la parte posterior de las casas, receptora de las mayores modificaciones (en construcción) y la de sistema de cimentación más débil o carente de él (tal como lo sugiere el Plano MD 021 E-01 de diseño y lo ratifica la ausencia de refuerzo en la placa de contrapiso y en la viga corrida). Los asentamientos esperados en estas circunstancias apenas alcanzan los cinco (5) centímetros, insuficientes por si solos para dar lugar a deterioro estructural relevante alguno (véase el *Anexo C.4*); las repercusiones en las edificaciones serían ligeras y las grietas (leves en esencia) podrían ser fácilmente reparadas (Day, 1999), paliativos que le restan mérito a este fenómeno como agente contribuyente de los daños en las viviendas. Los resultados, en consonancia, son más que aceptables, si se destaca que el suelo de fundación es blando y que la zapata es insuficiente para las cargas de trabajo.

4.4.2 EXPANSIÓN

La poca, tenue y débil evidencia de esta patología, esbozada en grietas de piso próximas a las entradas (casas 39 a 46) con diferencias altimétricas en sus extremos se diluye (disipa) al repasar los resultados de los ensayos de expansión (Lambe) para las muestras uno de los apiques 2 y 5. En primera instancia los esfuerzos de expansión de 5.7 Ton/m^2 y 7.4 Ton/m^2 son inferiores al esfuerzo transmitido por el cimiento (σ_{APL}= 12.3 Ton/m^3), salvo tal vez por el esfuerzo aplicado por la placa de contrapiso, cercano a los 0.53 Ton/m^2, arreglo que asegura el control del potencial de expansión. En segunda instancia, la lectura del anillo dada en unidades de 10^{-4} pulgadas, reseña que el cambio volumétrico es despreciable, su máximo (en una dirección) es inferior al 0.30%, insuficiente para acarrear daños de importancia en elementos estructurales y no estructurales.

CAPÍTULO 5

HIDROLOGÍA, COBERTURA Y USOS DEL SUELO

CAPÍTULO 5

HIDROLOGÍA, COBERTURA Y USOS DEL SUELO

El agua es el factor más comúnmente asociado con la movilización de los taludes y de las laderas, debido a que la mayor parte de los deslizamientos ocurre después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos, como consecuencia del aumento en las presiones de poros, o como reducción de la succión. El agua produce también alteración y cambios en la estructura de los materiales, erosión y pérdida de la cobertura vegetal, efectos precedentes o subsecuentes a los deslizamientos que subrayan la importancia de: a) conocer el régimen temporal y espacial de la precipitación, su influencia como agente detonante o contribuyente de los fenómenos de remoción en masa, y b) dilucidar la participación de la cobertura vegetal y del uso del suelo como condicionantes en las expresiones morfodinámicas.

5.1 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

5.1.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

A fe de conocer el patrón de respuesta de la precipitación en la porción de la vertiente y de aportar elementos de juicio a la investigación de relación predictiva lluvia-deslizamiento, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Consulta de planchas topográficas. L-50 del IGAC (1977) y SC-11/400 del DAPD (1996).
- Consulta en el IDEAM y en la EAAB-ESP de la información hidrológica de la microcuenca.
- Análisis hidrológico e hidráulico.

En el instituto Geográfico se obtuvo la plancha L-50 a escala 1:2000, que cubre las laderas vertientes receptoras de la urbanización; sobre la plancha se delimitaron las microcuencas, de las corrientes principales. La información cartográfica se complementó con visitas de campo y con el levantamiento topográfico.

En la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogota EAAB-ESP y en el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (Ideam), se recolectó la información hidrometeorológica.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA REGIONAL

Con el objetivo de establecer el comportamiento climático en el barrio Buena Vista, se tomó la información del "Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo" elaborado por el IDEAM

en el año 2007, en este estudio se seleccionaron 26 estaciones meteorológicas a lo largo y ancho de la sabana de Bogotá; para la localidad de San Cristóbal las estaciones incorporadas son: La Vitelma, Tipo CP (Climatológica Principal), y El Delirio, Tipo PG (Pluviográfica), operadas por EAAB-ESP, las características de las estaciones son:

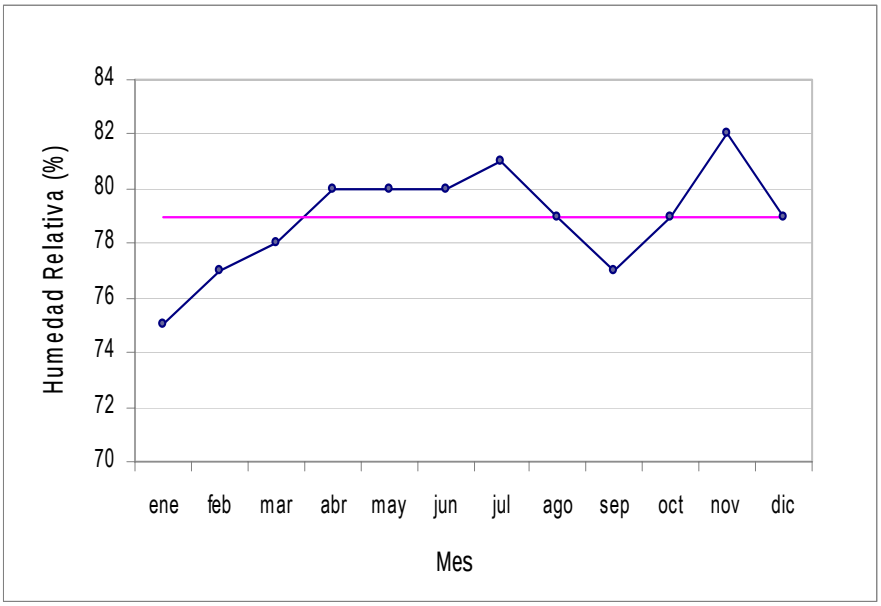
ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	CATEGORIA	ELEVACIÓN	CÓDIGO
EL DELIRIO	04° 33' 9.7" N	74° 03' 33.4 W	PG	2946 MSNM	2120013
VITELMA	04° 34' 31.0" N	74° 04' 18.8 W	CP	2802 MSNM	2120524

5.1.2.1 HUMEDAD RELATIVA

El vapor de agua: humedad, es uno de los componentes de la atmósfera. Es un elemento meteorológico que tiene relación estrecha con la estabilidad atmosférica y por consiguiente con la ocurrencia y distribución de la precipitación.

El comportamiento temporal de la humedad relativa en Buena Vista dibuja los más elevados valores medios en los meses de lluvias altas; i.e. en abril, mayo, junio, julio y noviembre, los menores ocurren en los meses relativamente secos o de bajas lluvias como enero, febrero, marzo y septiembre. En los demás meses la humedad se considera de transición (puesto que hay presencia de masas húmedas y secas). Confirmación expresa reposa en la *Figura 5.1*, construida gracias a los registros medios mensuales multianuales.

FIGURA 5.1 HUMEDAD RELATIVA – ESTACIÓN VITELMA



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.2.2 BRILLO SOLAR

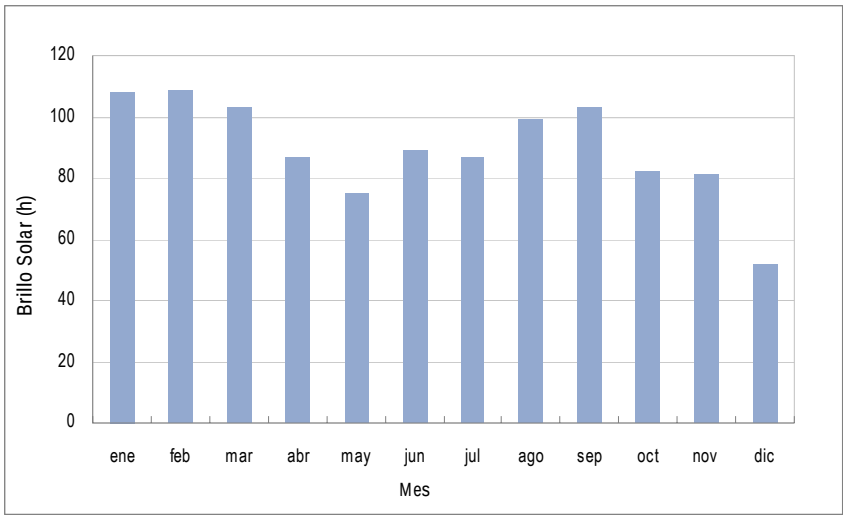
La cantidad de insolación que se recibe es uno de los factores más importantes en la caracterización climática de cualquier zona. Los valores de insolación o brillo solar están relacionados en forma inversa con otros elementos como la nubosidad y la precipitación, conclusión remarcada en la *Figura 5.2*.

El primer rasgo notorio en Buena Vista es el carácter bimodal no acentuado de la distribución temporal, carácter inversamente proporcional al de los periodos lluviosos.

Los mayores valores tienen lugar en los meses de enero, febrero y marzo para la primera temporada del año, y en agosto y septiembre para la segunda temporada.

En Bogotá los más bajos valores de brillo solar, ocurren en la parte baja de los cerros orientales; la estación Vitelma ha registrado el mínimo absoluto con 52 horas en el mes de diciembre, lo que indica la influencia del relieve y por consiguiente la mayor presencia de nubosidad.

FIGURA 5.2 BRILLO SOLAR – ESTACIÓN VITELMA



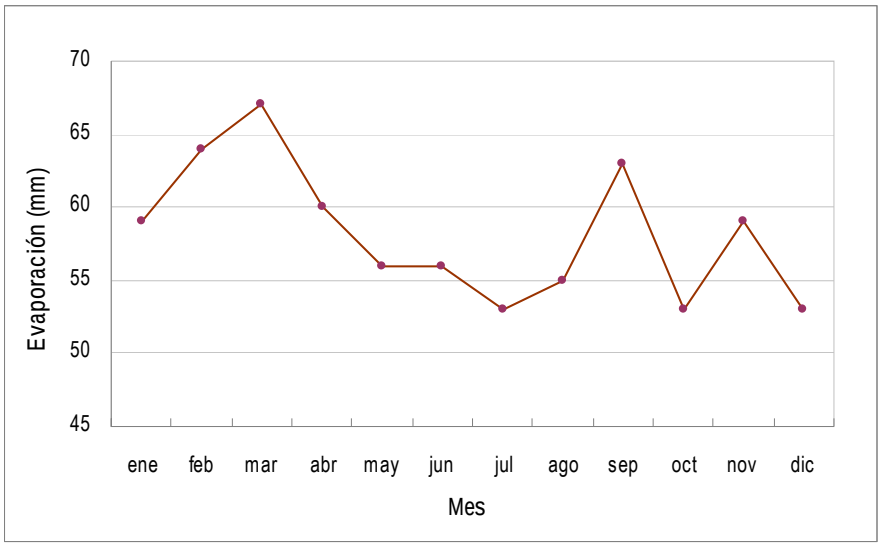
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.2.3 EVAPORACIÓN

La evaporación es un proceso físico por el que el agua líquida de una superficie húmeda o de agua libre, ingresa al aire en forma de vapor a una temperatura por debajo del punto de ebullición. Se define como la cantidad de agua perdida por unidad de superficie en unidad de tiempo, y se mide en milímetros (mm) de agua evaporada. Los picos (máximos) a lo largo del año, en Buena Vista, tienen lugar durante los meses de enero, febrero, marzo, abril y septiembre, en concordancia con los máximos de la radiación solar y en relación inversa con la precipitación y la humedad relativa. Los meses de menor evaporación son: mayo, junio, julio,

octubre y diciembre, considerados lluviosos y por tanto de menor evaporación. La *Figura 5.3*, transcribe el comportamiento descrito y enfatiza la importancia de la primera temporada de agua.

FIGURA 5.3 EVAPORACIÓN – ESTACIÓN VITELMA



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.2.4 PRECIPITACIÓN

La precipitación en los cerros orientales, espacio preferente que alberga a Buena Vista Oriental III Sector dibuja dos patrones claramente diferenciables; el primero cobija el cinturón alto del relieve y es monomodal, condicionado por las lluvias de los llanos orientales y transcrito por la estación El Delirio (*Figura 5.4*); el mes más lluvioso es julio, en el que los registros alcanzan hasta los 168 mm, y el periodo seco se extiende desde diciembre hasta febrero, aunque el valor histórico más bajo, propio de enero, es de 59 mm.

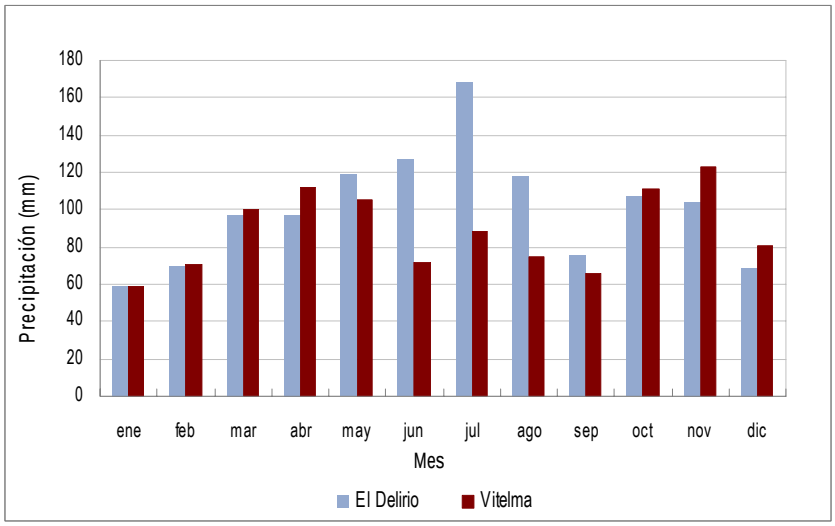
El segundo recorre la base de los cerros, es bimodal no acentuado, esta influenciado por la zona de confluencia intertropical y reproducido por la estación Vitelma (véase la *Figura 5.4*), y es el marco al que pertenece la urbanización. Los periodos lluviosos tienen lugar entre marzo y mayo y octubre y noviembre, con precipitaciones que oscilan desde los 105 hasta los 112 mm para el primer periodo y desde los 111 hasta los 123 mm para el segundo período. Para la temporada seca más acentuada de los meses de enero – febrero, las lluvias oscilan entre 59 y 71 mm respectivamente.

5.1.2.5 PRECIPITACIONES DE CORTA DURACIÓN

La determinación de las características de la precipitación en el diseño de obras hidráulicas, parte de la utilización de una tormenta o evento extremo, que involucre una relación entre su intensidad, en un delta de tiempo, su duración y las frecuencias o periodos de retorno para la obra o el sitio. En ese sentido, las curvas

IDF son representaciones de un evento máximo para un sitio o localidad; con ellas el diseñador, apoyado en criterios técnicos y económicos, establece las obras requeridas para el control y manejo del drenaje.

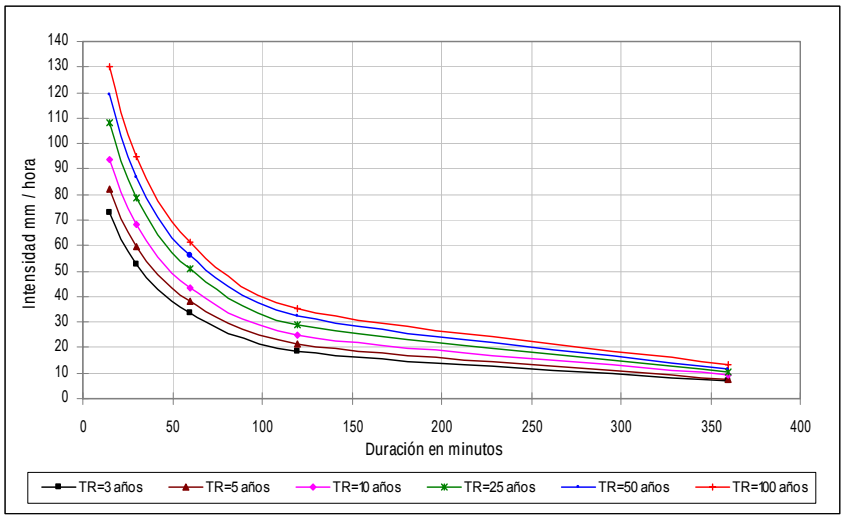
FIGURA 5.4 PRECIPITACIÓN – ESTACIONES VITELMA, EL DELIRIO.



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La curva generalizada IDF Estudio "Análisis y Caracterización de Tormentas en la Sabana de Bogotá;"por firma consultora Ingeniería y Recursos Hídricos Ltda. (1995). En el documento se divide la sabana de Bogotá en 7 zonas, y a cada una se le confiere una curva IDF; Buena Vista hace parte de la zona 2, lo que redunda en la curva característica transcrita en la *Figura 5.5*.

FIGURA 5.5 CURVAS GENERALIZADAS IDF ZONA 2



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

5.1.2.6 DISTRIBUCIÓN MENSUAL DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA

De acuerdo con el estudio realizado por el IDEAM 2007, en los cerros orientales, los meses que registran el mayor número de días con lluvia son mayo, junio, julio y agosto, todos con un promedio de 25 días, los meses con el menor número de días pasados por agua son: enero y febrero: su promedio es menor a 10 días.

5.1.2.7 PRECIPITACIÓN CRÍTICA – DURACIÓN

Para determinar la relación precipitación crítica – duración que disparan movimientos en masa, se utilizó el "Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Inestabilidad del Terreno para Varias Localidades de Santafé de Bogotá", realizado por la firma INGEOCIM (1988) Ltda para la Unidad de Atención y Prevención de Desastres (UPES) de Santafé de Bogotá. El estudio a partir de la lluvia crítica y de su duración particiona a Bogotá en dos zonas

La Suroccidental

$$Llcrit=0.3609*Llan$$

$$D=3.2829*LLCRIT^{0.4157}$$ y los

Cerros Orientales

$$LLCRIT=12.6326+0.1418*LLAN$$

$$D=0.04923*LLCRIT$$

donde:

D = Duración en días
Llcrit = Lluvia crítica en mm
Llan = Lluvia anual en mm

La urbanización hace parte de los cerros orientales, por lo tanto la precipitación crítica es de 200 mm y su duración es de 10 días. Debido a la importancia de estos dos parámetros para la evaluación de amenaza, serán retomados al interior del capítulo 6.

5.1.3 RELACIÓN LLUVIA – DESLIZAMIENTO

Los fenómenos de remoción en masa están asociados con los periodos lluviosos; la precipitación es uno de los factores detonantes de los deslizamientos. La intensidad y la duración de la precipitación, pertinentes para disparar un movimiento, dependen de las condiciones iniciales de humedad y de la posición del nivel freático; estas variables guardan una estrecha relación con la precipitación precedente a que ha estado sometido el talud o la ladera.

El aumento de la humedad del suelo y la posición del nivel freático está influenciado por el factor antrópico. En el proceso de urbanización se elimina la cobertura vegetal y se propenden por el control, no siempre exitoso, del agua superficial y subterránea. Lo anterior repercute en que la erosión hídrica y la infiltración, dan lugar a la formación de frentes erosivos y fenómenos de remoción en masa en laderas intervenidas.

Uno de los procedimientos para encontrar la relación lluvia deslizamiento es: conocidas la frecuencia y las fechas de los eventos, se vinculan con la precipitación antecedente y se deducen las ecuaciones de regresión que describen, aproximadamente, la acción del agua en las superficies libres.

En la urbanización se conocen reportes de daños en las viviendas desde el año 2005, los daños menores consistían en grietas de tracción en el borde norte, fisuras pequeñas en muros y placas de piso, sin embargo para esta época no eran claras las evidencias que comprometieran la estabilidad del talud oriental. Con el transcurrir del tiempo, las fisuras y el número de viviendas implicadas aumentaron paulatinamente. El 10 de septiembre de 2007 (Diagnóstico DI-3460) se revelan las más claras evidencias de la incubación del desastre, detonado al término del 2008; las grietas en la cancha de baloncesto y en el corredor comunal; y el 14 de diciembre de 2008, después de algunos dias consecutivos de lluvia tuvo lugar el inicio del fin, epílogo que se prolongó hasta el 4 de febrero. A pesar de tan amplio registro del fenómeno el tratamiento completo yace fuera de los alcances de este estudio.

En este orden de ideas se por lo anterior se optó por utilizar las ecuaciones de regresión generales para Bogotá, obtenidas por González et al (1999), que vinculan la precipitación crítica con la precipitación media anual, y la duración de la lluvia acumulada en días con la precipitación critica, para obtener una relación preliminar de Lluvia – Deslizamiento.

Al aplicar el procedimiento referido en las estaciones seleccionadas se obtuvo:

- Estación Vitelma:
  Precipitación crítica = 163.5 mm,
  Duración = 8 días, y
  Periodo de retorno aproximado Tr =30 años

- Estación El Delirio:
  Precipitación crítica = 184.5 mm,
  Duración = 9 días, y
  Período de retorno aproximado Tr = 30 años

Los valores indican que la posibilidad de que ocurra un fenómeno de remoción en masa en la zona es latente si la precipitación acumulada es mayor o igual a 163.5 mm en 8 días. Respuesta que es similar en el tiempo y en el espacio en las dos estaciones.

5.1.4 CONDICIONES NATURALES DEL DRENAJE

Hoy dia, la Urbanización Buena Vista Oriental III Etapa carece de corrientes superficiales permanentes. Vestigios de los cuerpos de agua surcan al norte del predio, y el drenaje se compone de escorrentías superficiales.

5.1.5 CONDICIONES ARTIFICIALES DEL DRENAJE

Este numeral cubre el diagnóstico e investigación de las redes de acueducto y alcantarillado, agentes detonantes o contribuyentes de los fenómenos de remoción en masa. Las deficiencias en la construcción de las acometidas domiciliarias, las fugas y las conexiones erradas y la mala calidad de los materiales utilizados, son algunas de las razones que sopesan su papel como partícipe o activador. Estos elementos ligados al predominio de los llenos, cuerpos lábiles de agua, y al basamento rocoso trabajado en alternancia de arcillolitas y de areniscas favorecen la formación de procesos de inestabilidad.

5.1.5.1 SISTEMA DE ACUEDUCTO

La malla del acueducto, forjada en PVC, diverge entre las 2" y las 6" de diámetro. El tendido y construcción es oficial, y cuenta con 5 años de antigüedad, aproximadamente. A pesar de ello la posibilidad de fugas y roturas es latente, ejemplos redundan en las evidencias de actividad reseñadas desde la creación del conjunto residencial (información suministrada por los habitantes de la urbanización).

5.1.5.2 SISTEMA DE AGUAS RESIDUALES

A través de la calle 31A discurre el entramado oficial, que soporta al sistema de recolección de aguas negras de las tres etapas que conforman Buena Vista Oriental. La red de aguas servidas al interior de la III etapa está constituida por líneas de 8" de diámetro en gres y por seis pozos de inspección (cantidad visible en la actualidad) tallados en ladrillo y en concreto, sin mayores inconvenientes altimétricos que superar. En caso de insuficiencia u obstrucción del sistema, se cuenta con conexión directa a la red pluvial al interior del conjunto residencial, a través de tubos en gres de 6" de diámetro. El *Plano 6* ilustra la distribución de la red.

5.1.5.3 SISTEMA DE AGUAS LLUVIAS

Está conformado por cunetas en concreto perimetrales a los corredores peatonales, que permiten el desagüe de las aguas de escorrentía; su entrega se lleva a cabo a través de sumideros y colectores en gres, que van desde los 6" hasta los 12" de diámetro, y tres (3) pozos de inspección en mampostería y concreto. El sistema de recolección contiguo a la urbanización, dispuesto a lo largo de la calle 31A, recibe los efluentes de la urbanización, y los conduce un cuerpo de agua que nace al nororiente de la urbanización.

5.2 COBERTURA Y USOS DEL SUELO

El levantamiento de la cobertura y uso del suelo puede definirse como el análisis y la clasificación de los diferentes componentes del medio en superficie y de los usos asociados que el hombre practica en un espacio determinado. La COBERTURA es un elemento integrante del paisaje y junto con la geoforma constituyen su expresión visible, y el USO es el empleo que el hombre da a los diferentes tipos de cobertura, ya sea de forma cíclica o permanente, para satisfacer sus necesidades. Es evidente que las características del uso del suelo son el resultado de la interrelación entre los factores físicos o naturales y los factores culturales o humanos.

5.2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

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

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

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

Para cada uno de los niveles aplica la clasificación expuesta en la *Tabla 5.1*.

Acorde con la escala de trabajo y con los requerimientos del estudio, el tratamiento de la cobertura y el uso es menester acometerlo desde el cuarto nivel exploratorio: de detalle. Así, entonces, el área se subdivide en siete (7) grandes franjas, propias de cuatro (4) componentes.

5.2.2 CLASIFICACIÓN DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO

La morfología natural en Buena Vista Suroriente ha sido alterada por la intervención del hombre; la explotación indiscriminada de fuentes de material, específicamente de arcillas, y el poblamiento de antiguas canteras retrollenadas y deficientemente reconformadas, transcriben los rasgos más relevantes de configuración paisajística hoy dia.

La cobertura de la tierra, entendida como los atributos de la superficie del terreno, está integrada por cuatro componentes: parches de vegetación corta -rastrojo bajo-, tierras eriales propias del suelo desnudo, de afloramientos rocosos y de procesos de inestabilidad, y obras humanas, este último como elemento trascendente. El uso esencial es el urbano; calles vehiculares pavimentadas en concreto, calles peatonales en adoquín, construcciones unifamiliares, asentadas desde hace un lustro, y un parque (diagramado por dos canchas de juegos múltiples y un espacio para juegos infantiles) dan el matiz dominante a la mayor parte de la vertiente en especial a las dos últimas terrazas que coinciden con los frentes de explotación (Niveles uno y dos). El primer nivel, agrupa tierras eriales, algunas de uso comercial, que se emplean como plataformas informales de parqueo, y otras baldías.

TABLA 5.1 LEYENDA Y CLASIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA TIERRA

1ER NIVEL EXPLORATORIO	2DO NIVEL EXPLORATORIO	3ER NIVEL EXPLORATORIO	4TO NIVEL EXPLORATORIO
CONSTRUCCIONES	A. URBANO	1.RESIDENCIAL	*UNIFAMILIARES, MULTIFAMILIARES
		2. INDUSTRIAL	* TEXTIL, FABRIL, TRANSPORTE
		3. COMERCIAL	* TIENDAS, TALLERES.
		4.EDUCATIVOS	*COLEGIOS, ESCUELAS
		5.RECREATIVO	*PARQUES, SALONES COMUNALES
		6.TRANSPORTE COMUNICACIÓN, SERVICIOS PÚBLICOS	* VÍAS, CENTRALES DE SERVICIOS PÚBLICOS, TORRES DE ENERGÍA, GAVIONES
VEGETACIÓN HERBÁCEA	A. PASTIZALES NATURALES	1. HERBÁCEOS	* GÉNEROS, PROTECCIÓN
BOSQUES	B. PLANTADO	2. CONÍFERAS	* ESPECIES, DENSIDAD
TIERRAS ERIALES	B. SUELO DESNUDO	1. EROSIÓN PROVOCADA	* SURCOS, CÁRCAVAS
		2. EROSIÓN NATURAL	* MOVIMIENTOS EN MASA

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN DE AMENAZA

CAPÍTULO 6

EVALUACIÓN DE AMENAZA

La primera etapa del análisis de estabilidad se enfoca al estudio direccional de los modos y posibilidades de deslizamiento a lo largo de los planos de debilidad estructural, en el marco de exposición del macizo rocoso, principal ambiente de trabajo en las laderas, y a la determinación de la influencia de las superficies de discontinuidad en los mecanismos de movilización de los depósitos cuaternarios recientes (rellenos antrópicos), todo ello a partir de la aplicación del análisis cinemático (Goodman, 1989, y Hoek y Bray, 1974).

En una segunda etapa se modelan con ayuda de los métodos de equilibrio límite, la respuesta seudoestática de los modos probables de movilización (según el tipo de material y su disposición estratigráfica) en los principales cuerpos del cuaternario, mediante deslizamientos rotacionales y traslacionales, y en los medios rocosos fallas rotacionales e infinitas.

6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

En este numeral se evalúan los modos probables de falla para el conjunto de laderas en las que se expresa el macizo rocoso –frentes de explotación- y su papel como catalizador o condicionante de las más amplias y espesas masas de lleno, estadios en los que el buzamiento de la unidad de análisis responde al del contacto suelo-roca (y la definición del talud, habida cuenta de las limitaciones cartográficas, se expresa ambiguamente en los cuerpos del cuaternario), contrastándolos con los posibles planos de movilización. La relación geométrica entre las discontinuidades, su ángulo de fricción básico –asumido en esencia igual para todos los planos, con valores entre 26° y 30º-, y la orientación de los cortes determina su posibilidad cinemática. En la *Tabla 6.1* se listan las características de los cortes estudiados, entre las que se citan: rumbo, pendiente, altura y subdominio estructural; mientras que su ubicación espacial se reseña en la *Figura 6.1*.

El resumen de las memorias del análisis cinemático (cobijado bajo el nombre de *Anexo D.1*), tanto para las familias de discontinuidades analizadas, como para el conjunto completo de mecanismos se condensa en la *Tabla 6.2*. En ella se evidencia que bajo las condiciones geométricas para los taludes, los que representan las superficies libres de movilización, y del patrón estructural reseñado en el *Capítulo 4*, *Numeral 4.2.2.2*, las laderas exponen poca o ninguna posibilidad de movilización por falla planar y en cuña, los cortes: T5 a lo largo de E1 y de E1D5, y T12 y T13 por E1D5, conforman los escenarios con mayor predisposición; la falla por volteo tiene cabida sólo en la superficie T2, incubada por las discontinuidades: D3 y D5; y los contactos

suelo-roca, representados por las unidades de ladera: T7, T8, T10, T11 y T15 coartan cualquier predisposición cinemática.

TABLA 6.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TALUDES - ESTADO ACTUAL

LADERA	ORIENTACIÓN	BUZAMIENTO(°)	ALTURA (m)	SUBDOMINIO
T 1	N61W/41 NE	41	3,5	
T 2	N46W/71 SW	71	2,5	
T 3	N54E/ 27 NW	27	4,0	
T 4	N54E/ 34 NW	34	9,5	
T 5	N33E/39 NW	39	5,5	
T 6	N49E/30 NW	30	8,5	
T 7	N39E/20 NW	20	6,0	
T 8	N25E/20NW	20	3,5	I
T 9	N08E/32 NW	32	3,5	
T 10	N01E/ 26 NW	26	4,5	
T 11	N02W/25 SW	25	4,5	
T12	N55E/38 NW	38	7,7	
T13	N56E/39 NW	39	5,5	
T14	N21E/52 NW	43	12,0	
T15	N36E/28 NW	28	14,0	

TABLA 6.2 RESUMEN DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO

LADERA		FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES		POSIBILIDAD CINEMÁTICA		
ID	ORIENTACIÓN	PLANOS	CUÑAS	PLANAR	CUÑA	VOLTEO
T 1	N61W/41NE	E1=288/30 D2=81/60 D3=56/57 D4=196/34 D5=16/56 D6=250/86	E1D2=358/11 E1D3=340/19 E1D4=246/24 E1D5=308/29 E1D6=339/20 D2D3=53/56 D2D4=154/27 D2D5=42/53 D2D6=161/17 D3D4=134/17 D3D5=34/55 D3D6=339/18 D4D5=286/0 D4D6=162/29 D5D6=336/48	N.A.	N.A.	N.A.
T 2	N46W/71SW			N.A.	N.A.	D3 y D5
T 3	N54E/ 27NW			N.A.	N.A.	N.A.
T 4	N54E/34NW			N.A.	E1D5	N.A.
T 5	N33E/39NW			E1	E1D5	N.A.
T 6	N49E/30NW			N.A.	E1D5	N.A.
T 7	N39E/20NW			N.A.	N.A.	N.A.
T 8	N25E/20NW			N.A.	N.A.	N.A.
T 9	N08E/32NW			E1	N.A.	N.A.
T 10	N01E/26NW			N.A.	N.A.	N.A.
T11	N02W/25SW			N.A.	N.A.	N.A.
T12	N55E/38NW			N.A.	E1D5	N.A.
T13	N56E/39NW			N.A.	E1D5	N.A.
T14	N21E/43NW			E1	E1D5	N.A.
T15	N36E/28NW			N.A.	N.A.	N.A.

FIGURA 6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

Este fenómeno tiene explicación por tres fundamentos básicos:

- Las laderas no son en su totalidad, direccionalmente, paralelas a las familias promedio de discontinuidades involucradas.
- Los buzamientos de los taludes y del contacto depósito-roca son inferiores o iguales a los de los planos estructurales desfavorablemente orientados, es decir los de rumbo paralelo al de las laderas.
- El ángulo de fricción básico de los planos estructurales con posibilidad cinemática, es superior (o en el peor escenario igual) tanto al buzamiento de la mayoría de las superficies de movilización (fallas planar o por volteo), como al de sus intersecciones (falla en cuña).

Si bien la posibilidad cinemática de falla por volteo tiene asidero, carece de condiciones físicas y geométricas para su desarrollo: la persistencia medida de los planos principales es poco continua, y el material rocoso por excelencia es la arcillolita. El universo de cuñas es, también, físicamente inoperante, la exigua diferencia entre el buzamiento de la intersección y la pendiente del talud, patente en las superficies T4, T6 y T12, da lugar a bloques claves muy delgados y paralelos a la superficie libre, asimilables a los deslaves.

Finalmente, la movilización de los cuaternarios (i.e. llenos antrópicos y suelos residuales), dista mucho de estar controlada o condicionada por el patrón estructural del macizo; los planos de diaclasamiento en ningún caso son receptores o sirven de superficie de reposo o de despegue de los cuerpos antrópicos; y la estratificación, aunque desfavorable, juega, en apariencia, papel poco trascendente, su buzamiento es igual o superior al de las laderas, aunque su azimut de buzamiento es paralelo al de las superficies libres.

6.2 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD

6.2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Con este apartado se pretende más que obtener valores absolutos del factor de seguridad para condiciones unitemporales (base de los modelos determinísticos), es ilustrar el espectro de posibilidades para el que los cortes pueden mantenerse estables o fallar. El análisis de estabilidad alcanza, entonces, mayor representatividad cuando se expresa en términos de probabilidad de falla, que cuando reporta un factor de seguridad, el que no es sino el simbolismo numérico de uno de los múltiples eventos factibles; su objetivo principal es servir de insumo para la estimación de la probabilidad condicional de falla, mediante la evaluación del factor de seguridad F.S. como parámetro específico de estabilidad (Sánchez, 2.000). Pero la deducción de la probabilidad de falla implica conocer la distribución estadística del factor de seguridad (González, 2.001), específicamente la de sus dos primeros momentos: μ_{FS} y σ_{FS}, i.e el promedio y la desviación estándar.

La solución a la relación predictiva entre estas dos variables (Pf y Fs) y la obtención de ellas, se plantea aquí con el empleo de métodos aproximados, es decir, gracias al soporte de los lineamientos metodológicos de los Estimativos Puntuales, PEM (Rosenblueth, 1.975 y Harr, 1.987). El PEM evalúa la función de interés en puntos estratégicos (extremos), conocidas las distribuciones estadísticas de los n parámetros que intervienen en el problema, combinados en un algoritmo que resulta en un factor de seguridad, y utiliza esta información para obtener el promedio y la desviación estándar del FS y por ende, la probabilidad condicional.

En consecuencia, la probabilidad de ocurrencia de un evento particular (FRM) se evalúa en términos de sus eventos condicionantes, a través de la ley de probabilidades totales; de tal manera la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento está definida por la siguiente ecuación:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

En este orden de ideas, es más convincente y representativo estudiar toda la gama de los estados de trabajo a los que podrían estar sometidas las laderas. Pero el desarrollo de este tema requiere el tratamiento previo de cuatro hipótesis: 1) el o los mecanismos de falla; 2) el procedimiento de evaluación (método de análisis); 3) los parámetros efectivos de resistencia de cada material; y 4) los eventos detonantes. Las dos primeras hipótesis se entrelazan como unidades determinísticas, es decir, se consideran invariables, expeditas y conocidas; en tanto que las dos últimas están regidas por los principios de la incertidumbre, i.e. son aleatorias, bien sea por la variabilidad espacial de los parámetros de resistencia o bien por la variabilidad temporal de los agentes detonantes, por lo que se les asignan distribuciones de probabilidad. A continuación se aborda una a una las llamadas hipótesis de trabajo.

6.2.1.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

Se obtuvieron de cinco fuentes básicas: 1) ensayos de campo y de laboratorio del marco de este proyecto, y que están consignados en las *Tablas 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13*, en las *Figuras 4.1 y 4.2* y en el *Anexo C.2*; 2) información secundaria: ensayos de clasificación, cortes directos y sondajes (spt) en arcillolitas y suelos residuales de la Formación Bogotá, y en los llenos adosadas a ellas, seleccionados por similitud litológica y geomorfológica y adoptada de los estudios de riesgo para Villa de los Alpes (Geoingeniería, 2000 y Geocing, 2007), para la urbanización los Alpes del Zipa- Zona B (Ingeniería y Geotecnia Ltda., 1995), para la margen derecha de la Quebrada Morales, (Investigaciones Geotécnicas Ltda. 2000), para un sector del barrio Atenas, (Ingeniería y Georiesgos Ltda., 2005), Geocing Ltda. (2007), y para el barrio Ramajal (Ifcaya ,1998); 3)

Método de Larson: conjuga una parte del universo muestral, pues es excluyente al admitir únicamente los ensayos de corte directo, con ellos se toman las relaciones τ/σ máximos y se incorporan en una gráfica τ' vs σ', los coeficientes (c´, ϕ´) de las regresiones lineales superior e inferior representan los parámetros geomecánicos efectivos buscados; la *Figura 6.2* y la *Figura 6.3* sintetizan los resultados encontrados en los llenos antrópicos, Qra1, y en la arcillolita Tpb-L, materiales con el más amplio universo muestral; 4) retroalimentación iterativa de los propios análisis de estabilidad en los cuerpos potencialmente inestables, para los que se adoptó como criterio que la combinación de parámetros geomecánicos mínimos en estados de no lluvia sin sismo, condujera a una condición estable (FS ≥ 1.05), tal como lo evidencia la configuración hoy día del terreno; supuesto de trascendencia en la definición de los coeficientes operativos mínimos en los llenos antrópicos de reconformación (Qra1), representados en las superficies libres 4-4´, 5-5´, 3-3´, 7-7´ y 6-6´; y 5) análisis retrospectivo: pilar para la deducción de los parámetros mínimos operativos en la falla en los llenos traslocados.

Pero la aplicación y extrapolación de las dos últimas fuentes entre zonas homogéneas y secciones (consecutivas), y por ende la deducción de la relación predictiva de los parámetros, no podría tener cabida sin el empleo del criterio de similitud geomorfológica propuesta por Hoek y Bray (1.974). Los autores sostienen que es posible obtener los parámetros movilizados en la falla de un talud, a partir de otros, siempre y cuando su litología y mecanismo de falla sean similares, aunque su geometría no lo sea. De esta forma, las curvas c' vs. ϕ' de los taludes, teóricamente deben interceptarse en un sólo punto; sin embargo, las variaciones no identificables en la litología o en el grado de meteorización, y las imprecisiones en el nivel de agua ocasionan dispersiones en los resultados, razón por la que se demarca un intervalo de dominio de los parámetros, que a su vez coadyuva a precisar los coeficientes máximos y mínimos para los materiales involucrados.

FIGURA 6.2 ENVOLVENTE DE LARSON, QRA1

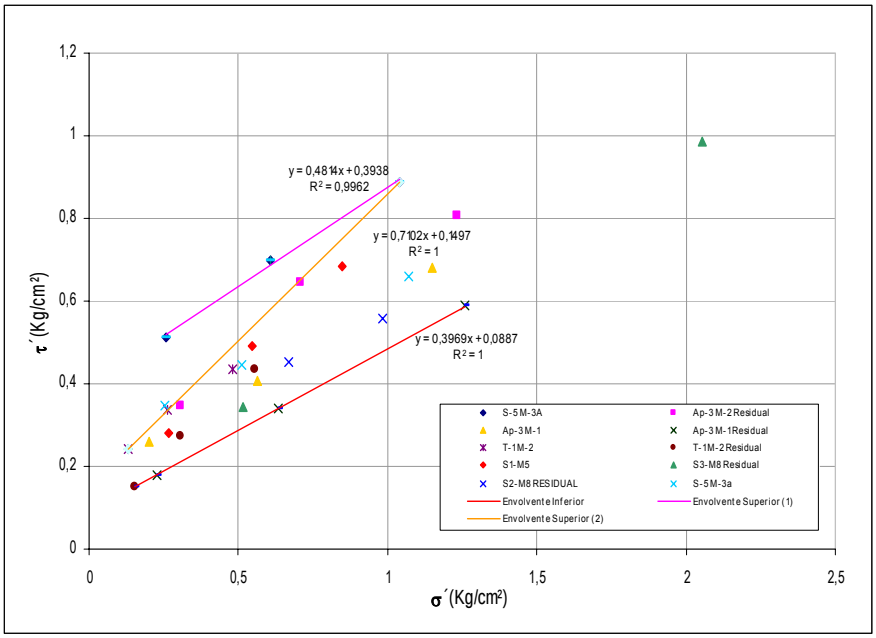
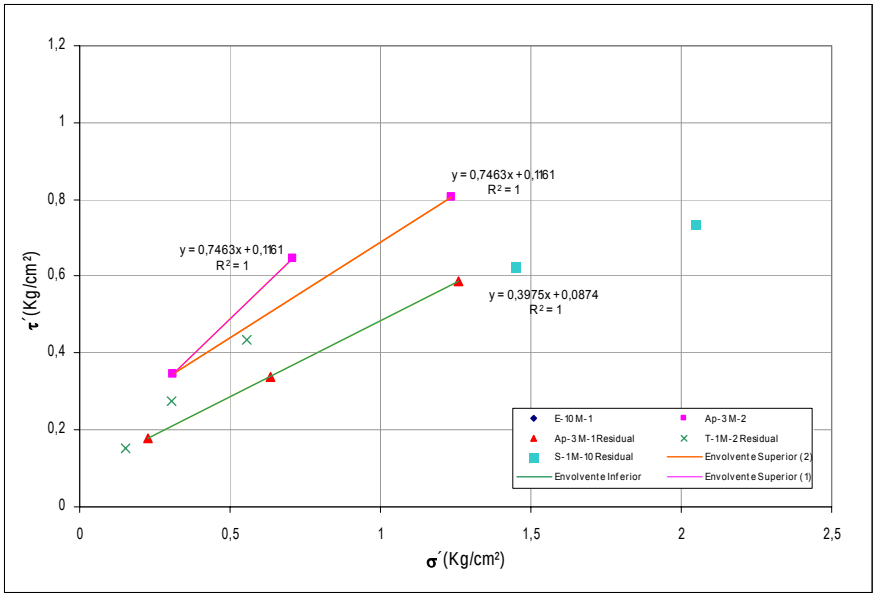


FIGURA 6.3 ENVOLVENTE DE LARSON, TPB-L



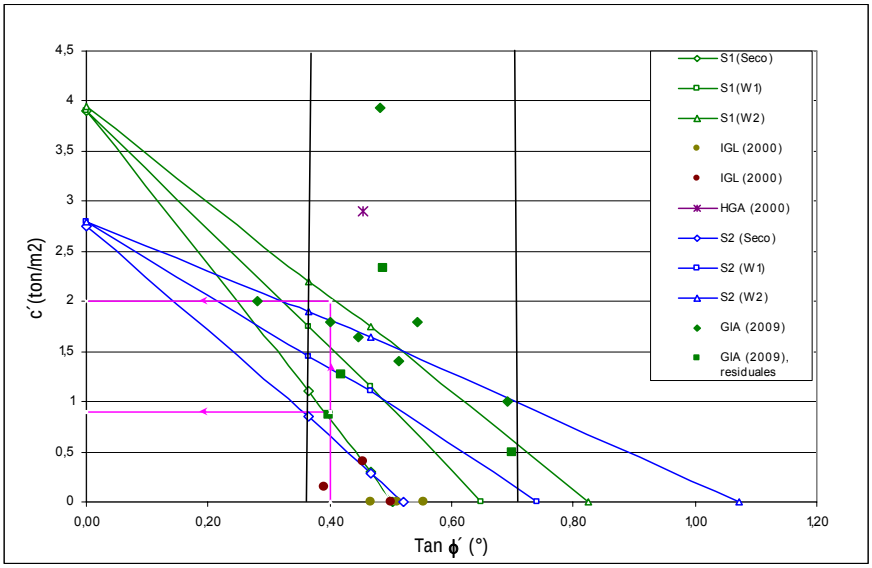
Al amparo de estas premisas, en el retroanálisis se emplearon los deslizamientos DT001AA y DT002AA, esquematizados como ensayos a escala natural, para deducir los parámetros movilizados en la falla, esto último mediante el conocimiento de: la geometría antes y después del movimiento, el mecanismo de falla y la condición de agua. Este conjunto evaluado para factores de seguridad igual a la unidad establece el marco de referencia en tal propósito.

La geometría antes y después de los movimientos se abstrajo con base en las características morfológicas aledañas (planteamiento que encierra la reconstrucción de la topografía a partir de los escarpes, asumidos como puntos de control) y en la cartografía del IGAC (1977): idealización plasmada en el *Plano 4A*. El mecanismo de falla: rotacional, o compuesto (rotacional-translacional) se infiere de las expresiones morfológicas, de los registros de perforación y de las evidencias de campo, fijadas en el inventario de procesos. Y la condición de agua se abstrajo de la instrumentación dispuesta, i.e. de la lectura de los piezómetros instalados, traducida en su casi saturación (nivel denominado w_2 y representado en el *Plano 4A* y tabulado en el *Anexo D*), en concomitancia con la probabilidad condicional de falla.

El trabajo así descrito se expresa en la *Figura 6.4*. Sin embargo, la conceptualización y la deducción predictiva de los parámetros operativos en la falla condujeron a resultados disímiles y al empleo de elementos de juicio adicionales; los parámetros abstraídos de los ensayos de laboratorio e interpretados por el dominio: $c_{mín}$ =0.40 Ton/m², $\phi_{mín}$=15.70° y $c_{máx}$= 3.9 Ton/m², $\phi_{máx}$= 34.70°, aunque a priori concordantes con las envolventes c vs. tg ϕ (FS=1.0), reproducen casi fidedignamente los estados de falla, toda vez que el foco de análisis sea la superficie de deslizamiento mayor en el cuerpo DT-001-AA, rotulada como S1, no así sucede con las superficies de menor tamaño, S2; su reconstrucción está ligada a factores de seguridad inferiores a 0.70, premisa que mina todo sustento a sus parámetros deducidos. La participación de los más potentes espesores (encerrados en la superficie mayor de deslizamiento, material Qd1) definen como intervalo probable operativo $c_{mín}$=0.17 Kg/cm2, $c_{máx}$=0.22 kg/cm2, $\phi'_{mín}$=19,80 y $\phi'_{máx}$=23,70, y como coeficientes

movilizados en la falla c'=0,20 kg/cm2 y ϕ'=21,80. Pareja casi reproducida por la prueba de corte de la muestra 8 del sondeo S-2 (S-2 M8), y por los planos de deslizamiento activos de Rankine en el escape principal de deslizamiento, simbolizados como: α'=45+ϕ´/2 (en la que α'_{falla}=54º, véase la sección 1-1 en el *Plano 4A*).

FIGURA 6.4 RETROANÁLISIS: DESLIZAMIENTO DT-001-AA (SECCIÓN 1-1')



No obstante, el progresivo deterioro de la masa deslizada, representada en la transformación del escarpe principal desde las decenas de centímetros hasta los 8,50m y deformaciones horizontales próximas al 17%, o desplazamientos relativos medios de siete (7) metros y máximos de doce (12) metros en la pata y la cabeza del movimiento, en los últimos ocho meses, aún en ausencia de lluvias, permiten suponer una disminución de los coeficientes de resistencia y un universo distintivo para las masas traslocadas Qd1 y Qd2 (concepto denominado por Cornforth, (2005), "Resistencia residual" y acotado para grandes deformaciones). Hipótesis ratificada por la probabilidad condicional de falla, (gracias a la retroalimentación iterativa), Pf; su umbral máximo, es de 0.05, toda vez que los parámetros del retro cálculo funjan como los mínimos, estadio que raya con la respuesta hoy, o de 0.44, si se trata del Qd1 y 0.34, en lo que hace referencia al Qd2, si los parámetros operativos en la falla, se fijan bien como el c'_{max} y el ϕ'_{max} (deslizamiento DT002) o bien sólo como el ϕ'máx (escenario propio del DT001) y el c'_{min} es nulo o próximo a cero, resultado más a tono con el comportamiento de las laderas. Tema que se retoma en el numeral *6.2.2.2*

Finalmente, los límites de los intervalos de las variables endógenas, se definieron con ayuda del criterio propuesto por la DPAE (2.000). Así, los parámetros promedio por material se obtienen como la media aritmética de la información fuente disponible (primaria y secundaria), y los valores máximos y mínimos esperados, se calculan mediante la suma y sustracción de los coeficientes de variación (cv) para c' y para tgϕ'; empero, justificados los extremos del dominio con partes del espacio muestral, es decir, con parejas c', ϕ' (provenientes de cortes directos), esquema valido tanto para los llenos antrópicos: Qra1 y Qra2, Qd1 y Qd2, como para la lodolita, en el entendido que representa al macizo alterado (horizontes II A y II B), y por

consiguiente para los planos de discontinuidad, o bien con las envolventes superior e inferior de Larson en lo que atañe al Qra1. Tal procedimiento implicó trabajar, en ocasiones, las endógenas como variables independientes (supuesto no siempre válido), así:

$$c'_{\max} = c'_{prom} + c.v_c * c'_{prom} \qquad tg\phi'_{\max} = tg\phi'_{prom} + c.v_t \cdot tg\phi'_{prom}$$

$$c'_{\min} = c'_{prom} - c.v_c * c'_{prom} \qquad tg\phi'_{\min} = tg\phi'_{prom} - c.v_t \cdot tg\phi'_{prom}$$

o lo que es lo mismo:

$$c'_{prom} = \frac{c'_{\max}}{(1 + c.v_c)} \qquad c'_{prom} = \frac{c'_{\min}}{(1 - c.v_c)}$$

$$tg\phi'_{prom} = \frac{tg\phi'_{\max}}{(1 + c.v_t)} \qquad tg\phi'_{prom} = \frac{tg\phi'_{\min}}{(1 - c.v_t)}$$

La tarea así expuesta, involucró estudiar el modelo de falla de los posibles deslizamientos (véase el Numeral 6.2.1.2) enmarcados en las secciones de análisis que se ilustran en el *Anexo D.4*, mediante el ensayo de varios juegos de parámetros. Procedimiento de gran valor para fijar el borde inferior ($c'_{mín}$, $\phi'_{mín}$) en el Qra1 y en la lodolita (Tpb-L). Las combinaciones propias de cada uno se condensan en las memorias de cálculo del *Anexo D*.

La suma de las líneas descritas se expresa en la *Tabla 6.3*. Allí se listan los valores promedio y los intervalos de dominio de los parámetros de resistencia, según el tipo de material, y su fuente deductiva. Otros espectros de parámetros estudiados se condensan en las tablas del *Anexo D*, ellos fueron rechazados puesto que no satisfacían el criterio de retroalimentación.

Aunque los dominios de parámetros seleccionados y por consiguiente las envolventes para el material rocoso y el suelo residual no difieren entre sí en magnitud considerable. Esta disyuntiva abrió el espacio para diferenciar y discriminar las funciones de distribución de los coeficientes de resistencia en el macizo alterado, representado por los horizontes de meteorización IIA y IIB del perfil de Deer y Patton (1.971) y el suelo residual propiamente dicho, horizontes IA y IB. En este sentido y como último escalón de la cadena predictiva, la deducción de los parámetros operativos en el macizo alterado (o reblandecido) se apoyó en la propuesta de Skempton, (citado por Cornforth, 2005) que sugiere que $c' = (2/3)c_{máx}$ y $tg\phi' = (2/3)tg\phi'_{max}$ de su aplicación se obtiene: $c'_{mín} = 1.07 Ton/m^2$, $\phi'_{mín} = 17.40º$ y $c'_{máx} = 2.47 Ton/m^2$, $\phi'_{máx} = 24.20$ (véase el *Anexo D.3*), una y otra frontera ligada a los coeficientes mínimos y medios esperados de resistencia, pero justificadas (en especial la inferior) y validadas por los criterios de retroalimentación iterativa y de similitud geomorfológica.

6.2.1.2 MECANISMOS DE FALLA

Se dedujeron de la evolución morfodinámica de las laderas (véase los *numerales 3.5.2* y *3.6* del *Capítulo 3*) y de su predisposición cinemática, entre ellos se cuentan:

a) Deslizamientos rotacionales o traslacionales, locales y generales, en los llenos antrópicos: Qra-1, Qd-1 y Qd-2, gestados por reblandecimiento, por saturación súbita o por presurización (i.e por cambios drásticos en el régimen de aguas).

   A este conjunto hace parte la retrogresión de los cuerpos de deslizamiento (del 7 de diciembre). Modelamiento adelantado desde dos enfoques, uno conserva la expresión morfológica hoy día pero somete al suelo a la pérdida progresiva o instantánea de resistencia, representada en la mutación de los coeficientes de resistencia (efectivos) del Qra1 por los del Qd1 (i.e. la supresión de de la cohesión gracias al trabajo del agua lluvia y de infiltración); y el otro entrelaza las pérdidas del pasivo en la base del escarpe principal (modificación fijada discrecionalmente), y de succión en el depósito (pormenor qua se traduce en la desaparición de la cohesión aparente), idealización última, aplicable en el tiempo, que sienta las bases para el empleo (al igual que en el caso previo) de los parámetros de los depósitos traslocados (Qd1 y Qd2).

b) Deslizamientos rotacionales en el macizo rocoso, sano y alterado. Hipótesis fundada y justificada en la baja calidad y el alto grado de fracturamiento del macizo (RQD=30%), en especial el del borde norte, zonas homogéneas: LEI-trat-I-1, LEI-trat-I-2 (y LEI-tex-I-2, LEI-trat-I-3, LEI-edu-I-3 y LEI-trat-I-2, por extensión).

c) Fallas planares infinitas en los suelos residuales (simulados asimismo bajo la óptica del macizo alterado); la superfície de movilización está controlada por la estratificación (E_1=288/30) o se forja paralela a la superfície libre, y su espesor en caso alguno supera los dos (2) metros. Tienen cabida en las exposiciones de arcillolita, región LEI-tex-I-3, LEI-text-I-1, LEI-text-I-2 o LNI-I-1, y su activación recae en la saturación o en la presurización, del manto potencial, provocada por el movimiento descendente del agua lluvia.

El modelo de falla progresiva, fue descartado puesto que las laderas al norte y oriente mantienen sus expresiones morfológicas en los últimos años, respectivamente, según lo ratifican los testimonios de los habitantes y la contrastación morfológica entre las cartografías del IGAC (1977), y la del estudio (GIA, 2009). En la *Tabla 4.25* se señalan para las distintas zonas homogéneas del escenario hoy día, los mecanismos de falla y los materiales involucrados en la secuencia estratigráfica.

6.2.1.3 EVENTOS DETONANTES

Los agentes detonantes, definidos como variables aleatorias o fuentes de incertidumbre se establecen como condiciones asociadas a la ocurrencia de lluvia (LI) y sismo (Eq). Estas variables, denominadas exógenas o eventos condicionantes, recibieron tratamientos basados en los registros históricos disponibles.

6.2.1.3.1 Agua

En la definición de los agentes exógenos, la mayor incertidumbre radica en la relación entre la ocurrencia de las lluvias y la presencia del agua al interior del talud; en este sentido, a fe de dar respuesta o en el peor escenario delinear un modelo predictivo, se instrumento el cuerpo principal del deslizamiento con dos piezómetros abiertos y se monitoreo el comportamiento de la tabla de agua (representado de manera alguna por la cabeza de presión) durante parte del tiempo del estudio, tal y como lo ratifica el *Anexo D.2 (Monitoreo)*.

TABLA 6.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES

					SPT		CORTE DIRECTO		VALOR PROMEDIO				VALOR MÍNIMO				VALOR MÁXIMO				OBSERVACIONES
									Estáticos		Dinámicos		Estáticos		Dinámicos		Estáticos		Dinámicos		
No.	Nombre	DESCRIPCIÓN	γ (Ton/m³)	γ Sat (Ton/m³)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	Cohesión (Ton/m²)	ϕ (°)	
1 y 4	Qra1, Qra2 y Qra4	Relleno Antrópico de reconformación	2,08	2,14	0,60	26,20	1,60	24,10	1,60	25,4	_	_	0,90	21,8	_	_	2,20	28,9	_	_	Los extremos están justificados por esnsayos de corte. El Φ' min responde al ensayo de corte directo de la muestra S2-M 8 y el Cmin al ensayo de corte directo del testigo S1-M5. Los universos muestreales poseen un Cvc= 0,42 y un Cvt= 0,16.
							2,50	20,57													
							3,90	25,70													
							1,80	28,50													
2	Qd1	Depósitos Antrópicos Traslocados	2,08	2,14	0,60	26,20	1,00	34,70	0,45	18,8	_	_	0,00	15,7	_	_	0,90	21,8	_	_	Los parámetros son deducidos a partir del retroanálisis y de la aplicación del criterio de retroalimentación iterativa en los cuerpos de deslizamiento.
							2,30	29,20													
							1,40	27,20													
							2,00	15,70													
	Qd2		2,08	2,14	0,60	26,20	1,80	21,80	1,50	18,8	_	_	0,90	15,7	_	_	2,00	21,8	_	_	
3	Qra3	Relleno Antrópico seleccionado de reconformación	1,90	2,08					0,00	32,0	_	_	_	_	_	_	_	_	_	_	Valores asumidos con base en la experiencia del consultor en este tipo de materiales.
6	QTpb-L-Sr	Suelos residuales de la Formación Bogotá	2,04	2,10			4,00	28,80	1,85	20,9	_		1,20	15,6	_	_	2,47	24,1	_	_	Los máximos y mínimos responden a resultados de corte directo tanto de fuentes primarias como de secundarias, no obstante, se aplica un Cvc= 0,51 y un Cvt=0,24. El Φ max responde al ensayo de corte directo del Ap 9-M1.
							1,60	24,10													
7	Tpb-L	Formación Bogotá Niveles arcillosos	2,25	2,28	0,00	44,00	3,00	30,40	2,70	31,5	_	_	1,60	26,1	_	_	3,70	36,4	_	_	Se deduce el promedio del universo muestral disponible que incluye fuentes como: GIA (2009), HGA (2000) e Hidrotec (1998). Los máximos y mínimos se obtienen al aplicar un Cvc=0,40 y un Cvt= 0,20.
							5,00	40,96													
	Tpb-L Reblandecido		2,25	2,28					1,80	22,0	_	_	1,07	17,4	_	_	2,47	24,2	_	_	Se deducen como 2/3 de los parámetros máximos y mínimos.
8	Tpb+A	Formación Bogotá Areniscas	2,16	2,20			1,90	30,30	1,44	30,6	_	_	1,12	25,3	_	_	1,77	35,4	_	_	Se toma el promedio del universo muestral. El tmax y el tmin (tan φ), se deducen con un Cvt=0,20 y el Cmax y Cmin responden al resultado de un corte directo, junto con el valor residual respectivamente.
							1,80	31,30													

Labor que deja al descubierto la casi saturación de los llenos; la cabeza máxima de presión reposa 1,40m bajo la superficie. En este sentido se fijaron como hipótesis de trabajo las siguientes:

a) El desempeño parcialmente saturado del macizo rocoso (sano y alterado). Se asume unidireccionalmente un coeficiente crítico de presión de poros, ru, de 0.18, deducido de la aplicación de la teoría elástica, para un estado de esfuerzos anisotrópicos, en el que el esfuerzo principal mayor es el vertical, y toda vez que la relación de poisson sea de 0.335, y el ángulo de fricción medio se posicione en ϕ=26.1º.

b) La saturación de las capas de suelo –llenos–, tal y como lo expresan los resultados del retroanálisis, pero bajo condiciones de flujo libre, gestada por el aporte de los efluentes provenientes de la rotura de las redes de servicio, de las conexiones erradas, del patrón hidrogeológico, o de la migración descendente del agua lluvia en períodos invernales, contextos últimos aplicables a las zonas homogéneas: LEI-tra-l-1 y LEI-tra-l-3, enmarcadas en masas con espesores inferiores a los tres (3) metros. Hipótesis favorecida por la residencia del cuaternario sobre el sello hidrogeológico por excelencia en las vertientes de Buenavista: las arcillolitas de la formación Bogotá.

6.2.1.3.2 Sismo

En cuanto a la variable sismo, se tomaron como bastiones: a) El Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia EGASC, que fija para Bogotá un am de 0.20 g para un período de retorno Tr= 475 (para una probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años); y b) "la Microzonificación Sísmica de Bogotá" en la que se evaluaron para las diferentes partes de la ciudad los espectros probables de respuesta, es decir se definió la aceleración pico efectiva Ag y la aceleración mínima Ad, con sus períodos de retorno y recurrencia. Para la Zona 1 - Cerros, universo espacial al que pertenece La Urbanización, el estudio reporta valores de aceleración pico en roca de 0.24g. Las aceleraciones máximas en superficie y las de diseño son tomadas de fuentes secundarias: bien de Medvedev, 1.965, o bien del NSR, 1.998, tal como se explica en el numeral 3.7 del Capítulo 3.

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia y de no ocurrencia de todas las combinaciones de sismo y lluvia críticas se calculó con base en su periodo de retorno (Tr=30 años, para la lluvia, tomado del artículo "Relaciones de Precipitación Crítica-Duración de Lluvias que Disparan Movimientos en Masa en Santa Fe de Bogotá – Colombia", González y otros, 1.998, véase el *numeral 5.1.3* del capítulo 5), al tener en cuenta tres escenarios: corto plazo (un año), mediano plazo (10 años) y largo plazo (50 años) según las expresiones que aparecen a continuación. Los resultados de la formulación se muestran en la *Tabla 6.4*.

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

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

donde:

P+= probabilidad de ocurrencia del evento crítico
P- = probabilidad de no ocurrencia del evento crítico
T = período de retorno
n = período de análisis

TABLA 6.4 PROBABILIDADES DE AGENTES EXÓGENOS

PERÍODO DE ANÁLISIS	ACTUAL (1AÑO)		MEDIANO PLAZO (10 AÑOS)		LARGO PLAZO (50 AÑOS)	
AGENTE EXÓGENO	OCURRENCIA	NO OCURRENCIA	OCURRENCIA	NO OCURRENCIA	OCURRENCIA	NO OCURRENCIA
Agua, T = 30 años	0.033	0.967	0.287	0.712	0.816	0.184
Sismo, T= 475 años	0.002	0.998	0.021	0.979	0.051	0.9479

6.2.1.4 MODELACIÓN DE ESTABILIDAD

La modelación se planteó gracias a los métodos de equilibrio límite, basados en el criterio de resistencia de Mohr – Coulomb pero como función de los mecanismos evaluados; así para los deslizamientos rotacionales-traslacionales en suelo, la técnica de las dovelas de Jambu (1954 y 1973, citado por Duncan and Wright, 2005) y Bishop (1955, citado por Duncan and Wright, 2005). Se emplearon como herramientas de trabajo los programas PCStable 6 y Slide V5 para los mecanismos de falla rotacional y traslacional en los llenos y en el macizo rocoso.
Bajo los lineamientos anteriores, y con el fin de adelantar la tarea de evaluación de estabilidad, se establecieron siete (7) secciones de trabajo para la condición actual (S1 a S7), que se ilustran en planta en el *Plano 4* y en perfil en los *Planos 4A y 4B*. Las secciones se subdividieron acorde con las zonas homogéneas y con los materiales susceptibles; sobre los tramos resultantes se evaluaron los cuerpos potencialmente inestables según su dirección probable de movilización. Se asume, entonces, que el grado de estabilidad de cada sección (o sus partes) es atribuible a la región homogénea a la que pertenece.

A los análisis con PCStable se les asignó un código alfa numérico entrelazado al escenario analizado; éste diferencia sucesivamente el universo de trabajo (Buenavista), la sección de análisis, el modelo de falla y el número consecutivo de superficie analizada; v.g., el archivo SEC11B condensa el escenario actual, en la sección de análisis 1; retrabajada por fallas rotacionales: R, específicamente la segunda superficie crítica: 1B.

6.2.2 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

6.2.2.1 CONSIDERACIONES

Por las restricciones inherentes de las herramientas computacionales disponibles en la estimación de los factores de seguridad, se utilizó como método deductivo de la probabilidad el PEM, pues éstos fueron simulados en PC-Stable 6, algo limitado en la generación de múltiples combinaciones. Fijos los comportamientos de las fuentes de incertidumbre, las funciones de probabilidad de las variables se constituyen en elementos fundamentales para la determinación de la función de la probabilidad de falla. En este sentido se determina el FS para múltiples casos: dieciséis (16) producto de las cuatro (4) condiciones de eventos detonantes para las cuatro posibles combinaciones de parámetros. Todas las valoraciones se efectúan para tres escenarios de exposición: a corto plazo (1 año), mediano plazo (10 años) y a largo plazo (50 años), a fe de establecer la sensibilidad con respecto a esta variable. Con los factores de seguridad (F.S) se calculan las curvas de densidad, a partir de las que se obtiene la probabilidad de falla como el área bajo la curva para niveles del F.S. menores a la unidad.

6.2.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El compendio completo de los factores de seguridad y de las probabilidades de falla FS-P_f, agrupados en la *Tabla 6.5*, en la *Tabla 6.6*, en la *Tabla 6.7*, en la *Tabla 6.8*, en la *Tabla 6.9* y en la *Tabla 6.10* permite definir las condiciones que mejor develan el comportamiento de las laderas hoy día. De éstas se extrae que los taludes S1 y S2, propios de los cuerpos de deslizamiento poseen probabilidades de falla en un año, superiores al 34%; su progresión (movilización) se produce cualquiera sea el agente exógeno que participe, y en estado seco sin sismo si operan los parámetros de resistencia mínimos. La esperanza del factor de seguridad (Fs) en ninguna condición de trabajo (combinaciones de agentes detonantes y parámetros) es superior a 1.09, umbral obtenido en el Qd2 (DT-002A), sí y solo sí el sismo y el agua estén ausentes (véase la *Tabla 6.5*). Respuesta apenas lógica: los movimientos hoy día son activos, aunque sus tazas de deformación son disímiles, particularidad que justifica las variaciones en la cohesión efectiva. Corolario ratificado por las probabilidades de falla en la *Tabla 6.7* (superficies: SEC11B y SEC11C) y en el *Anexo D.3* (superficie S21). La adopción de cohesiones efectivas para Qd2, similares a las del Qd1, develan respuestas aún más críticas que la del Qd1, idealizaciones (simulaciones) poco fidedignas del escenario actual.

La retrogresión, parece innegable, las superficies de movilización: la SEC11D(2), la SEC11E(2), la SEC1X, la SEC1Y, la SEC1Z y la SEC22, trasiegan al respaldo de los escarpes de deslizamiento, y se extienden hasta las canchas de juego, exponen estados de falla aún sin la participación de los agentes detonantes (agua y sismo); las probabilidades condicionales superan el 25% en el primer año, y el 42% en cuanto al período de trabajo (i.e. la exposición) se acerca a los 10 años (véase la *Tabla 6.7* y la *Tabla 6.8*). Respuesta ligada a la generalización de los parámetros del Qd1 y del Qd2, en el Qra1, comportamiento avalado y sustentado por el reblandecimiento del lleno, o por el desconfinamiento y la deformación (rápida o paulatina) de los depósitos; eventos en otrora antecesores a la detonación de los deslizamientos.

Réplica en menor escala pero no menos trascendente se enmarca en la zona homogénea LEl-edu-l-1, tipificada por la sección S-6. Los antrópicos (depósitos) diagraman precarios o marginales estadios de trabajo; los taludes esbozan condiciones seguras sólo en ausencia de los agentes detonantes, las esperanzas del factor de seguridad se circunscriben entre el 0.50 y el 0.84 (*Tabla 6.6*); la activación tiene asidero toda vez que participe por lo menos uno de los coeficientes de resistencia mínimos (véase la *Tabla 6.9*, superficie SEC63). La probabilidad de falla alcanza el 30% a los 10 años (estado actual) o supera el 60% si la vida útil se extiende hasta los 50 años. Panorama que sumado a las deficiencias de la cimentación, específicamente en la capacidad portante (como se explica en el numeral 4.4 del capítulo 4) en el marco de los llenos más espesos, transcriben (e incuban) los daños de las viviendas 39 a 46, y 16 a 23.

El comportamiento de las demás masas antrópicas, ejemplificadas por las superficies libres S-3 (SEC31 y SEC34), S-4 (SEC41), S-5 (SEC51 y SEC52) y S-7 (SEC73 y SEC75), si bien es más halagüeño, no es suficientemente tranquilizador. El cuaternario permanece estable toda vez que no haya sismo ni lluvia, o se movilicen la cohesión máxima o los parámetros máximos: $c_{máx}$, $\phi'_{máx}$, simultáneamente; los factores de seguridad recorren el intervalo [1.05 - 2.3], y exhiben desviaciones estándar y coeficientes de variación inferiores al 30% (lo que representa un buen grado de confiabilidad en los parámetros de resistencia seleccionados) y las probabilidades de falla oscilan entre el 0.2% y el 10%, si el escenario de estudio es a un año; panorama descrito en la *Tabla 6.6*, en la *Tabla 6.9* y en la *Tabla 6.10*. Valores que describen (por lo menos desde la perspectiva del razonamiento aproximado y del sentido común) con objetividad el comportamiento de las laderas; durante los siete años de vida (repárese la *Figura 3.4* del capítulo 3) de Buena Vista son los ambientes antrópicos más estables, sin que esto signifique que son escenarios

excepcionales o muy seguros: su estabilidad está próxima a la marginal y su activación puede tener lugar en inviernos prolongados o durante lluvias intensas, pero sin la participación adicional del hombre, él catalizaría el proceso.

El panorama es aún más crítico, si la exposición toca los 10 años, las probabilidades condicionales trasiegan del 10.5% (SEC75) al 27% (SEC51); y son sencillamente catastróficas a los cincuenta años, la movilización de los depósitos sería inminente, las probabilidades de falla superarían el 40% y su máximo alcanzaría el 65% (véase la *Tabla 6.9* y la *Tabla 6.10*).

Esquema que pone de relieve que su movilización, al igual que lo fue la de los cuerpos de deslizamiento principales (el DT-001AA, y el DT-002AA, tratados en el numeral 3.5.2.3 del capítulo 3), es asunto de tiempo. Los factores condicionantes en unos y otros, antes y ahora, permanecen vigentes. En otras palabras, salvo que se hubiesen tomado correctivos importantes como la despresurización de los depósitos (bien con subdrenes horizontales, trincheras drenantes o pozos de alivio, o bien con una combinación de éstos), la reducción de la masa activa (traducida en la descarga en la cabeza o el perfilado), la recuperación del drenaje borrado, y la puesta en marcha de sistemas de contención eficientes (y bien diseñados), la emergencia de febrero de 2009, era inevitable.

Si bien el macizo rocoso expone las mejores condiciones de estabilidad, con probabilidades de falla inferiores al 20% y factores de seguridad superiores a 1.0, sí y solo sí trabaje bajo el estimulo de uno sólo de los agentes exógenos (agua o sismo), indistinto del periodo de exposición (i.e. 10 años, 25 años, 50 años); la reducción de la tasa de meteorización es una tarea inaplazable. En los casos (hipotéticos) de reblandecimiento: superficies SEC54, SEC77, SEC29, SEC33, SEC11H, SEC21, S-1(LEI-tex-I-3) y S-2 (LNI-I-1) -véase la *Tabla 6.7*, la *Tabla 6.8*, la *Tabla 6.9* y la *Tabla 6.10*-, la movilización tendría lugar con la participación bien de la lluvia o el sismo, v.g. la SEC54, la SEC33, la SEC27 y la SEC11H, o bien con la combinación de los dos: SEC77 y SEC29. Las probabilidades condicionales modales superarían el 20% para los 10 años y al 34% para los 50 años, su activación sería inevitable en el mediano plazo.

6.2.3 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA

Conocidas la composición geotécnica de cada ladera y las probabilidades condicionales, el último paso para obtener el mapa de Zonificación de Amenaza consiste en determinar las zonas de afectación esperadas por los procesos. Tales áreas fueron limitadas una vez estimadas las distancias probables de viaje de las masas: a) en los llenos, a través de la implementación del modelo establecido por P.J. Finlay et al (1.998), sus variables de entrada son: la morfometría del talud, la altura y la pendiente, y la profundidad de la masa involucrada, todas en función de coeficientes promedios o máximos (promedios más una desviación estándar) y que responden a la siguiente ecuación:

$$LogL = C0 + C1xI1 + C2xI2$$

Donde

C0, C1 y C2:	Constantes del análisis estadístico (P.J. Finlay et al)
I1:	Log H (altura del talud)
I2:	Log (tan A) (inclinación de la cara del talud)

TABLA 6.5 ESPERANZAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
1	SEC11B	Qd1	18.80	0.45	No	No	1.06
					No	Si	0.80
					Si	No	0.71
					Si	Si	0.53
	SEC11C				No	No	1.03
					No	Si	0.79
					Si	No	0.71
					Si	Si	0.54
	SEC11D				No	No	1.18
					No	Si	0.79
					Si	No	0.98
					Si	Si	0.64
	SEC11D (2)				No	No	1.02
					No	Si	0.69
					Si	No	0.85
					Si	Si	0.57
	SEC11E	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.37
					No	Si	0.85
					Si	No	1.08
					Si	Si	0.66
	SEC11E (2)	Qd1	18.80	0.45	No	No	0.98
					No	Si	0.62
					Si	No	0.75
					Si	Si	0.46
	SEC11F	Qra1	25.40	1.60	No	No	2.59
					No	Si	1.86
					Si	No	2.40
					Si	Si	1.71
	SEC11G	Tpb-L	31.50	27.00	No	No	1.91
					No	Si	1.37
					Si	No	1.36
					Si	Si	0.94
	SEC11G (2)	Tpb-L (reblandecido)	21.98	1.80	No	No	1.33
					No	Si	0.95
					Si	No	0.92
					Si	Si	0.64
	SEC11H	Tpb-L	31.50	27.00	No	No	2.33
					No	Si	1.52
					Si	No	1.49
					Si	Si	0.96
	SEC11H (2)	Tpb-L (reblandecido)	21.98	1.80	No	No	1.53
					No	Si	1.01
					Si	No	1.00
					Si	Si	0.65
2	SEC21	Qd2	18.80	1.50	No	No	1.11
					No	Si	0.86
					Si	No	0.46
					Si	Si	0.36
	SEC22				No	No	1.09
					No	Si	0.69
					Si	No	0.90
					Si	Si	0.56
	SEC23	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.31
					No	Si	0.82
					Si	No	1.05
					Si	Si	0.65
	SEC24	Tpb-L	31.50	2.70	No	No	1.67
					No	Si	1.27
					Si	No	1.12
					Si	Si	0.84
	SEC25				No	No	1.10
					No	Si	0.83
					Si	No	0.74
					Si	Si	0.55
	SEC26				No	No	2.11
					No	Si	1.44
					Si	No	1.42
					Si	Si	0.96
	SEC27				No	No	1.35
					No	Si	0.93
					Si	No	0.92
					Si	Si	0.62
	SEC28				No	No	2.84
					No	Si	2.13
					Si	No	2.11
					Si	Si	1.57
	SEC29				No	No	1.83
					No	Si	1.37
					Si	No	1.37
					Si	Si	1.02

TABLA 6.6 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN)

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f prom	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
3	SEC31	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.47
					No	Si	1.02
					Si	No	1.06
					Si	Si	0.72
	SEC32	Tpb-L	31.50	2.70	No	No	1.35
					No	Si	0.99
					Si	No	0.74
					Si	Si	0.52
	SEC33				No	No	1.09
					No	Si	0.78
					Si	No	0.60
					Si	Si	0.41
	SEC34	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.88
					No	Si	1.27
					Si	No	1.29
					Si	Si	0.87
4	SEC41	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.39
					No	Si	0.96
					Si	No	0.86
					Si	Si	0.57
	SEC42	Tpb-L	31.50	2.70	No	No	1.62
					No	Si	1.20
					Si	No	1.42
					Si	Si	1.04
	SEC43				No	No	1.13
					No	Si	0.84
					Si	No	1.00
					Si	Si	0.75
5	SEC51	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.36
					No	Si	0.99
					Si	No	0.86
					Si	Si	0.61
	SEC52				No	No	1.42
					No	Si	0.99
					Si	No	0.89
					Si	Si	0.60
	SEC53	Tpb-L	31.50	2.70	No	No	2.10
					No	Si	1.45
					Si	No	1.26
					Si	Si	0.85
	SEC54				No	No	1.36
					No	Si	0.94
					Si	No	0.84
					Si	Si	0.57
6	SEC61	Qra1	25.40	1.60	No	No	2.36
					No	Si	1.46
					Si	No	1.62
					Si	Si	0.99
	SEC63	Qd1	18.80	0.45	No	No	1.36
					No	Si	0.83
					Si	No	0.84
					Si	Si	0.50
7	SEC73	Qra1	25.40	1.60	No	No	1.49
					No	Si	1.07
					Si	No	1.00
					Si	Si	0.69
	SEC74				No	No	1.65
					No	Si	1.18
					Si	No	1.08
					Si	Si	0.76
	SEC75				No	No	1.72
					No	Si	1.14
					Si	No	1.18
					Si	Si	0.75
	SEC76	Tpb-L	31.50	2.70	No	No	1.93
					No	Si	1.20
					Si	No	1.25
					Si	Si	0.69
	SEC77				No	No	1.93
					No	Si	1.20
					Si	No	1.25
					Si	Si	0.69

TABLA 6.7 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL											
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS											
				S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1
				SEC 11B	SEC 11C	SEC 11D	SEC 11D (2)	SEC 11E	SEC 11E (2)	SEC 11F	SEC 11G	SEC 11G	SEC 11H	SEC 11H	SEC 1X
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1,347	1,312	1,318	1,149	1,592	1,267	3,237	2,285	1,582	2,820	1,818	1,079
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,020	1,000	1,194	1,032	1,346	0,970	2,692	1,854	1,296	2,088	1,416	0,918
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,099	1,061	1,170	1,007	1,396	0,997	2,488	1,966	1,366	2,564	1,649	0,526
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	0,772	0,748	1,042	0,885	1,150	0,701	1,946	1,532	1,077	1,832	1,246	0,370
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,017	1,010	0,895	0,791	0,989	0,800	2,325	1,644	1,136	1,843	1,194	0,831
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	0,772	0,774	0,803	0,705	0,847	0,616	1,939	1,337	0,930	1,372	0,934	0,717
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,824	0,815	0,780	0,683	0,862	0,618	1,776	1,404	0,972	1,670	1,080	0,376
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,579	0,574	0,683	0,591	0,718	0,434	1,392	1,094	0,764	1,200	0,821	0,264
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	0,938	0,927	1,105	0,966	1,266	0,994	3,010	1,809	1,108	1,820	1,196	1,079
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	0,732	0,727	1,010	0,881	1,082	0,777	2,527	1,366	0,948	1,408	0,969	0,918
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,697	0,683	0,953	0,820	1,074	0,727	2,261	1,263	0,892	1,575	1,034	0,526
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,490	0,482	0,857	0,731	0,889	0,511	1,782	1,021	0,728	1,163	0,807	0,370
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,699	0,707	0,735	0,655	0,768	0,616	2,152	1,220	0,780	1,168	0,773	0,831
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,547	0,556	0,668	0,592	0,667	0,486	1,813	0,970	0,670	0,912	0,632	0,717
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,513	0,514	0,617	0,542	0,644	0,436	1,605	0,878	0,618	1,004	0,665	0,376
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,360	0,362	0,544	0,474	0,543	0,306	1,268	0,712	0,504	0,748	0,524	0,264
			w	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
				W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2
Material				Qd1	Qd1	Qd1	Qd1	Qra1	Qd1	Qra1	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Qd1
				0.22g	0.22g	0.22g	.22g	0.22g	.22g	0.22g	0.16g	0.22g	0.16g	0.16g	0.22g
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		21,8	21,8	21,8	21,8	28,9	21,8	28,9	36,4	24,2	36,4	24,2	21,8
		ϕ_{min}		15,7	15,7	15,7	15,7	21,8	15,7	21,8	26,1	17,4	26,1	17,4	15,7
		C_{max} (ton/m²)		0,90	0,90	0,90	0,90	2,20	0,90	2,20	3,70	2,47	3,70	2,47	0,90
		C_{min} (ton/m²)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,90	1,60	1,07	1,60	1,07	0,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,4400	0,4700	0,0490	0,4396	0,0180	0,5472	0,0002	0,0035	0,0500	0,0009	0,0236	0,8360
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,5600	0,5970	0,2034	0,5834	0,1000	0,6532	0,0005	0,0310	0,2039	0,0090	0,1552	0,8390
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,7300	0,7510	0,3770	0,7415	0,2000	0,7702	0,0009	0,0700	0,4470	0,0279	0,3082	0,8400
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,8700	0,8830	0,5315	0,8748	0,3000	0,8699	0,0016	0,1200	0,6300	0,0630	0,4530	0,8500

TABLA 6.8 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL												
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
				S-1	S-1	S-1	S-1	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2	S-2
				SEC1Y	SEC1Y1	SEC1Y2	SEC1Z	SEC21	SEC22	SEC23	SEC24	SEC25	SEC26	SEC27	SEC28	SEC29
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1,446	1,433	1,452	1,142	1,448	1,244	1,497	2,048	1,327	2,589	1,638	3,659	2,338
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,106	1,294	1,253	0,871	1,210	1,135	1,311	1,569	1,053	1,923	1,259	3,037	1,992
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,142	1,264	1,290	0,909	1,021	1,040	1,304	1,775	1,141	2,307	1,441	2,645	1,662
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	0,803	1,122	1,090	0,639	0,778	0,928	1,116	1,293	0,865	1,619	1,056	2,021	1,316
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	0,844	0,841	0,846	0,752	1,120	0,792	0,941	1,560	1,008	1,774	1,125	2,749	1,758
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	0,649	0,759	0,736	0,577	0,939	0,729	0,832	1,198	0,801	1,324	0,868	2,290	1,505
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,655	0,735	0,748	0,587	0,777	0,657	0,814	1,342	0,859	1,572	0,983	1,969	1,239
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,460	0,649	0,636	0,413	0,591	0,587	0,701	0,977	0,650	1,112	0,723	1,511	0,984
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,229	1,235	1,246	0,994	0,646	1,036	1,212	1,398	0,913	1,768	1,130	2,775	1,796
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	0,953	1,120	1,087	0,767	0,581	0,960	1,076	1,120	0,754	1,369	0,902	2,440	1,609
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,929	1,067	1,086	0,763	0,338	0,835	1,023	1,127	0,729	1,484	0,935	1,779	1,132
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,653	0,949	0,925	0,536	0,271	0,754	0,885	0,842	0,567	1,071	0,703	1,439	0,943
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,710	0,719	0,719	0,650	0,515	0,652	0,749	1,047	0,683	1,193	0,764	2,070	1,342
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,554	0,651	0,633	0,505	0,515	0,610	0,673	0,844	0,566	0,930	0,614	1,830	1,210
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,524	0,613	0,622	0,486	0,255	0,520	0,625	0,831	0,535	0,990	0,625	1,309	0,834
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,368	0,542	0,534	0,342	0,208	0,470	0,546	0,625	0,416	0,719	0,473	1,065	0,698
				Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			w	W2	W2	W2	W2	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qd1	Qd1	Qd2	Qd1	Qd2	Qd2	Qra1	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L
				0.22g	0.22g	0.22g	0.22g	ah=0.22 g	0,22	ah=0.22 g	0.16g	0.16g	0.16g	0.16g	0.16g	0.16g
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	28,8	36,4	24,2	36,4	24,2	36,4	24,2
	ϕ_{min}			15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	21,8	26,1	17,4	26,1	17,4	26,1	17,4
	C_{max} (ton/m²)			0,90	0,90	2,00	0,90	2,00	2,00	2,20	3,70	2,47	3,70	2,47	3,70	2,47
	C_{min} (ton/m²)			0,00	0,00	0,90	0,00	0,50	0,50	0,90	1,60	1,07	1,60	1,07	1,60	1,07
Probabilidad de falla (Pf) a 1 año Método PEM			N	0,3010	0,0126	0,0240	0,7430	0,3410	0,2452	0,0200	0,0150	0,3000	0,0025	0,0724	0,0013	0,0170
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,3940	0,0736	0,0922	0,7959	0,4250	0,4090	0,1200	0,0840	0,4800	0,0160	0,2485	0,0056	0,0519
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,5010	0,1486	0,1747	0,8546	0,6590	0,5904	0,2300	0,1700	0,6900	0,0408	0,4467	0,0100	0,0959
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,5990	0,2305	0,2619	0,9053	0,8795	0,7463	0,3451	0,2650	0,8643	0,0797	0,6220	0,0182	0,1434

TABLA 6.9 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL												
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
				S-3	S-3	S-3	S-3	S-4	S4	S4	S-5	S-5	S-5	S-5	S-6	S-6
				SEC31	SEC32	SEC33	SEC34	SEC41	SEC42	SEC43	SEC51	SEC52	SEC53	SEC54	SEC61	SEC63
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1,883	1,508	1,194	2,373	1,739	1,966	1,364	1,725	1,781	2,570	1,644	2,933	1,782
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,644	1,303	1,062	2,025	1,458	1,723	1,176	1,477	1,501	1,933	1,289	2,435	1,387
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,291	1,392	1,113	1,726	1,325	1,527	1,084	1,247	1,336	2,260	1,437	2,279	1,328
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,051	1,181	0,979	1,378	1,042	1,279	0,892	0,997	1,056	1,621	1,082	1,782	0,933
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,318	1,103	0,880	1,629	1,204	1,456	1,024	1,257	1,243	1,772	1,137	1,823	1,101
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,163	0,961	0,711	1,339	1,017	1,286	0,886	1,086	1,057	1,339	0,897	1,520	0,860
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,875	1,013	0,817	1,167	0,900	1,116	0,803	0,888	0,913	1,550	0,989	1,403	0,808
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,720	0,867	0,721	0,937	0,712	0,939	0,661	0,716	0,727	1,117	0,749	1,094	0,569
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,408	0,836	0,669	1,684	1,119	1,752	1,231	1,141	1,163	1,571	1,023	2,074	1,164
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,293	0,753	0,613	1,514	1,000	1,519	1,050	1,043	1,045	1,253	0,846	1,804	0,950
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,827	0,726	0,592	1,062	0,718	1,321	0,957	0,683	0,733	1,270	0,824	1,433	0,716
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,711	0,638	0,531	0,890	0,598	1,083	0,773	0,583	0,615	0,950	0,647	1,161	0,509
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,963	0,586	0,474	1,143	0,749	1,289	0,923	0,809	0,789	1,056	0,693	1,272	0,705
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,900	0,536	0,391	1,037	0,682	1,129	0,792	0,753	0,721	0,852	0,579	1,114	0,580
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,530	0,500	0,415	0,702	0,457	0,955	0,707	0,460	0,475	0,845	0,553	0,863	0,419
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,468	0,448	0,375	0,594	0,388	0,789	0,573	0,401	0,405	0,639	0,439	0,705	0,295
				Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			w	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qra1	Tpb-L	Tpb-L	Qra1	Qra1	Tpb-L	Tpb-L	Qra1	Qra1	Tpb-L	Tpb-L	Qra1	Qd1
				0.22g	0.16g	0.16g	0.22g	0.22g	0.16 g	0.16 g	0.22g	0.22g	0.16g	0.16g	0.22g	.22g
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			28,8	36,4	24,2	28,8	28,8	36,4	24,2	28,8	28,8	36,4	24,2	28,8	21,8
	ϕ_{min}			21,8	26,1	17,4	21,8	21,8	26,1	17,4	21,8	21,8	26,1	17,4	21,8	15,7
	C_{max} (ton/m²)			2,20	3,70	2,47	2,20	2,20	3,70	2,47	2,20	2,20	3,70	2,47	2,20	0,90
	C_{min} (ton/m²)			0,90	1,60	1,07	9,00	0,90	1,60	1,07	0,90	0,90	1,60	1,07	0,90	0,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1 año Método PEM			N	0,0807	0,0355	0,1576	0,0135	0,0790	0,0073	0,2289	0,1000	0,0740	0,0046	0,0650	0,0020	0,1340
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,1767	0,2930	0,3876	0,0625	0,2625	0,0202	0,3092	0,2700	0,2400	0,0370	0,2900	0,0140	0,3000
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,2898	0,5786	0,6401	0,1255	0,4688	0,0398	0,4027	0,4600	0,4300	0,0860	0,5400	0,0350	0,4974
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,4000	0,8220	0,8516	0,1963	0,6512	0,0674	0,4932	0,6324	0,6053	0,1513	0,7552	0,0688	0,6655

TABLA 6.10 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL												
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
										PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA	PLANAR INFINITA
				S-7	S-7	S-7	S-7	S-7	S-1	S-1	S-1	S-1	S-1	S-2	S-2	S-2
				SEC73	SEC74	SEC75	SEC76	SEC77	SEC11F(2)	LEI-tex-I-3	LEI-tex-I-3	LEI-tex-I-3	LEI-tex-I-3	LNI-I-1	LNI-I-1	LNI-I-1
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1,919	2,101	2,199	2,374	1,507	1,946	8,421	3,071	2,239	1,823	4,268	3,182	2,639
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,681	1,822	1,907	1,778	1,174	1,521	8,104	2,897	2,065	1,649	3,962	2,876	2,333
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,303	1,471	1,531	2,079	1,310	1,422	4,177	1,656	1,296	1,116	2,421	1,950	1,715
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,064	1,189	1,241	1,484	0,977	1,000	3,860	1,482	1,122	0,942	2,115	1,645	1,410
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,385	1,516	1,462	1,485	1,056	1,392	7,259	2,517	1,835	1,494	3,498	2,608	2,163
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,225	1,326	1,280	1,119	0,825	1,091	6,986	2,374	1,693	1,352	3,248	2,358	1,912
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,913	1,041	0,994	1,288	0,911	1,007	3,601	1,358	1,062	0,915	1,984	1,599	1,406
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,754	0,847	0,812	0,922	0,680	0,708	3,328	1,215	0,920	0,772	1,734	1,348	1,155
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,340	1,434	1,557	1,441	0,928	1,782	7,735	2,724	1,915	1,514	3,690	2,635	2,112
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,252	1,325	1,433	1,147	0,763	1,406	7,577	2,633	1,825	1,422	3,531	2,476	1,952
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,743	0,831	0,909	1,520	0,735	1,257	3,613	1,349	0,999	0,827	1,896	1,439	1,215
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,653	0,718	0,812	0,857	0,569	0,884	3,454	1,259	0,909	0,735	1,737	1,280	1,054
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,942	1,016	1,011	0,864	0,634	1,268	6,668	2,232	1,570	1,241	3,025	2,160	1,731
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,897	0,951	0,946	0,701	0,526	1,004	6,532	2,158	1,496	1,166	2,895	2,030	1,600
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,489	0,566	0,556	0,676	0,493	0,883	3,114	1,106	0,819	0,677	1,554	1,180	0,996
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,442	0,496	0,490	0,510	0,385	0,620	2,978	1,032	0,745	0,603	1,424	1,049	0,864
				Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	e=0,5 m	e=1,0 m	e=1,5 m	e=2,0 m	e=1,0 m	e=1,5 m	e=2,0 m
			w	W1	W1	W1	W1	W1	W2	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Material				Qra1	Qra1	Qra1	Tpbl	Tpb-L	Qd1	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L	Tpb-L
				0.22g	0.22g	0.22g	0.16g	0.16g	0,22g	0,16g	0,22g	0,22g	0,22g	0,22g	0,22g	0,22g
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			28,8	28,8	28,8	36,4	24,2	21,8	36,4	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2	24,2
	ϕ_{min}			21,8	21,8	21,8	26,1	17,4	15,7	26,1	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
	C_{max} (ton/m²)			2,20	2,20	2,20	3,70	2,47	0,90	3,70	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47
	C_{min} (ton/m²)			0,90	0,90	0,90	1,60	1,07	0,00	1,60	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0800	0,0400	0,0300	0,0081	0,1307	0,0780	0,0078	0,0371	0,0798	0,1513	0,0098	0,0135	0,0190
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,1967	0,1400	0,1051	0,0574	0,3605	0,1026	0,0092	0,0475	0,1089	0,2090	0,0147	0,0248	0,0407
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,3300	0,2600	0,1957	0,1256	0,6140	0,1354	0,0107	0,0600	0,1436	0,2767	0,0205	0,0383	0,0666
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,4603	0,3709	0,2903	0,2092	0,8283	0,1750	0,0121	0,0722	0,1779	0,3419	0,0262	0,0516	0,0926

y b) en los macizos rocosos, definida igual a la altura del talud, consecuencia de la consideración de que los bloques ruedan hasta alcanzar el ángulo de fricción del material.

En el *Anexo D.3* se condensan las longitudes calculadas (tanto para los coeficientes promedios, reconocidos como los más apropiados, como para los máximos) para todos los cuerpos potencialmente inestables discriminados por sección. Conjugados los datos obtenidos del PEM y de los modelos para distancias de viaje, se dividió la zona de estudio, según la categorización de Amenaza propuesta por González y Millán (1.999), demarcada en el "Estudio de Zonificación de Santa Fe de Bogotá" y adaptada a Buena Vista (véase la *Tabla 6.11*).

El *Plano 8* ilustra los resultados de la zonificación de amenaza a 10 años, definida en delante como actual, rótulo otorgado dado que la vida de las superficies libres, salvo por las de las secciones S1 y S2, reconfiguradas por los cuerpos de deslizamiento hace poco menos de un año, se acerca a este contexto temporal, y a 50 años. En la configuración actual, los escenarios de amenaza alta, se concentran en los dos cuerpos de deslizamientos, zonas homogéneas LEI-trat-I-1 y LEI-trat-I-2, causantes del daño de las viviendas 89 a 96, (véase el *Plano 8*); en la terraza receptora de su movilización, las unidades LEI-edu-I-1 y LEI-edu-I-2; y en los espacios de retrogresión, la zona LEI-edu-I-3. Le siguen en importancia las regiones LEI-tra-I-3, LEI-tra-I-2, LEI-tra-I-1, LEI-tra-I-5, LEI-text-I-1, LEI-tex-I-3, LEI-exr-I-1, LEI-edu-I-2, estas dos últimas por su papel como receptores de las masas potenciales a deslizarse, todas con categoría de amenaza media. Las fajas de terreno restantes, entre los que sobresalen las zonas LNI, LEI-rep-I-1, LEI-exp-I-2 y LEI-tra-I-4, obedecen a niveles de amenaza baja.

TABLA 6.11 CATEGORIZACIÓN DE LA AMENAZA (ADAPTADO DE GONZÁLEZ Y MILLÁN, 1999)

FACTOR DE SEGURIDAD		PROBABILIDAD DE FALLA		NIVEL DE AMENAZA	
DE	A	DE	A		
0.1954	1.2000	0.9569	0.3894	Alta	A
1.2000	1.900	0.3894	0.1243	Media	M
1.900	4.8764	0.1243	0.0040	Baja	B

La imagen es más drástica hacia futuro: 50 años. La regiones LEI-tra-I-1, LEI-edu-I-3, LEI-tra-I-3, LEI-tex-I-2, LEI-edu-I-2 y parte de la LEI-exr-I-1, mutan de amenaza media a alta, los deslizamiento rotacionales en los llenos traslocados y en los macizos rocosos alterados, y las fallas planares infinitas tendrían lugar protagónico. El uso residencial (o para construcción de viviendas) es vedado, restricción que sólo podría levantarse en la medida en que se hagan enormes inversiones en sistemas de estabilización, contención y mitigación, p.e. caissons, pantallas ancladas, pantallas con pilotes, muros en tierra armada, y perfilados (reconformación morfológica); sistemas que estarán invariablemente acompañados por redes de drenaje superficial (cunetas, zanjas de coronación, descoles, etc) y subdrenaje. Sólo los espacios circunvecinos a la carretera a oriente, i.e. la LEI-rep-I-1, la LEI-exp-I-2, la LEI-exp-I-1, la LEI-exr-I-2, y la ladera no intervenida LNI-I-1 (véanse los *Planos 7* y *8*), exhiben los mejores réditos; su condición de amenaza es baja. De este conjunto, la unidad LNI-I-1, es la más sensible; la ejecución de cortes o excavaciones abrirían el compás para la aparición de nuevos focos de inestabilidad, y por consiguiente para la creación de nuevos espacios de amenaza alta.

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

CAPÍTULO 7

VULNERABILIDAD Y RIESGO

7.1 VULNERABILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

La vulnerabilidad, entendida como la predisposición intrínseca de un sujeto o un elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas (La Red, 2000), es función de la exposición y de la resistencia, variables dependientes a su vez de la solicitud v.g. un deslizamiento. Es medible al grado de severidad de las consecuencias esperadas. Su cuantificación está dada por dos connotaciones: una en términos de costos por el daño físico y otra por el peso específico de las variables que inciden en la función socioeconómica (Millán, J.A., 2000). Su evolución contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso; en otras palabras, tiene como objetivo analizar la respuesta de los elementos (i.e. 96 viviendas evaluadas) frente a los diferentes fenómenos de remoción en masa potenciales y actuales y, junto con la evaluación de amenaza, dilucidar el(los) tratamiento(s) por adelantar. Dentro del referido contexto, por ejemplo, si las viviendas no se localizan en la zona de influencia o se encuentran expuestos y gracias a su resistencia no sufren daño alguno, puede optarse por convivir con el problema; en caso contrario, y según sea la gravedad de las consecuencias, se debe recurrir a obras de estabilidad o a programas de reubicación.

7.1.1 METODOLOGÍA

7.1.1.1 CRITERIOS APLICADOS

A la luz de la concepción de vulnerabilidad adoptada en este proyecto, la determinación de un índice que permita evaluarla, involucra las variables: resistencia y solicitud. Su asignación trae consigo grados de incertidumbre que aunada con la ausencia de modelos objetivos, universales y de apropiado sustento teórico, hacen que esta tarea recaiga en los métodos de racionamiento aproximado, y por ende, encierre algún nivel de subjetividad. Sin embargo, y en aras de subsanar éstas limitaciones la metodología empleada en este estudio, está fundada en la propuesta de LEONE (1996) con algunas modificaciones del consultor. Este procedimiento expresa la vulnerabilidad en función de los posibles daños que pueden sufrir los elementos situados en la zona de afectación previsible por el fenómeno, y que se definen en formas teórica y porcentual, a partir de las intensidades de daño. Aunque LEONE categoriza los niveles de resistencia con base en los sistemas estructurales de las unidades residenciales, en este caso se tuvieron en cuenta otras variables como: la calidad de la construcción, los sistemas de cimentación, la estructura y el recubrimiento de la

cubierta y los daños en la construcción, tal vez la de mayor importancia. Las mencionadas variables fueron ponderadas (véanse las *Tabla 7.1* a *Tabla 7.6*).

TABLA 7.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RESPUESTA DE LA EDIFICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL NIVEL DE RESISTENCIA						
VARIABLE	SISTEMA ESTRUCTURAL	CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN	PARTES ESTRUCTURALES (ENTREPISO)	TIPO DE CIMENTACIÓN	DAÑO EN LA CONSTRUCCIÓN	CALIFICACIÓN
Peso Importancia (%)	20	20	20	20	20	A, B, C, D, E, F o G.

TABLA 7.2 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA ESTRUCTURAL

CATEGORIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Bueno	Pórtico, mampostería estructural, muros portantes confinados	20
Regular	Muros portantes no confinados o combinación de confinados y pórtico con muros no confinados	14
Malo	Vivienda de 3 pisos con muros portantes no confinados, estructuras en materiales de recuperación o viviendas prefabricadas.	6

TABLA 7.3 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN

CATEGORIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN
Buena	Muros plomados, elementos estructurales definidos geométricamente.	15
Regular	Muros con desplome, con elementos estructurales y no estructurales no definidos, hormigueo, losas irregulares.	10
Mala	Hormigueo intenso, muros con inclinaciones severas, o con juntas totalmente irregulares.	5

TABLA 7.4 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: PARTES ESTRUCTURALES

CATEGORIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÒN
Bueno	Entrepisos y/o pisos en concreto, metal o madera y Placa como cimentación; y entrepiso y/o pisos en concreto y viga de amarre.	20
Regular	Entrepisos y/o pisos en concreto o metal y cimentación en concreto ciclópeo; y entrepisos y/o pisos en concreto y sistema de cimentación mixto (*).	15
Malo	Entrepisos y/o pisos en madera y sistema de cimentación mixto (*) o en concreto ciclópeo.	10
Pésimo	Entrepisos y/o pisos metálicos y sistema de cimentación mixto (*).	5

TABLA 7.5 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: DAÑO EN LA CONSTRUCCIÓN (TOMADO Y ADAPTADO DE DAY, 1999)

CATEGORIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	ABERTURA DE LA GRIETA (AI)	CALIFICACIÓN
Ninguno	Sin fisuras, ni fractura alguna o con grietas muy delgadas	<0,1mm	20
Leve	Incluyen grietas delgadas (o esbeltas) que pueden ser fácilmente cubiertas y fácilmente tratadas, suelen aparecer en el interior de la construcción, son visibles externamente cerca a las puertas y a las ventanas. Grietas visibles con una inspección cercana.	0,1mm<ai<5mm	18
Moderado	Grietas con alguna abertura significativa, que pueden ser resanadas convenientemente, son visibles en los muros exteriores por lo que es posible que una pequeña parte requiera ser reemplazada	5mm<ai <15mm, o varias grietas leves	15
Alto parcial	Grietas grandes que requieren un extenso trabajo de reparación, que incluye la demolición y el reemplazo de secciones de paredes (sobretodo cerca a las puertas y a las ventanas), marcos deformados, pisos y paredes perceptiblemente inclinados, pero, percibidos en un sólo elemento estructural o no estructural	15mm<ai<25mm (depende del número de elementos involucrados)	10
Alto total	Grietas grandes que requieren un extenso trabajo de reparación que incluye la demolición y el reemplazo de secciones de paredes (sobretodo cerca a las puertas y a las ventanas). Los marcos se exponen deformados, los pisos y las paredes yacen perceptiblemente inclinados, hay protuberancias en muros, pérdida de soporte en vigas y tuberías de servicio interrumpidas; todo replicado en varios elementos de la estructura	15mm<ai<25mm (depende del número de elementos involucrados)	8
Severo parcial	Requiere trabajos de reparación mayor del elemento deteriorado (i.e. reconstrucción parcial o total). Es notoria la pérdida de soporte en las vigas, las paredes deben ser apuntaladas; las ventanas se exponen rotas por deformación, y existe peligro por inestabilidad estructural en un sólo elemento de la estructura	ai≥25mm (depende del número de elementos involucrados)	4
Severo total	Acoge trabajos de reparación mayor, reconstrucción parcial o completa de elementos estructurales y no estructurales. Es patente la pérdida de porte en las vigas; las paredes deben ser apuntaladas; las ventanas se exponen rotas por deformación; y el peligro por inestabilidad estructural es latente en un varios elementos de la estructura	ai≥25mm (depende del número de elementos involucrados)	1

TABLA 7.6 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA DE CIMENTACIÓN

CATEGORIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÒN
Bueno	Zapatas y vigas de amarre	17
Regular	Zapatas aisladas o vigas de amarre.	13
Malo	Placas de concreto, concreto ciclópeo o sistema mixto.	9
Pésimo	No hay cimentación homologable con los anteriores o es inexistente	3

De esta forma, la capacidad de respuesta de la estructura o los niveles de "resistencia" fueron clasificados como:

- NIVEL A: Integra viviendas que cumplen con parámetros mínimos de rigidez y solidez estructural, tipo pórtico, mampostería estructural o de muros confinados, exenta de daños o con leves daños, buena calidad de la construcción y de cubierta, y con zapatas y vigas de amarre.
- NIVEL B: Unidades residenciales con parámetros mínimos de rigidez y solidez estructural, tipo pórtico, mampostería estructural o de muros portantes confinados, con calidad de la construcción de buena a regular, cubiertas en concreto, cimentación en zapatas y viga de amarre, con daños catalogados desde leves hasta moderados.
- NIVEL C: El sistema estructural es de muros portantes no confinados, o combinación de confinados y pórtico con muros no confinados, con daños no mayores a moderados y calidad regular de la construcción. La cubierta es en concreto, asbesto-cemento o zinc, y la cimentación es de zapatas aisladas o vigas de amarre, o de zapatas con vigas de amarre.
- NIVEL D: Encierra muros portantes no confinados o combinación de confinados y pórtico con muros no confinados, cubiertas en asbesto-cemento o zinc, con daños moderados y calidad de la construcción de regular a mala. La cimentación está compuesta por zapatas aisladas o vigas de amarre, o por placas de concreto simple o ciclópeo.
- NIVEL E: El sistema estructural es de muros portantes no confinados, o combinación de confinados y pórtico con muros no confinados, cubiertas en asbesto-cemento o zinc sobre estructuras de madera, con mala calidad de la construcción y daños hasta altos parciales. La cimentación es en placas de concreto simple o ciclópeo.
- NIVEL F: Viviendas de tres pisos en muros no confinados, casas prefabricadas o hechas con materiales de recuperación, las cubiertas son en cartón, zinc, madera, u otros menos resistentes. La cimentación es de placas de concreto simple o ciclópeo, o no es homologable con otros sistemas, o es inexistente.
- NIVEL G: Lo comprenden edificaciones en proceso de construcción y lotes vacíos.

7.1.1.2 INFORMACIÓN PRIMARIA

La recopilación de los datos que permiten evaluar la capacidad de respuesta de las estructuras y determinar el nivel de daño de sus alrededores, se solventó a través del inventario de las 96 viviendas. En tanto que la fijación de la solicitación se fundamentó en los resultados del análisis de amenaza descritos en el Capítulo 6. Sin embargo, contrario al número de predios, la cobertura de información, y en especial en el contexto social y la condición estructural, es apenas aceptable. Durante el censo no sólo la totalidad de las familias residían fuera de su hábitat rutinario, sino que una parte considerable se rehusó a colaborar, en el "conocimiento popular" la información no tiene incidencia en el proceso de reubicación de sus hogares y su destino es retornar a sus hogares aunque la percepción del peligro sea latente.

Inventario de Viviendas.

El estudio de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, en este caso las viviendas, se realizó utilizando como instrumento de recolección el "Formulario para la evaluación de daños y estado en edificaciones por fenómenos de remoción en masa". El formato está conformado por 4 secciones: La primera de ellas denominada: Datos Generales, comprende información concerniente al propietario, a la ubicación espacial y catastral (registro ausente en la información de la Secretaría Distrital de Planeación, antiguo Departamento de

Planeación Distrital: la urbanización a la fecha no está incorporada en la cartografía, véase el *Anexo E.1*) de los predios y a las características orgánicas de las viviendas. La segunda: Condición Estructural, indaga acerca de las características de fundación y de estructura de las construcciones así como de su calidad constructiva. La tercera titulada: Daños, se enfoca hacia la categorización de las averías o expresiones "patológicas" (a priori) en elementos estructurales y no estructurales, a la auscultación sobre filtraciones, y al planteamiento de alguna medida a priori de acuerdo con lo observado. Y la última condensa datos enmarcados en el contexto social. Finalmente, contiene un espacio para observaciones, en las que se plasman los comentarios de los habitantes o apreciaciones del aforador que en alguna medida contribuyen al estudio. En el *Anexo E.1* se dispone el formato de campo con el instructivo que sirvió como guía para su utilización, y en el *Anexo E.2* se compilan los inventarios de las 96 edificaciones.

Definición del Tipo de Solicitud.

A partir de la evaluación de estabilidad descrita en el capítulo 6, de los resultados de amenaza y de la estimación del mecanismo de falla se determinaron los probables tipos de solicitaciones a los que están expuestas o se expondrían las unidades residenciales, resumidas en desplazamientos altos medios y bajos, y empujes bajos y medios.

7.1.2 VULNERABILIDAD SOCIAL.

La vulnerabilidad en este contexto, se define como la susceptibilidad de un grupo social ante la ocurrencia de un desastre que ocasione daños físicos en las edificaciones, vías y elementos urbanísticos, o alteraciones permanentes o temporales en la estructura orgánica y funcionamiento de una comunidad; es una medida indirecta de su capacidad de respuesta. Aunque su evaluación es muy subjetiva, se pueden examinar variables que la revelen en alguna medida. En este orden de ideas, el acopio de datos involucró incisos como: la capacidad económica de los pobladores, la cobertura de los servicios públicos, las organizaciones cívicas, la tipología de las viviendas y, el nivel de conocimiento que los habitantes tienen del problema de inestabilidad y de las actuales y potenciales repercusiones que éste ocasiona o puede ocasionar sobre sus viviendas.

El referido abanico de variables permite, entonces, dilucidar y plantear la "línea base" del grupo social, plataforma indispensable, si se desea cuantificar de manera alguna su vulnerabilidad; estimar el tiempo de recuperación de los habitantes y especificar la ayuda necesaria del estado.

Capacidad Económica de Pobladores.

El nivel de ingresos de la población en general se puede concebir como bajo, entendido éste como el suficiente para surtir las necesidades básicas de supervivencia. De acuerdo con la percepción en el aforo de las familias, los ingresos mensuales son inferiores al salario mínimo en el 100% de las familias auscultadas, ingresos insuficientes para un grupo familiar constituido en promedio por 5 integrantes; y delicado para algunos núcleos en los que la población alcanza los 11 habitantes (fuente: Caja de Vivienda, Área de Reasentamiento); si bien gran parte de las familias carece de información (más por la reticencia de los pobladores a colaborar), se cree que el ingreso per cápita engrosa la segunda categoría; tal presunción se abstrae de los bienes muebles e inmuebles que poseen (según inspección ocular).

El valor comercial de las viviendas oscila entre los 22.48 y los 24.4 millones, el valor mínimo han sido calculado como el costo de adquisición (en el año 2004 tasado en 16.7 millones) traído a valor presente en pesos del año 2009 (al amparo de la relación de crecimiento de interés simple con una tasa promedio de 6%), y el valor de frontera superior lo establece la legislación vigente por medio del Artículo 4429 del año 2005, en el que determina que el máximo valor de una vivienda de interés social no puede superar los 50 smmlv. Puesto en síntesis, para el 76%, el valor del inmueble responde a la frontera inferior, y para el restante 24% se ajusta a la frontera superior. Empero, su costo en sí no pasaría de ser una cifra anecdótica, si no se entrelaza con la propiedad: de este particular conjunto el 47% de las unidades está hipotecado (a la inmobiliaria Iberia Ltda y el monto de la deuda asciende (en el 2009) a los $90´238.954. (Fuente: Caja de Vivienda Popular).

Cobertura de Servicios Públicos.

La totalidad de las viviendas, y por tanto sus familias, poseen servicios públicos, entre ellos se listan: energía eléctrica, acueducto, alcantarillado, teléfono y gas natural.

Organizaciones Cívicas

El conjunto residencial cuenta con una Junta de Acción Comunal parcialmente organizada (por disgregación de componentes), pero notablemente participativa. Si bien la junta propende por el bienestar social, sus temas de interés trataron hasta hace unos años: la educación, la cultura, el urbanismo y las políticas de desarrollo, pero en los últimos meses se ha concentrado en adelantar el proceso de acción popular contra la Caja de Vivienda Popular, por la "inadecuada" reubicación (percepción emanada de algunos de los residentes) de las familias en una zona de alto riesgo por fenómenos de remoción en masa, y por los perjuicios ocasionados (litigio que aun reposa bajo la expectativa de los demandantes: i.e en curso).

Tipología de las Viviendas.

Aunque el tipo de vivienda y sus características físicas se analizarán dentro del contexto de la vulnerabilidad física, las construcciones en sí mismas son indicativas de la calidad de vida de los habitantes. Como parte de la consolidación urbanística, el 100% de las construcciones exhibe sistema estructural, clasificado como mampostería estructural con refuerzo vertical de acero embebido en celdas rellenas de concreto, que conforman un sistema monolítico (por lo menos bajo la perspectiva teórica). También tiene refuerzo horizontal cada cierto número de hiladas. El refuerzo evidencia insuficiencia para resistir la totalidad de las fuerzas de tensión y, los esfuerzos de compresión y cortante, generados por el empuje de tierras y en general por las deformaciones combinadas. Las viviendas entregadas (por la urbanizadora) a las familias, que consistían en 2 plantas con cubierta en placa de concreto prefabricada, progresivamente (el 24% de ellas) aumentaron verticalmente hasta el tercer nivel. Estas ampliaciones revelan hoy día el uso de técnicas de construcción precarias, sin ningún control de calidad, y exhibe en conjunto la composición heterogénea de materiales, y de los sistemas constructivos híbridos explicados por los escasos ingresos familiares.

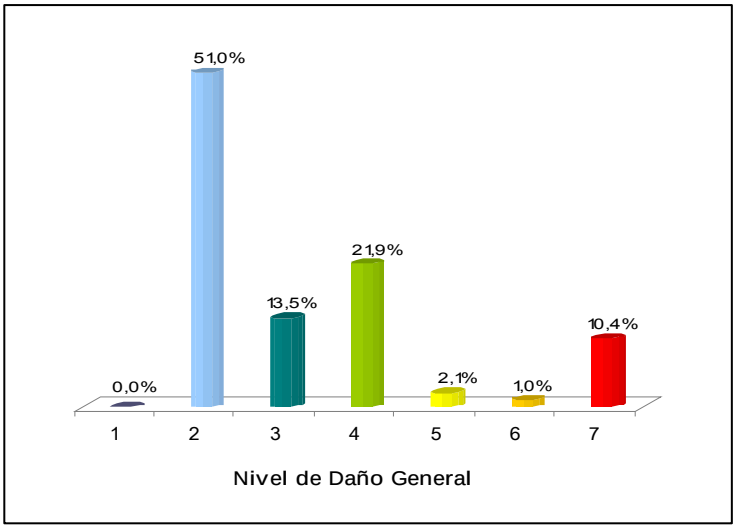
Percepción del Peligro.

La totalidad de los habitantes manifiesta considerables estados de preocupación por los procesos de inestabilidad. Condición vislumbrada desde el principio por los antecedentes (aun evidentes) dentro del conjunto residencial. Este fenómeno es el de mayor preocupación, por encima de la caída de bloques, de los robos y de los otros deterioros de orden social.

Daños Generales de la Construcción.

El nivel de daño general en las viviendas se deduce con base en las características geométricas de las grietas en los elementos de las estructuras, en su ubicación, su cantidad, y su extensión y abertura. Esta información se obtuvo a partir de la auscultación general de las 96 edificaciones y de la inspección detallada de una muestra representativa de 22 unidades residenciales, seleccionadas espacialmente de manera tal que abarcaran la mayoría de los bloques constructivos (agrupadas en módulos de cuatro, siete y nueve casas). Esta información fue complementada por los comentarios de sus habitantes. Los criterios encaminados a establecer el nivel de daño general de las estructuras, se consignan en el instructivo del formato de recolección, dispuesto en el *Anexo E.2*. En la *Figura 7.1* se exponen los resultados de éste ítem y de ella se puede extractar que la totalidad de las viviendas presenta algún tipo de daño, el 51% alcanza daños leves (nivel 2) y una proporción cercana al 38% revela daños moderados y altos, y el restante 11% se ha calificado con daños severos.

FIGURA 7.1 DAÑOS GENERALES DE LAS CONSTRUCCIONES



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Recuperación Económica

Con el fin de cuantificar la vulnerabilidad social se determinó como unidad comparativa el tiempo, en años, que tomaría cada núcleo familiar en recuperar su patrimonio actual. La recuperación se hace efectiva en el momento en que, a través de un ahorro mensual, la acumulación monetaria iguale al monto patrimonial, hoy día. La tasa de ahorro, es decir, la capacidad de endeudamiento, se define como una fracción del salario, y es función del ingreso mensual; para familias con ingresos de hasta de un (1) salario mínimo, escenario por excelencia en la urbanización, la capacidad de ahorro es de apenas el 10%, y este criterio combinado con el porcentaje de perdida física en la vivienda (valores fluctuantes entre el 20 y el 100%), hacen que el espectro de los tiempos de recuperación abarquen desde los doce (12) hasta los cincuenta y ocho (58) años, mientras que las que perciben más de dos (2) salarios mínimos la tasa de endeudamiento asciende al 30%, como lo refrenda la *Tabla 7.7*.

TABLA 7.7 CAPACIDAD DE ENDEUDAMIENTO

CATEGORÍA DE INGRESOS	CAPACIDAD DE ENDEUDAMIENTO
1	0.1
2	0.2
3	0.3

Ahora bien como las pérdidas potenciales por la ocurrencia del evento, alcanzan el 100% del patrimonio, esquema ratificado por los propietarios de las viviendas 88 a 96, parece sensato relacionar la fracción del patrimonio a recuperar, con la intensidad de daño, definida en la *Tabla 7.10* (véase numeral 7.1.3 Vulnerabilidad física - Cualificación de daños). Así, en viviendas con intensidades de daño 1, las pérdidas esperadas se aproximan al 10% de su patrimonio, y las de intensidad de 5, superan el 50% que simboliza el colapso total de la edificación. La relación entre la intensidad de daño y el porcentaje de pérdidas se ilustra en la *Tabla 7.8*.

TABLA 7.8 PORCENTAJE DE PÉRDIDAS

INTENSIDAD DE DAÑO	PORCENTAJE DE PÉRDIDAS
1	10%
2	20%
3	30%
4	40%
5	>50%

La recuperación económica en años, se determinó como:

$$RE = \frac{Patrimonio}{SalarioMensual} * \frac{\%Pérdidas}{1200} * CE^{-1}$$

en la que:

RE : Recuperación económica en años
$\%Pérdidas$: Fracción del patrimonio, véase la *Tabla 7.8*.
CE : Capacidad de endeudamiento *Tabla 7.7*.
El resultado del análisis anterior se registra en la *Tabla 7.9*.

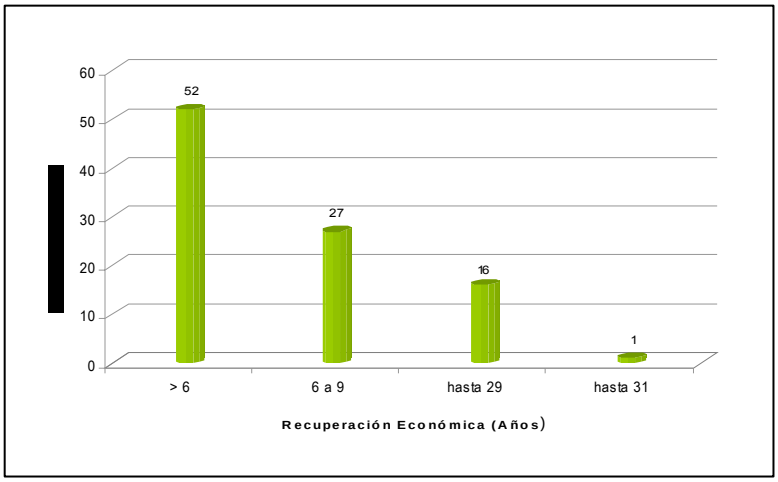
Bajo el contexto descrito ante la ocurrencia del evento la totalidad de las familias se ven afectadas. Sin embargo, el 54% tardaría de 1 a 6 años para recuperar su patrimonio, el 28% necesitaría hasta 9 años, y el 18% esperaría no menos de 31 años, clasificación expresada en la *Figura 7.2*. La recuperación de cada

núcleo familiar es inviable, el tiempo necesario es excesivo; la participación del estado y del distrito, en cabeza de sus entidades v.g. Caja de Vivienda Popular, es incuestionable.

TABLA 7.9 RECUPERACIÓN ECONÓMICA

RECUPERACIÓN ECONÓMICA (AÑOS)	
TIEMPO	% FAMILIAS
> 6	54%
6 a 9	28%
Hasta 29	17%
Hasta 31	1%

FIGURA 7.2 RECUPERACIÓN ECONÓMICA DE LAS FAMILIAS EN AÑOS



7.1.3 VULNERABILIDAD FÍSICA

La vulnerabilidad física –viviendas-, se expresa como una medida porcentual de los costos de las averías originadas por un agente destructor, en este caso los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM). La fracción (expresado en partes por uno) del perjuicio sobre el inmueble, definido con ID, índice de daño, es proporcional a la exposición de los elementos e inversamente proporcional a su resistencia. El primer tópico se estudió con base en las posibles longitudes de viaje, y el segundo con la tipología de viviendas, los datos que conllevan al hallazgo del índice de vulnerabilidad se explican en la *Tabla 7.12*.

Cualificación de Daños.

Los perjuicios que se producirían sobre las unidades, están condicionados por dos grupos de variables: el de exposición y el de resistencia. El primero involucra el tipo de evento, la localización de las viviendas con

respecto al mismo y la solicitación que el proceso ejerza sobre los componentes; el segundo, cubre la calidad, propiedades y atributos de las casas, que, como se ha expresado antes, se condensa en la tipología. La contribución de las variables ya expuestas para este estudio se registra en la matriz de intensidad de daño *Tabla 7.10*. La asociación de la intensidad con una descripción cualitativa del perjuicio y con una tasa de daño, se hizo de acuerdo con la tabla propuesta por el DRM (DELEGATION AUX RISQUES MAJEURS) y presentada por LEONE, 1996. (véase la *Tabla 7.11*).

TABLA 7.10 MATRIZ DE INTENSIDAD DE DAÑO

SOLICITACIÓN	A	B	C	D	E	F	G
Desplazamiento vertical bajo (<1cm)	1	1	2	2	3	3	4
Desplazamiento vertical medio (1cm – 2cm)	1	2	2	3	4	4	5
Desplazamiento Vertical Alto (>2cm)	2	2	3	4	4	5	5
Empuje bajo (h*< 1/3)	2	2	2	3	3	4	4
Empuje medio (1/3 < h* < 2/3)	2	3	3	3	4	5	5
Empuje Alto (h*>2/3)	3	3	4	4	4	5	5

* H: ES LA ALTURA DEL ELEMENTO ESTRUCTURAL DE LA EDIFICACIÓN QUE PUEDE SER CUBIERTO POR LA MASA ACTIVA.

TABLA 7.11 TABLA DE CLASIFICACIÓN DE DAÑOS PROPUESTA POR DRM

INTENSIDAD DE DAÑO	MODOS DE DAÑO	PORCENTAJE DE DAÑO
1	Daños ligeros no estructurales. Estabilización no afectada.	0.01 – 0.1
2	Fisuración de muros. Reparaciones no urgentes.	0.2 – 0.3
3	Deformaciones importantes. Fisuras en elementos estructurales.	0.4 – 0.6
4	Fracturación de la estructura. Evacuación inmediata.	0.7 – 0.8
5	Derrumbe parcial o total de la estructura	0.9 – 1.0

Área de Afectación

Es la medida de la zona averiada en la ocurrencia del evento, y es siempre mayor al área de exposición (véase la *Tabla 7.13*).

Tasa de daño

La tasa de daño (TD) representa el porcentaje de destrozos en la vivienda y se obtiene al tomar el índice de daño -en términos de porcentaje de daño- multiplicado por el área de afectación.

TABLA 7.12 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

$$TD = \%daño \times A_{afectación}$$

TABLA 7.13 ÁREA DE AFECTACIÓN SEGÚN ÁREA DE EXPOSICIÓN

ÁREA AFECTADA	
ÁREA EXPUESTA (EN TANTO POR UNO)	ÁREA AFECTADA (EN TANTO POR UNO)
<=0.20	0.3
0.21-0.40	0.6
>0.40	1

Costo de daños o Costo de falla

El costo de los daños, C_f expresado en pesos, se totaliza al sintetizar el valor inicial del inmueble, VII (también en pesos) y la tasa de daño, TD, así:

$$C_f = VII \times TD$$

Índice de Vulnerabilidad Física: Ivf

Es entendido como el porcentaje de pérdida esperado, y se evalúa en función del valor inicial de la vivienda antes del evento y el valor final una vez que ocurre el daño.

$$IVF = \frac{C_f}{VII}$$

C_f : Costo de falla

VII : Valor inicial de inmueble

La *Tabla 7.12* muestra los diferentes componentes del análisis y el índice de vulnerabilidad para el abanico completo de viviendas; por su parte la *Tabla 7.14* categoriza los niveles de vulnerabilidad desde Bajo hasta Alto.

7.1.4 ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD

A partir de los resultados arrojados en la *Tabla 7.12*, se infiere, que el 46% de las viviendas manifiestan vulnerabilidad alta y el restante 54%, media. Este fenómeno encuentra explicación en las altas tasas de daño: los sistemas estructurales no sólo no cumplen satisfactoriamente las exigencias de la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-98), sino que la totalidad viviendas exhiben alguna patología de daño, y poseen una deficiente calidad de construcción, con entrepisos en prelosas y sistemas de cimentación irregulares y exiguos en cuanto a continuidad y sección. Adicionalmente, su alta vulnerabilidad se lo debe a sistemas de construcción de pobre respuesta sísmica, y altos índices de daño para las solicitaciones de empuje y desplazamiento vertical. En este orden de ideas, los niveles altos de vulnerabilidad coinciden viviendas de mala calidad y mayor exposición, es decir las numeradas como 16 a 23, 39 a 46, 59 a 71 y 82 a 96. Las

viviendas restantes se califican con vulnerabilidad media. Cabe notar que ninguna vivienda adquiere la calidad de vulnerabilidad baja, tal y como lo ilustra el *Plano 9.*

TABLA 7.14 CATEGORIZACIÓN DE LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD (IVF)

NIVEL DE VULNERABILIDAD	INTERVALOS DEL IVF
Bajo	<= 0.25
Medio	0.25 – 0.50
Alto	> 0.50

7.2 VULNERABILIDAD SÍSMICA

Involucra los antecedentes relevantes para la evaluación de la respuesta sísmica-estructural de las edificaciones, y describe los criterios que intervienen en la modelación, el análisis y la verificación de la capacidad de la estructura. Del mismo modo, se incluyen los requerimientos de la armadura que pueden ser verificados con el fin de establecer la capacidad de la estructura para incursionar en el rango inelástico.

La verificación estructural de una edificación existente es un proceso más complejo que su diseño, puesto que se debe proyectar el comportamiento a partir de información no siempre disponible o verificable. Por esta razón, y en forma previa a la verificación, se debe efectuar el estudio fiable de las propiedades mecánicas de los materiales, la prospección de su estado, la verificación de los detalles del refuerzo efectivamente dispuesto en obra, y la corroboración de la geometría, las modificaciones y las cargas operativas en la estructura, todo evaluado a la luz de los requerimientos fijados por la NSR-98. Conjunto de labores denominado en adelante componentes del sistema.

Todo este complejo de acciones tiene como objetivos: deducir sus implicaciones en el deterioro estructural (evidente hoy día), determinar la capacidad de habitabilidad de las edificaciones, y definir el conjunto de recomendaciones para su recuperación. En adelante se discriminan los factores de mayor relevancia en el desarrollo de cada uno de los componentes involucrados.

7.2.1 EVALUACIÓN PATOLÓGICA

7.2.1.1 AUSCULTACIÓN

Es el proceso que permite detallar el estado de los elementos estructurales y no estructurales de las viviendas del estudio, con el fin de evaluar las condiciones de funcionamiento actual, cualificar su nivel de daño y descifrar las causas de su deterioro. Para tal fin, se diseñó un formulario de inspección en el que se contrasta la geometría de la edificación y de sus elementos constitutivos con el diseño, se reseñan gráficamente en planta y en alzada los daños, se precisan los materiales que componen las partes, y se adelanta una reseña fotográfica, de manera que proporcionara los insumos suficientes y necesarios para la evaluación patológica (*véase el Anexo-E.4*).

De las 96 viviendas de la urbanización, se extrajo un grupo de 25 viviendas, equivalente al 26%. Muestra suficientemente representativa. Su selección primaria tiene como factores discriminantes a) la revisión de por lo menos una (1) vivienda por bloque estructural, b) el barrido completo del conjunto, y c) el seguimiento de los daños en las construcciones estudiadas por la Universidad Nacional, UN (2006). Criterios modificados en el curso de las actividades, por la influencia de agentes exógenos al grupo de trabajo. Se excluyeron las viviendas colapsadas, por los riesgos inherentes para el grupo de trabajo.

Tras varios intentos fallidos por la renuencia de la comunidad para permitir el acceso a sus propiedades, la actividad fue posible solamente gracias a la mediación de la Caja de Vivienda Popular; el esquema inicial (cantidad y distribución espacial) cambió y el número se redujo a 24, no obstante, 14 con autorización expresa y escrita del propietario (véase el *Anexo E.7*), y las 10 restantes de fácil acceso puesto que están abiertas o sin puerta. La unidad muestral se conformó, entonces, por las habitaciones: 2,13,16,19,20,21, 22, 23, 29,33,39, 42,44, 48, 52,55, 63, 65, 67, 69, 71,75, 79 y 82.

Es una constante los daños en placas de contrapiso y las grietas de corte en los muros que siguen la pega de los bloques de mampostería. Aunque estos daños se han intentado resanar resurgen como evidencia del movimiento de las estructuras. No obstante el nivel de daño es variable en el universo muestral; las viviendas 2, 19, 20, 21, 22, 23, 33, 48, 52, 55, 75, 79 y 82, es decir el 54.16%, tienen nivel de daño moderado, explicado en grietas en las placas de contrapiso de hasta 5 mm de abertura, y separación y grietas en los bloques de mampostería en el primer y el segundo piso. Las viviendas 20 y 42, el 8.3% de la muestra, son edificaciones de tres pisos y terraza, que poseen: grietas en las placas de contrapiso, así como en las de primer y segundo piso, que van desde el milímetro hasta los 7mm; y grietas y separación de los bloques de mampostería en más de 2 muros por piso, daños que clasifican a las casas en el nivel alto parcial.

El 12.5%, que corresponde las edificaciones: 16, 39 y 44, muestran un nivel de daño alto total. La 16 y la 39 develan grietas en las placas de contrapiso de hasta 7 cm de abertura, y longitudes que alcanzan los 7 m., grietas en las placas de segundo piso de hasta 2 mm de abertura; y separación de los bloques de mampostería de los muros estructurales, con aberturas de hasta 4 cm. Coincide en estas dos edificaciones su evidente separación del módulo estructural contiguo. La edificación 44, conformada por tres niveles y terraza, presenta grietas en la placa de contrapiso de hasta 1 cm de abertura y en los muros de los tres pisos de hasta 3 cm en los bloques de la mampostería estructural.

El nivel de daño severo total involucra las casas: 63, 69, 65 y 67. Parte de su estructura está colapsada en el primer y el segundo piso, producto del empuje de las viviendas volcadas y que descansan en su parte posterior; aunque es lenta y apenas perceptible, se dibuja cierta rotación de la estructura hacia el frente. Las únicas con daño leve son la 13 y la 29; las grietas son de 2 mm de abertura en la placa de contrapiso; y los muros y las placas de entrepiso participan sin deterioro alguno.

Del conjunto de edificaciones auscultadas solo tres son comunes con el estudio de la Universidad Nacional (2006): las viviendas 22, 23 y 39; las dos primeras estudiadas bajo el amparo del levantamiento general y la última acorde con el inventario detallado. La vivienda 22 conserva inalterados los daños en los muros del baño y del patio, matizados por infructuosas reparaciones del pañete.

La vivienda 23 al día de hoy evidencia grietas en la placa de contrapiso, en los muros del patio y de la cocina, a pesar de la incorporación de una columna en el inicio del patio, no registrada en el estudio de la UN. Sus nuevas manifestaciones están patentes en las grietas de corte en el muro de la fachada.

La casa 39 dibuja gran avance de los daños en la placa de contrapiso, y aumento en la separación tanto de los bloques de mampostería del muro posterior del patio como con el bloque estructural contiguo, en proporción directa con la altura y registra 16 cm tomados a la altura de la placa de entrepiso de la vivienda 40.

7.2.1.2 CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN

Está fundada en los principios del razonamiento aproximado, i.e. en técnicas heurísticas: método observacional y evaluación de expertos (v.g. el Método Delphi, Sánchez Silva, 2004). Tiene, entonces, como pilar fundamental la experticia del ingeniero patólogo, y como procedimiento básico: la auscultación visual, repetida en diversas oportunidades, y el ensayo de unidades muestrales, i.e. testigos (muretes, núcleos en vigas de entrepiso y de cimentación, refuerzo, etc.). Eslabón último que le sirve a su vez de comprobación.

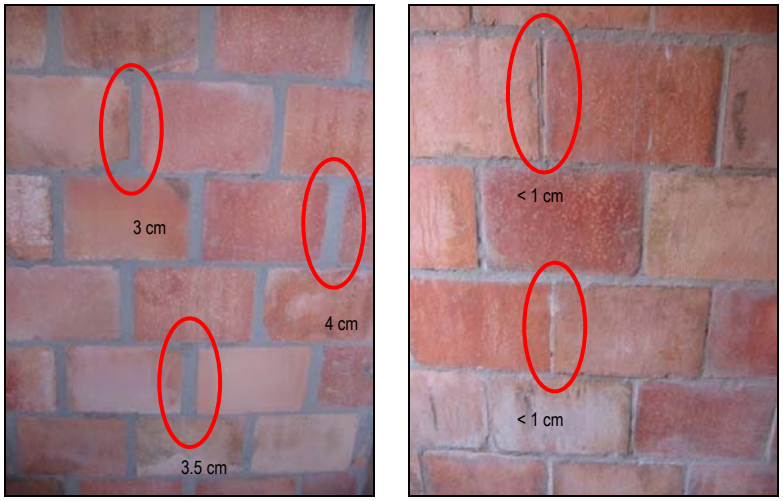


FOTO 7.1 MUROS EN MAMPOSTERÍA CON PEGAS DE ESPESOR VARIABLE



FOTO 7.2 MUROS EN MAMPOSTERÍA SIN MORTERO DE PEGA

Buenavista oriental, en sus tres módulos básicos y en sus 96 viviendas, tiene como común denominador los errores constructivos. Algunos ejemplos se describen en los siguientes párrafos.

- Los espesores de las pegas en la mampostería son irregulares (heterogéneas); en algunos elementos el espesor alcanza los 4 cm., y en otros toca los 2.0 cm o simplemente está ausente (véase la *Foto 7.1* y la *Foto 7.2*).
- Los cortes de las unidades de mampostería son de muy mala calidad, ejemplos de esta práctica se ilustran en la *Foto 7.3*.



FOTO 7.3 MUROS EN MAMPOSTERÍA CON BLOQUES MAL CORTADOS

- Los muros ocasionalmente son irregulares, algunos elementos que integran la unidad sobresalen del conjunto, evidencia registrada en la *Foto 7.4*



FOTO 7.4 MUROS EN MAMPOSTERÍA CON IRREGULARIDADES

- En las fachadas las unidades de mampostería reposan alineadas verticalmente sin traslapos (aparejo en petaca), práctica prohibida por la NSR-98 para los sistemas de muros en mampostería reforzada (véase la *Foto 7.5*).



FOTO 7.5 ELEMENTOS DE LOS MUROS DE FACHADA SIN SUJECIÓN O TRASLAPO.

- La calidad de la mampostería del tercer piso, ligada a la de autoconstrucción (ampliaciones adelantadas por los dueños de las residencias) es pésima. Los bloques de mampostería son diversos en tipo, calidad y dimensiones; (véase la *Foto 7.6*) en algunas casas los cerámicos son de perforación horizontal, lo que sugiere que carecen de refuerzo vertical.



FOTO 7.6 PÉSIMA CALIDAD DE LA MAMPOSTERÍA CON UNIDADES DE PERFORACIÓN HORIZONTAL

- Los antepechos y los muros del último nivel (tercer piso o terraza) operan sin viga cinta de remate, práctica capturada en la *Foto 7.6* y en la *Foto 7.7*



FOTO 7.7 MUROS DE TERCER PISO SIN CINTA DE REMATE

- La viga en concreto reforzado, dispuesta en la zona central de la placa del segundo piso en la casa 25, presenta varias fisuras, y al impacto suena hueca, lo que hace suponer que no es maciza (véase la *Foto 7.8)*. El elemento a la vista tiene un acho de 19 cm., pero luego de la toma del ultrasonido, que implicó el retiro del revestimiento, su espesor efectivo es de 15 cm.



FOTO 7.8 VIGA EN CONCRETO CON FISURAS. (CASA NO. 25)

- Las placas del primer piso (o contrapiso) están en mayor o menor grado fisuradas (véase la *Foto 7.9)*



FOTO 7.9 PLACA DE CONTRAPISO CON FISURAS INTERCONECTADAS.

De las imágenes y observaciones anteriores, es evidente que la mayoría de los errores se concentran en los muros, que son los elementos de mayor solicitación de cargas y resistencia sísmica dentro del sistema estructural; debido a su importancia es posible concluir que la calidad de la construcción es mala para la primera y la segunda planta (edificados por parte de la constructora), y pésima en el tercer piso y la terraza, propias de la autoconstrucción.

7.2.2 VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL

7.2.2.1 CONTRASTACIÓN DISEÑO VS CONSTRUCCIÓN

El primer paso para la verificación estructural, reside en la estructuración y conformación de un modelo fiable, que represente a las estructuras (hoy en pie edificadas). Modelo integrado por dos grandes componentes: el geométrico y el mecánico; el primero encierra el dimensionamiento y la distribución espacial de las partes y del todo, y el segundo reposa en la obtención de los parámetros operativos de trabajo de los elementos constitutivos.

La contrastación entre el diseño (específicamente los planos) y la construcción, es tal vez, el procedimiento más simple y directo para definir el componente geométrico, procedimiento que requiere la selección de una muestra representativa (en este caso de veintidós viviendas) y su levantamiento arquitectónico en campo. Lastimosamente el diseño y la realidad en ocasiones parecen andar por sendas diferentes, premisa no del todo ajena en Buena Vista III etapa, para la muestra basta con citar las siguientes conclusiones:

- Las memorias de cálculo se enfocan exclusivamente al diseño de un bloque de dos casas, esquema distante al de construcción; la urbanización integra unidades básicas (bloques) de cuatro, siete y nueve

viviendas, conjuntos que estructuralmente tienen diferente respuesta entre sí y con el diseño frente a cargas dinámicas y estáticas.

- Los planos estructurales carecen de detalle alguno para los muros en mampostería reforzada, en lo referente al refuerzo por cortante, y para los alzados de las celdas reforzadas.

- En los planos, específicamente en las plantas de refuerzo, no existe continuidad entre las celdas reforzadas del primer y del segundo piso, ni entre las del segundo piso y la terraza. En obra fue difícil verificar su continuidad, puesto que muchas operan ocultas.

- En obra resalta la diversidad en las unidades de mampostería estructural; unidades no especificadas ni diagramadas en los planos estructurales de construcción. Tanto así, que en el curso de los ensayos de patología se encontraron dos (2) tipos de muretes, cada uno con diferentes dimensiones en sus componentes individuales de arcilla.

- Los tamaños y las dimensiones de los elementos estructurales construidos: espesor de muros, tamaño de vigas, distribución de la estructura, losas y prelosas, corresponden con lo propuesto en el diseño. Los pocos refuerzos visibles en obra parecen coincidir con los planos; no obstante, la mayor parte del acero de refuerzo se encuentra embebido por las masas de concreto, y es prácticamente imposible verificar su existencia y la distribución de las parrillas.

- En la planta del segundo piso de los planos, se indica que el muro de separación entre las dos casas se extiende hasta la fachada principal, mientras que en la obra, este muro quedó por dentro de la fachada principal.

- También están ausentes los detalles del amarre de los muros a la cimentación, de las vigas dinteles, de las vigas de amarre de muros, del tratamiento del suelo de fundación, ni de los elementos de carga no estructurales.

- La pega de la mampostería es deficiente, oscila entre 0 cm y los 4 cm, en algunos casos se encuentra pega superior e inferior pero no hay pega lateral.

- Las unidades de mampostería empleadas muchas veces estaban quebradas, la restitución del pedazo faltante tiene lugar con pega.

- Los muretes poseen resistencia a la compresión f´m, próxima a los 78 kg/cm^2 , (véase el *Anexo E.5*) cifra muy inferior al umbral admisible para los muros de mampostería estructural, fijada entre 110 y 140 Kg/cm^2.

- Las vigas de remate de muros, y las vigas de amarre de los muros en los entre pisos, están ausentes. Las estructuras tampoco acogen la conformación de placas aéreas.

- Algunas placas aéreas exhiben fisuras, producto en algunos casos de los asentamientos y en otras de un mal curado. A esto se le suma que no hay evidencia de conexión entre los elementos que conforman las placas aéreas.

- Las prelosas, al igual que las losas, también exponen fisuras, originadas por procesos de trabajo mal llevados. Esta patología sumada a un mal curado facilita la infiltración a los pisos inferiores.

- La placa de contrapiso no tiene el espesor precisado en las memorias de diseño.
- La placa de cimentación encierra evidencia de haber sido intervenida en repetidas ocasiones bien por fisuración o bien por incorporación de tubería (planteamiento ratificado por algunos propietarios). Durante la extracción de los núcleos quedo en evidencia la ausencia del refuerzo. Por tal motivo la cimentación no corresponde a la mostrada en planos.

- En los planos los muros involucran trabe, no obstante en obra operan sueltos, en especial los muros de las fachadas, carentes de conectores.

- Los muros, presentan grietas en las esquinas, entre la placa y el muro y diagonales al cuerpo.

- Los andenes y las zonas verdes yacen hundidos con respecto a las casas.

- Las diferencias entre los planos arquitectónicos y la construcción son notorias. Algunos ejemplos son: la posición del baño en el primer piso en lugar del segundo nivel como lo sugiere el diseño, la ausencia de un muro en el primer nivel (véase el elemento M5 en el Formato de Auscultación Detallada, *Anexo E.4*), el desplazamiento de algunos muros en la segunda planta y el espesor de los muros (inferior en 0.03 m en la obra)

- La resistencia del concreto es muy disímil entre elementos, y su umbral apenas alcanza el 65% de la indicada en los planos, y es inferior al 85% lo permitido por la NSR-98, capítulo C.5.6.

7.2.2.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

7.2.2.2.1 Elementos Objetivo

Se denomina así a la muestra representativa (o espacio muestral) a partir de la que se deducen las propiedades mecánicas (de resistencia) esperadas en los elemento constitutivos (vigas, placas, muros, etc.) de las viviendas. Su definición y selección está regida por los siguientes preceptos básicos:

- El tamaño muestral se limita a 24 viviendas, acorde con los Términos de Referencia y con la auscultación detallada.
- Al menos 1 casa por cada bloque o edificación de viviendas, hace parte del espacio muestral.
- Las viviendas colapsadas o a punto de colapso, fueron excluidas por los riesgos inherentes para el personal involucrado durante la toma de las muestras.
- Las muestras se tomaron en elementos sin signos de: pérdida de sus propiedades mecánicas, sin fisuras, ni deterioros, sin descomposición, envejecidos y/o corroídos.

La actividad inició el 18 de julio de 2009, con la presentación a las entidades supervisoras del plan inicial de auscultación detallada, plan que fue reemplazado en dos ocasiones adicionales, como consecuencia de la renuencia de los propietarios, y su negativa ante la solicitud de la autorización para acometer los ensayos. Hasta el 11 de septiembre de 2009, luego de la mediación de la Caja de Vivienda Popular, en persona de la trabajadora social Lindsay Benítez, con la autorización para el inventario de daños y la toma de muestras en veintitrés (23) edificaciones, relacionadas en la *Tabla 7.15*; labor esquematizada en la *Foto 7.10*.

TABLA 7.15 ENSAYOS DE PATOLOGÍA ESTRUCTURAL

TIPO DE ENSAYO	DESCRIPCIÓN	Nº DE VIVIENDA
A	NÚCLEOS MÁS ESCLEROMETRÍA	2,16,48,21,63,75 y 82
B	ESCLEROMETRÍA Y ULTRASONIDO	33,23,21,20,22,29,55,39,79,16,52,65 ,42,13 y 75
C	EXTRACCIÓN DE MURETES	19,75,39 y 82
D	EXTRACCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO	67 y 71

7.2.2.2.2 Análisis de Resultados

La resistencia promedio del concreto se dedujo exclusivamente de las pruebas de compresión simple de los testigos (núcleos) ensayados. Los registros de esclerómetro y ultrasonido, tomados en los mismos elementos muestreados, sirvieron para deducir el porcentaje de la prueba "inexacta" no destructiva, o el factor de corrección; factor deducido para los dos en 0.56. De esta manera se obtiene un punto equiparable entre los ensayos de esclerometría, ultrasonido y compresión en laboratorio (ensayos GIA y estudio UNAL 2006).



FOTO 7.10. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LOS ENSAYOS DE CAMPO Y LABORATORIO. A) EXTRACCIÓN DE NÚCLEO EN POSICIÓN HORIZONTAL EN EL ESPACIO DE LA ESCALERA. (B) EXTRACCIÓN DE MURETE EN LOS MUROS DE CARGA. (C) PRUEBA DE ULTRASONIDO EN LA VIGA DESCOLGADA DE PISO 2. (D) EXTRACCIÓN DE NÚCLEO EN POSICIÓN VERTICAL EN LA VIGA DE CIMENTACIÓN. (E) ENSAYO DE NÚCLEO DE CONCRETO A COMPRESIÓN Y (F) FALLA DE MURETE EN EL LABORATORIO.

La caracterización mecánica de los cimientos recayó, luego de numerosos intentos, siete en total, en dos (2) de los núcleos útiles, los restantes perdieron su integridad durante la extracción. Para las estructuras aéreas la muestra alcanzó los 4 núcleos. En cuanto a los muretes, se tomaron cuatro (4) muestras, tres de ellas típicas y una atípica, que arrojó resistencia a la compresión un poco menor. Los valores obtenidos se adoptaron como "exactos". Las barras del acero de refuerzo ensayadas se limitaron a dos muestras, que por su representatividad, abrieron el compás para trabajar con el promedio aritmético. En el *Anexo E 5*, reposan los resultados de cada uno de los ensayos de caracterización mecánica de los elementos estructurales.

El derrotero descrito da pie para fijar la resistencia de los concretos entre los 81 Kg/cm^2 y los 193 Kg/cm^2, intervalo que deja al descubierto la amplia dispersión de los ensayos; la resistencia a la compresión media de la cimentación toca los 122.5 Kg/cm^2 (equivalente al 58% del valor especificado en los planos – f'c=210 Kg/cm^2) y de la población (elementos aéreos y de piso) bordea los f'c=136.82 Kg/cm^2; y la desviación estándar de la población se posiciona en 55,41 Kg/cm^2. En este marco de acción resultan evidentes las diferencias en la calidad de los materiales empleados en la construcción, calidad tasada por lo bajo, al punto de violar la exigencia mínima fijada en el capítulo C.5.6 "Evaluación y Aceptación del Concreto", de la NSR-98, que precisa en promedio el 85% de la resistencia especificada mediante fallas de núcleos, sin que ningún núcleo se encuentre por debajo del 75%.

La respuesta mecánica de los muretes, aunque similar a la de los concretos en su baja confiabilidad, diagrama en el dominio [56 Kg/cm^2 – 102 Kg/cm^2], difiere de ellos en que la desviación estándar, equivalente a 20 Kg/cm^2, es menor y el promedio de la resistencia, f'm=78.687 Kg/cm^2, es superior, en el 121%, a la fijada en las memorias de diseño: f'mo=65 Kg/cm^2.

El acero de refuerzo, definido casi exclusivamente por alambres lisos, exhibe como resistencia a la fluencia promedio Fy=59.5 Kg/cm^2; estado límite equiparable y similar al de los aceros de refuerzo nacionales; conclusión que despeja cualquier estela de duda en este componente, y que pone de manifiesto el empleo con parámetros de ingreso en la evaluación estructural (numeral 7.2.2.3) de la resistencia hallada, en los aceros lisos; y de los valores estándar de f'y=4200 Kg/cm^2, para diámetros Nº4 a Nº8, y f'y=2400 Kg/cm^2, si el diámetro es Nº2 o Nº3, en las barras de acero corrugado.

La amplia dispersión en las propiedades de los concretos y muretes, sumada a la participación de los muros de cerramiento de los patios, y a los baños vinculados en obra (i.e. carentes de diseño); y a las modificaciones arquitectónicas "sufridas" en por lo menos el 20% de las viviendas, a manos de los propietarios, y expresadas en: placas en los patios y cierres de aislamientos (y que redunda en sobrecarga) dejan de manifiesto la precaria calidad de la construcción y el compromiso de la cimentación en el deterioro de algunas construcciones v.g. las casas 39 a 46 y 16 a 23. Responsabilidad intuida por el basculamiento de los módulos, por el reticulado de las grietas en la placa de piso, y por la concentración de las deformaciones en la parte posterior y anterior de las viviendas; pero que no es contributiva en los daños de las casas 88 a 96.

7.2.2.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Es el último eslabón de la cadena predictiva de la vulnerabilidad sísmica; retoma los demás componentes de la verificación estructural, v.g. la auscultación, la contrastación, y las propiedades mecánicas, entre otras, y los integra y acopla en el modelo numérico, destinado a conocer la respuesta de cuatro, siete y nueve viviendas, ante la solicitación de cargas (muerta, viva y sismo) y dilucidar el papel del diseño y de la

construcción como agentes contribuyentes o detonantes del deterioro de las construcciones, con elementos finitos, gracias al programa ETABS v.g. 5.0 y compuesto por dos fases: una con los parámetros, mecánicos y geométricos, propios del diseño, y en la que los planos de diseño son herramienta básica de trabajo, y la otra con los obtenidos en el trabajo de campo, es en "sensu stricto" el "modelo real".

El análisis de las cargas: muerta, viva, y por sismo armoniza tanto la experticia del cuerpo técnico como los derroteros fijados por la Norma Sismo Resistente: la NSR-98. Los dos primeros grupos: la muerta y la viva, si bien es innegable su importancia, son las de menor complejidad (en el cálculo) y variabilidad; su valor esperado (o más probable) se fijó en 5.3 ton (3.5 ton para la carga muerta y 1.8 para la carga viva). La acción sísmica, posiblemente la variable de mayor trascendencia, se circunscribe a la apropiada selección del espectro de diseño, tarea en la que la microzonificación sísmica de Bogotá, y el decreto 193 de 2006 (en el artículo cuatro, numeral nueve), son fuentes de primer orden, en este marco de acción aunque Buena Vista Oriental hace parte de la Zona IA, en el complejo geotécnico dominado en la franja norte por los llenos de hasta 6.0 m de espesor bajo las casas, da la pauta para fijar como espectro alternativo de diseño el de la Zona 2, el máximo probable para la Ciudad Capital, escenario que se traduce en un coeficiente de importancia I, de 1.00, aceleración, a_n= 0.30 g, y coeficiente de sitio, S, de 1.50. Ahora bien, como la sintomatología expuesta por las viviendas, desde la perspectiva del diagnóstico estructural, está relacionada con los fenómenos de remoción en masa, es decir con la aplicación de empujes laterales de tierra, o de cargas horizontales o verticales de arrastre, con diferentes niveles de gravedad (véase la *Foto 7.11*) y dado los elementos no tienen función retenedora.(o de contención), esta componente de carga se sustrajo de los modelos (aquí evaluados).

El marco completo de consideraciones, hipótesis y parámetros, tomados en cuenta se compilan en la *Tabla 7.16* y en el *Anexo E.6.1* y en el *Anexo E.6.2*, y los detalles y los resultados de la modelación reposan en el *Anexo E.6* (y sus divisores).



FOTO 7.11 EMPUJES LATERALES EN LA TOTALIDAD DE LA CASA (INCLUIDA LA TERRAZA), PROVENIENTES DE LAS MASAS DESLIZADAS

Resultados que se sintetizan en los siguientes comentarios;

- El sistema estructural seleccionado y empleado es apropiado para vivienda.

- Las derivas, indistinto del bloque estructural, son inferiores a los permitidos.

- La resistencia operativa de los materiales es sin lugar a dudas muy baja (inferior a la mínima exigida por la NSR-98).

TABLA 7.16 DERROTEROS DE LA MODELACIÓN

PARÁMETRO		ESPECIFICACIÓN	
MATERIALES		DISEÑO	CONSTRUCCIÓN
CONCRETOS Y MORTEROS			
Concreto de limpieza		10.5 Mpa	
Vigas de amarre y placa		21MPa	12.2 Mpa
Placas aéreas		21MPa	13.7 Mpa
Mortero de pega		18MPa	
Grouting de relleno		21MPa	
ACERO			
Acero de refuerzo		420MPa	
Malla electrosoldada		490MPa	
CONDICIONES SÍSMICAS Y GEOTÉCNICAS			
Zona de amenaza sísmica		Intermedia	
Aa:		0,2	
Perfil de suelo		S-3	
Coeficiente de sitio		1,5	
Coeficiente de importancia		1	
COMBINACIONES DE CARGA		1.4D+1.4L 1.05D+1.28L+1.0E 0.9D+.0E	
PARÁMETROS SÍSMICOS Y ESTRUCTURALES			
Ubicación		Bogotá	
Zona de amenaza sísmica		Intermedia	
Valor de Aa		0,2	
Región		R-5	
Tipo de perfil de suelo		S3 S: 1.5	
Grupo de uso		I	
Coeficiente de importancia		I: 1.0	
Coeficiente de amortiguación crítico		5%	
Espectro de diseño		Elástico	
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA ESTRUCTURA			
Sistema estructural		Pórticos resistentes a momentos	
Material		Mampostería parcialmente reforzada	
Capacidad de disipación de energía		Moderada (DMO)	
Coeficiente de capacidad básica de modificación de respuesta		Ro: 2.5	
Numero de edificaciones		1	
Numero de pisos		3	
IRREGULARIDAD DE LA EDIFICACIÓN			
Configuración en planta			
TIPO	DESCRIPCIÓN	Flp	
1P	Irregularidad Torsional	1,0	
2P	Retrocesos en esquinas	1,0	
3P	Discontinuidades en el diagrama	1,0	
4P	Despl. de elementos verticales	1,0	
5P	Sistemas no paralelos	1,0	
		flp: 1.0	
Configuración en altura			
1A	Piso flexible	1,0	
2A	Distribución masa	1,0	
3A	Irregularidad Geométrica	1,0	
4A	Despl. Dentro del plano de acción	1,0	
5A	Piso débil	1,0	
		flp: 1.0	
COEF. BÁSICO DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA (Fo)		2,5	
COEF. DE CAPACIDAD DE MODIFICACIÓN DE RESPUESTA (R)		2,5	
EFECTOS ORTOGONALES EN CARGAS SÍSMICAS		(100% -30%) en X, (30% -100%) en Y	

La urbanización y cada una de sus unidades estructurales, es desde la óptica sísmica, altamente vulnerable, conclusión revelada en el *Plano 9*. Sus deficiencias sismorresistentes involucran: a) escasas cuantías de refuerzo, defecto que se origina en el diseño y se acentúa en la construcción; b) ausencia de elementos de borde para algunos muros y vigas de voladizo; c) menores cantidades de refuerzo horizontal; d) irregular o inexistente amarre de los muros estructurales; e) pobre calidad de la construcción; e f) irregular e insuficiente sistema de cimentación.

7.2.3 HABITABILIDAD

Aún cuando el estado estructural de las casas es deficiente, debido a que fueron construidas sin considerar muchos de los derroteros de las NSR-98, y los daños (grietas y deformaciones) son el patrón recurrente en todos los módulos, los de menor deterioro y, posiblemente, los de mayor capacidad de habitabilidad (desde el contexto sísmico-estructural) son los que contienen las viviendas 1 a 12, 24 a 31, 47 a 54, y 72 a 75. Habitabilidad supeditada al estudio detallado de cada módulo (ejercicio fuera del alcance de este proyecto), y al reforzamiento de la subestructura (i.e. la cimentación) y de la superestructura; trabajo que contiene como mínimos:

- El recalce de las vigas de cimentación: su sección es insuficiente y no es prismática. El ancho es perentorio aumentarlo hasta los 60 cm (tal y como lo ratifica el numeral 4.4 del capítulo 4), y materialización debe ser en concreto reforzado. El concreto de recalce no debe ser inferior a los 21.1 MPa, y su refuerzo estará a cargo de varillas corrugadas con diámetro no menor a 5/8 de pulgada.

- El aislamiento de la placa de cimentación: la preparación del suelo de fundación debe contemplar el extendido y compactación de una capa de no menos de 20 cm de material seleccionado tipo SBG-2, al 95% del proctor modificado, para evitar que las deformaciones del subsuelo reflejen fisuras en la superficie; requerimiento que obliga a la demolición de la placa de piso y al empleo de sistemas temporales de transmisión de cargas (las de los muros estructurales).

- La reconformación de la placa de contrapiso: toda vez que la abertura de las fisuras sea inferior a 0.5 mm y se trate de fisuras aisladas, el sello con epóxico es suficiente; si las fisuras poseen aberturas mayores a 0.5 mm y están interconectadas, es imprescindible su reconstrucción con placas de no menos de 10 cm de espesor, reforzadas con mallas electrosoldadas.

- El reforzamiento de los muros, con pañete estructural de cinco (5) centímetros de espesor. Elemento forjado por un mortero con relación cemento/arena tal que le proporcione resistencia a la compresión no menor a 17 Mpa (y promedio de 21 Mpa), y por malla electrosoldada de 3.8 mm de diámetro y espaciamiento horizontal y vertical de 0.25 m. Como este procedimiento aumenta considerablemente el espesor del muro, puede recurrirse al uso de uso de laminas de fibra de carbono, que se adhieren a los elementos de mampostería por medio de resinas epóxicas.

- La implantación de vigas de amarre y dinteles; donde sea necesario, exigidos al amparo de los reglamentos de construcción vigentes.

Gracias a la amplia gamma de alternativas que existen hoy día en el mercado, para el reforzamiento estructural, el programa aquí propuesto puede ser modificado por el diseñador, siempre y cuando se respeten como principios mínimos: a) incrementar la capacidad de cargas en losas, vigas y muros; b) resarcir los

daños en elementos deteriorados; c) mejorar el nivel de servicio en cada casa; d) reducir las deformaciones; e) restringir el crecimiento de las fisuras menores; f) actualizar las estructuras para que cumplan con las normas y reglamentos vigentes; y g) corregir los errores de construcción y diseño.

7.3 RIESGO.

El riesgo incurrido en una zona o elemento, se asimila como las pérdidas probables de una estructura, frente a una solicitud determinada. Se puede expresar al combinar la probabilidad de ocurrencia de la solicitud (i.e. del fenómeno: amenaza actual-Pf) con las pérdidas potenciales. Procedimiento, aplicado a cada vivienda y descrito a continuación.

7.3.1 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

Para el presente trabajo las pérdidas potenciales responden a las pérdidas directas en viviendas y enseres, las que se pueden calcular multiplicando los costos de capital por el índice de vulnerabilidad física. Simplificación que redefine el riesgo en términos de pesos, así:

$$Riesgo = P_f \times C_f$$

donde:

P_f : Probabilidad de falla

C_f : Costo de falla

Pero que le incorpora el subjetivo contexto de los costos en capital; no comparables en un marco global, pues son el resultado de las diferencias en los montos de inversión en cada vivienda por su propietario. En este sentido, es mejor recurrir al índice de riesgo, de lo contrario puede dar lugar a tergiversaciones y vicios en el concepto, tales como que las pérdidas en viviendas de cuantiosa inversión aparezcan con un valor de perjuicio potencial elevado en relación con unas más modestas, aunque su condición de riesgo sea semejante. Por lo tanto, por simplicidad en la presentación de los resultados, se abstrajeron los costos de capital, y se reformuló el concepto con base en el índice de riesgo, IR, definido como:

$$IR = P_f \times IVF$$

donde:

IR : Índice de riesgo.

P_f : Probabilidad de falla.

IVF : Índice de vulnerabilidad física.

Para este caso se obtienen los intervalos de cualificación de las pérdidas probables a partir de la conjugación –producto punto- de los niveles de vulnerabilidad con los de amenaza aplicados al proyecto, pero asumida cada variable como independiente (véase la *Tabla 7.17*).

7.3.2 ZONIFICACIÓN DE RIESGO.

Como se deduce de la *Tabla 7.12*, el 73% de las viviendas expone riesgo alto, y el restante 27% ostenta niveles de riesgo medio. Distribución justificada en el alto porcentaje de casas con niveles medios de vulnerabilidad, y en relevante estado de amenaza (entretejido entre alto y medio). Las unidades con probabilidad alta de daño son: las casas 14 a 23, 36 a 46, 53 a 71 y 77 a 96 (véase el *Plano 10*). Las restantes viviendas se exponen en riesgo medio.

TABLA 7.17 CATEGORIZACIÓN DEL RIESGO

NIVEL DE RIESGO	INTERVALOS DEL ÍNDICE
Alto	0.180– 1.000
Medio	0.041 – 0.180
Bajo	0.000 – 0.041

En concordancia, las alternativas de solución estarán destinadas a evitar un aumento en los niveles de riesgo, y en el mejor de los casos dar lugar a una reducción sustancial en los escenarios de mayor condición y predisposición. Panorama que abre la puerta a la elusión (y por consiguiente a la reubicación) y a las medidas de estabilización esbeltas y de mayor capacidad de contención en profundidad, v.g. los pilotes, los caissons, y las pantallas ancladas como las posibles soluciones.

CAPÍTULO 8

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

CAPÍTULO 8

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

8.1 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA OBRAS DE MITIGACIÓN

8.1.1 ANÁLISIS Y CONSIDERACIONES ESPECIALES

Uno de los mayores beneficios del análisis de riesgo radica en la formulación de un plan de acción que permita atenuar las consecuencias de los procesos actuales y potenciales, y de esta manera mitigar, y conservar o controlar los niveles de amenaza, es decir disminuir la influencia de los agentes detonantes y contribuyentes, o modificar los elementos y escenarios expuestos.

Es así como en el desarrollo de los capítulos anteriores se delinean una serie de medidas que pueden cumplir con el anterior objetivo, sin embargo, surge la necesidad de estudiar en adelante el papel que juegan, para seleccionar la mejor de ellas. El proceso de decisión, se fundamenta en el análisis comparativo entre la condición actual y los escenarios con la implementación de las obras.

La definición de la amenaza futura implica determinar la eficiencia de las alternativas en la reducción de los potenciales estados. Como la condición prevalente de amenaza en la mayor parte del barrio (a 10 años) es media a alta, la incorporación de los programas de mitigación es incuestionable, en especial en las regiones LEI-trat-I-1 y LEI-trat-I-2. La función principal de las medidas será reducir, al menor costo, los estados de probabilidad condicional total actual, y disminuir los estados de vulnerabilidad. Cabe reseñar que las alternativas propuestas se enmarcan dentro de la capacidad operativa y económica, no sólo de la DPAE, sino de las demás entidades distritales que tienen ingerencia activa y continua en las condiciones de habitabilidad y seguridad en el Distrito Capital, tales como la Secretaría Distrital del Hábitat, la Secretaria Distrital de Ambiente, la Caja de Vivienda Popular, el DAPD, el IDRD, el ACUEDUCTO y el IDU.

8.1.2 ALTERNATIVAS

En el desarrollo de los capítulos anteriores se han venido perfilando las variables potenciales detonantes o condicionantes que alteraran desfavorablemente las condiciones de amenaza. En este orden de ideas las alternativas consideradas en el proyecto se enuncian a continuación:

Alternativa 1: Relocalización y Recuperación Morfológica. Involucra la relocalización de las 96 familias, la demolición del área de juegos y la reconformación geomorfológica de la zona afectada, tarea última que acoge el retiro parcial o total de los espesos cuerpos de lleno, en especial de las masas activas (tema estudiado con tres modelos distintos de reconfiguración, tal como lo confirma el *Anexo F.1*), el confinamiento de la unidad LEI-edu-l-1, y el cambio paisajístico: todo con base en el terraceo y en muros en tierra armada. El predio de la urbanización, en las etapas III y IV, sufrirá, entonces, una modificación en el uso del suelo: en adelante se destinaría a recreación pasiva.

Del universo posible de adecuaciones morfológicas se estudiaron tres: una configurada por cortes de hasta tres metros, que dejan al descubierto pendientes máximas de 34 grados, y bermas de 3.0 metros de ancho, es la más exigente en la remoción del cuaternario; otra esquematizada por bancas de 5 a 7 metros de altura, con buzamientos de 45 grados; y la última diagramada por taludes con pendientes variables, pero en el dominio [15.5° – 34°] y alturas máximas de 6.5 metros, y bermas de hasta 7.0 metros de ancho, entrelaza la participación de dos muros en tierra armada de cuatro metros de altura.

Esta última adecuación es del abanico la más segura, al punto de satisfacer los requerimientos de la resolución 227 de 2006, circunstancia que permite su subdivisión en dos: la Alternativa 1B, rótulo asignado a al planteamiento descrito, y la Alternativa 1A, resultado de la metamorfosis de la anterior. Son diferenciables en la supresión de los muros entierra armada y de las pantallas pilotes en la zona homogénea LEI-tra-l-1, en la disminución tanto del volumen de excavación como de las obras de drenaje. No obstante, en el caso de la sección 2, se evaluaron cuatro (4) posibilidades de perfilado, de ellas las superficies S211B y S212B, responden a las óptimas en cuanto a su proceso constructivo e impacto visual armónico y estético.

Alternativa 2: Pantallas Ancladas. Parte de la premisa de mantener en su sitio de habitación 32 familias (en el sitio), las propietarias de las casas 1 a la 12, 24 a la 31, 47 a la 54 y de la 72 a la 75, y relocalizar las 64 restantes, decisión avalada bien por el alto deterioro estructural de las edificaciones (caso patente de las familias propietarias de las casas: 87 a 96, 63 a 71 y 39 a 46) o por su alto grado de riesgo (sísmico-estructural o por remoción en masa). Para su cumplimiento es prioritario reforzar estructuralmente las edificaciones, incluido el recalce de la cimentación; adecuar las plataformas ocupadas por las construcciones relocalizadas y por la (proyectada) cuarta etapa; reforestar y estabilizar (con dos juegos de muros en pilotes) la ladera norte; reconformar morfométricamente (terracear) el cuerpo del deslizamiento principal; mejorar la respuesta mecánica de las laderas contiguas a las viviendas 22, 23 y 46; y disponer pantallas ancladas (como sistema de contención) en los cuerpos de deslizamiento y en los depósitos antrópicos de la zona homogénea LEI-tra-l-3, constituidas, básicamente, por dos filas de anclajes con longitudes entre 6 m y 12 metros, y cargas operativas desde los 200 KN hasta los 300 KN. Su objetivo permitir el servicio de la zona de juegos, estabilizar las masas activas, incluido el escarpe principal, contener los llenos del corredor oriental (regiones: LEI-tra-l-3, LEI-trat-l-1 y LEI-trat-l-2), norte y central (unidades LEI-tra-l-1 y LEI-edu-l-1).

Alternativa 3: Pantalla Pilotes. Al igual que la alternativa 2, obliga la relocalización de sesenta y cuatro familias, el reasentamiento en sitio de treinta y dos (32), y la contención y reconformación del cuaternario. Difiere de su antecesora (alternativa 2) al acudir, esencialmente, a las pantallas de pilotes como elementos principales de estabilización, pero comparte con ella el uso de la pantalla anclada en el escarpe principal del movimiento mayor, y el retiro parcial de la masa movida.

Las pantallas-pilotes están armadas por elementos individuales en concreto, de diez metros de longitud, reforzados con perfiles en IPE, diámetros exteriores de hasta 0.40 metros, espaciados 1.20 metros (i.e tres veces el diámetro). Aunque es posible tejer una estela de duda sobre su aplicabilidad, máxime por la masa

efectiva a contener (traducida en cerca de siete metros de altura) y suponer que es mejor recurrir a las pilas, los módulos escogidos cumplen con creces las exigencias al cortante, traducidas en 500 KN por elemento, circunstancia que supone su ratificación. No obstante, es pertinente señalar que si se dispusiesen las pilas el procedimiento de análisis (evaluación de amenaza) no sufre modificaciones drásticas, puesto que se funda en el requerimiento al cortante, su mayor ingerencia reside en el costo y en el proceso constructivo, variables que se tocan tangencialmente en el numeral 8.3.

En la *Figura 8.1*, la *Figura 8.2*, la *Figura 8.3* y la *Figura 8.4*, se esquematizan en planta las alternativas de tratamiento y mitigación descritas, en el *Anexo F.1* y en el *Anexo F.3* se ilustran los detalles relevantes en la geometría: longitud, espesor, ancho, inclinación, etc, y se precisa el material tanto del tratamiento principal como de sus componentes (p.e cunetas, cajas de inspección, etc), y en la *Figura 8.5* el sistema de reforzamiento de las viviendas.

8.2 AMENAZA FUTURA (AMENAZA CON OBRAS)

Las condiciones de amenaza futura, oscilantes entre alta y media, pero con preponderancia a baja (sentencia clara diagramada en el *Plano 8*), son el reflejo de las particulares condiciones topográficas, estructurales, estratigráficas y de uso del suelo. Las laderas están labradas en espesas masas de rellenos antrópicos, dispuestas en antiguos frentes de explotación, morfológicamente irregulares, tallados en potentes bancos de lodolitas (Tpb-L) con delgadas intercalaciones de areniscas, que diagraman taludes con pendientes cercanas o superiores a los cuarenta grados, y con alguna consonancia geométrica con el patrón estructural, pero insuficiente para dar lugar a predisposición cinemática alguna. El irregular sistema de transporte de agua y las importantes recargas hidrogeológicas, son otros de los componentes que repercuten ampliamente en el nivel de riesgo.

Este especial matiz de la amenaza sumado a la susceptibilidad de los elementos expuestos, a los potenciales procesos de inestabilidad, y a las implicaciones de intervenir predios privados hacen del tratamiento del barrio un marco de relativa complejidad. Por una parte las obras tendientes a la reducción de la amenaza o de la exposición, como el retiro de material o perfilado y las pantallas (ancladas o con pilotes) deben ser de fácil mantenimiento y viables constructivamente, y por otra parte deben garantizar una reducción de la condición de riesgo con bajos presupuestos; inferiores al de relocalización.

Por lo tanto, la estimación de la probabilidad de falla implica la determinación de los factores de seguridad en cada sección de análisis con la incorporación de la medida correctiva, tanto para los parámetros de resistencia y las variables ambientales esperadas (lluvia y sismo) como para los extremos probables, acorde con el procedimiento referido en el numeral 6.2 del Capítulo 6. Bajo el marco teórico expuesto y el foco de las alternativas planteadas, específicamente la remoción de los llenos; y las pantallas ancladas con pilotes, conjunto complementado con el drenaje y el subdrenaje.

En este orden de ideas, la relocalización y la reconformación morfológica, fundada en el retiro de gran parte de los cuaternarios es sin lugar a dudas una medida generosa de estabilización, la probabilidad condicional divaga del 6.8% al 0.1% (véase la *Tabla 8.4*) indistinto de la zona homogénea el período de exposición alcanza los 10 años, el escenario más crítico es la ladera S11 (unidad LEl-trat-1-1 del *Plano 7*); los factores de seguridad se posicionan entre 1.5 y 2.7 (véase la *Tabla 8.1*) en ausencia de cualquier agente exógeno;

FIGURA 8.1 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 1A: RELOCALIZACIÓN Y RECUPERACIÓN MORFOLÓGICA

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

FIGURA 8.2 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 1B: RELOCALIZACIÓN Y RECUPERACIÓN MORFOLÓGICA

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

FIGURA 8.3 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 2: PANTALLAS ANCLADAS

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

FIGURA 8.4 ESQUEMA GENERAL DE LA ALTERNATIVA 3: PANTALLA PILOTES

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

FIGURA 8.5 PLANTEAMIENTO DE REFORZAMIENTO DE LAS VIVIENDAS (ALTERNATIVAS 2 Y 3)

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

la activación tendría lugar bajo la participación del sismo y los parámetros de resistencia mínimos, o si se conjugan la lluvia y el sismo.

Los beneficios se mantienen en el tiempo, la posibilidad modal máxima es del 8%, si el escenario temporal de análisis toca los 50 años; sólo las superficies S118 y S119 exhiben respuestas anómalas, su probabilidad condicional bordea el 19% (según se expresa en la *Tabla 8.4*), sin embargo las masas potenciales móviles son pequeñas, y poco comprometen el entorno general.

La participación de las pantallas ancladas se traduce en una notable mejoría en la estabilidad en especial en los sectores LEI-trat-I-2 y LEI-tra-I-3. Las posibilidades de movilización para los depósitos antrópicos descienden desde el 42.5% (sección 2-2', véase la *Tabla 6.8*) hasta niveles inferiores al 11.9% (superficies críticas S1211, con el 11.9%, S221, con el 5.27%, S621, con el 9.5%, y S721, con el 7.86%, de la *Tabla 8.5* y de la *Tabla 8.6*), en otras palabras la amenaza trasiega desde alta hasta baja para 10 años y 50 años. La falla puede tener cabida en las instancias más adversas, es decir toda vez que participen los dos agentes exógenos, y los coeficientes efectivos de resistencia mínimos, tal y como lo sugiere la *Tabla 8.5* y la *Tabla 8.6*; el comportamiento esperado cualquiera sea la condición de trabajo (participación de la lluvia y el sismo) es siempre satisfactoria, las esperanzas del factor de seguridad oscilan entre 1.10 y 2.58 (véase la *Tabla 8.2*)

Respuesta similar recae en la pantalla con pilotes, el potencial de movilización desciende desde el 42.50% (región LEI-trat-I-2, sección 2-2' de la *Tabla 6.8*) y del 36%, zona LEI-tra-I-3 (reporte en la *Tabla 6.10*), hasta el 2.6% y el 1.4%, respectivamente (valores consignados en la *Tabla 8.7*), si la vida útil se posiciona en 10 años, o inferior al 5.50% (superficie S235 de la *Tabla 8.7*) en dominios temporales de 50 años.

Los menores réditos se circunscriben en la zona homogénea LEI-trat-I-1, sección 1-1, las probabilidades condicionales descienden del 56% (estado actual descrito en la *Tabla 6.8*) hasta el 7% (escenario representado en las superficies críticas S134 y S135 de la *Tabla 8.6*) en el mediano plazo (10 años), y del 87% (véase las superficies S11B y S11C de la *Tabla 6.8*) al 19 %, umbral acotado por la superficie potencial S135 en la *Tabla 8.6*.

La amalgama de valores obtenidos permite exponer de manera gráfica los niveles de amenaza y de riesgo de las Alternativas 1 y 2 (las de mayor proyección y retribución técnica) en la *Figura 8.6* y en la *Figura 8.7*, respectivamente. Para la alternativa 1, los niveles de Amenaza y riesgo son bajos, en consecuencia con la relocalización de las unidades habitacionales; el resultado para la vulnerabilidad física es evidente, y de esta manera resulta inocuo exhibirlo sobre un plano. En la Alternativa 2, los elementos de mayor riesgo se sustraen y las distancias de viaje de las masas potencialmente inestables se controlan gracias al amplio espectro de las medidas de contención, que a su vez, reducen la probabilidad condicional de falla (i.e amenaza), y los estadios de vulnerabilidad y riesgo esperado a bajos.

De esta forma, la alternativa 1, apunta desde ya a ser la alternativa más viable técnicamente. Su selección como la propuesta recomendada será función exclusiva de su beneficio económico frente a las otras alternativas. Las pantallas ancladas y las pantallas con pilotes a pesar de que implican costos mayores a la reubicación y perfilado, la diferencia es poca para descartarlas desde ahora; su viabilidad y selección está ligada a la facilidad constructiva, y a la necesidad de espacio para su implantación, elementos inobjetablemente ligados al costo de la obra, es decir a su relación beneficio-costo. Tema que se trata en adelante.

FIGURA 8.6 ESCENARIOS DE AMENAZA Y RIESGO ACTUAL CON OBRAS – ALTERNATIVA 1

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

FIGURA 8.7 ESCENARIOS DE AMENAZA Y RIESGO ACTUAL CON OBRAS – ALTERNATIVA 2

ESTA FIGURA SE ENCUENTRA EN ARCHIVO ADJUNTO

8.3 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA Y PLAN DE ACCIÓN

El modelo de decisión probabilístico, es uno de los múltiples mecanismos que permite al diseñador seleccionar entre diversas alternativas de solución, sin caer en un marco subjetivo, donde predomine el juicio del experto. Contiene como variables relevantes: la probabilidad de falla y el costo de la solución y está basado en un análisis comparativo entre el nivel de riesgo alcanzado por una medida de mitigación y el costo esperado en pesos para la misma.

Uno de los procedimientos de análisis de decisión más claros y simples es el conocido como "Árboles de decisión hipotéticos". Con el fin de adelantar este tipo de análisis se adoptó como definición de riesgo la propuesta por Wu et al (1996), la que fija:
$R = P_f C_f$

donde:
R = Riesgo Esperado
P_f = Amenaza o probabilidad de falla de un talud y,
C_f = Consecuencia o costo de falla

Para el caso en estudio, la evaluación de probabilidad de falla, para cada tipo de fenómeno y solicitación, se encuentra compilada en el numeral 6.3 y 8.2. Por su parte, el costo de falla, se consideró como:

$C_f = ID \times C_o$

donde:
ID = Índice de daño de la unidad expuesta
C_0 = Valor inicial de la alternativa

El costo inicial responde al valor presente de la obra, puesto que no existen otros elementos físicos que puedan incorporarse, estimativo sintetizado en la *Tabla 8.8* (y calculado con base en los prediseños diagramados en el *Anexo F.3*, y en los estimativos compilados en los *Anexos F.4* y *F.5*); y las pérdidas potenciales (o costo de falla), en caso de deslizamiento, son iguales al presupuesto de cada alternativa, sumado al valor de la atención de la emergencia, es decir: a las obras de contingencia, y a los costos sociales y público administrativo. El costo de falla se estimó entonces igual a 1.20 veces el valor de la alternativa, con tal porcentaje se cubre el costo de la obra actual, el de las obras de contingencia (en caso de falla), y rubros adicionales en mantenimiento, rediseño, etc. En el caso de no deslizamiento (no falla) el costo de falla se estimó como un porcentaje del valor de la alternativa (cercano al 20%) por labores de mantenimiento.

La relocalización, factor común en cualquiera de las alternativas, involucra en el mejor escenario la construcción individual o colectiva de "espacios" de vida "seguros" para sesenta y cuatro (64) familias; tarea que implica la búsqueda de predios habitables o habitados de bajo riesgo, y la participación de la institucionalidad (p.e. caja de vivienda popular y DPAE). Condicionantes valorados en $31'056.250 por familia, deducidos al afectar el monto base fijado por la caja de vivienda popular (y tasado en $24'845.000) por un factor de Administración: 1.25. El reforzamiento de estas edificaciones se descartó por el alto grado de deterioro de las construcciones, por su incapacidad para garantizar la vida de sus habitantes durante el sismo crítico, por las exigencias geotécnicas (representadas en espesas masas de llenos potencialmente móviles),

por los altos costos, superiores a los de construcción nueva, y por la necesidad de espacio para acometer la estabilización de los cuerpos de deslizamiento potenciales y activos.

La *Figura 8.8* contiene el árbol de decisión obtenidos para el período base de diseño (establecido en 10 años) a valor presente. De ella, se puede apreciar que las alternativas que involucran el menor nivel de riesgo esperado son: la relocalización y el tratamiento con pantallas ancladas. La pantalla-pilotes es sin lugar a dudas la solución menos favorable; su mayor valor económico (véase la *Tabla 8.8*), su deficiente respuesta en la amenaza futura (periodo de vida de 50 años, ratificación expuesta en la *Tabla 8.6* y en la *Tabla 8.7*), y su alto nivel de riesgo esperado la hacen inviable. Circunstancias que explican a su vez la escasa aplicabilidad de las pilas, sistema a todas luces más costoso.

Contrario a la paridad entre las alternativas, la reubicación encierra los mayores beneficios: el perfilado está planteado para cumplir con la resolución 227 de 2006, es decir para garantizar factores de seguridad al corto y largo plazo superiores a 1.9 y 1.3, respectivamente, exigibles sólo si los predios se dedican a proyectos urbanísticos. Requerimiento a todas luces extremo. Además, su respuesta futura se abstrae sin considerar que el retrabajamiento de la masa (y que integra el extendido y la compactación, y el drenaje) da lugar a mejoras en sus propiedades, premisa de trascendencia en la probabilidad condicional de falla en el depósito Qd1: pequeñas ganancias en la cohesión redundan en disminuciones relevantes en la condición de amenaza, basta con señalar que la posibilidad de falla de la superficie S118 pasa del 34 % al 19% (véase la *Tabla 8.4*).

En este sentido es posible acometer un sin número de arreglos, algunos con mayor beneficio económico (i.e. de menor monto de inversión) que los aquí planteados. Ejemplo de este beneficio reposa en la *Figura 8.8*, el costo inicial (y por consiguiente el costo de falla) de la alternativa se deduce exclusivamente con la reconformación de los taludes, sin considerar obras adicionales de estabilización, v.g los muros en tierra armada o la compra de los lotes para intervenir, actividades que reducen el monto de ejecución a $817´092.148. Este marco de acción abre la posibilidad, también, de recurrir a combinaciones o permutaciones entre las alternativas para mejorar la relación beneficio-costo; en otras palabras reconformar morfológicamente con las pantallas ancladas en lugar del perfilado.

Finalmente, el reforzamiento de las edificaciones aunque es posible llevarlo a cabo, su funcionalidad, su eficiencia y su beneficio (técnico-económico) son inciertos y precarios. El dudoso papel de las reparaciones y modificaciones adelantadas en las viviendas por el urbanizador y por los propietarios; el alto monto unitario, superior a los diecisiete millones de pesos (sin considerar el AIU y la interventoría) y próximo al valor comercial de una casa; el engorroso procedimiento constructivo, los costos no estimados o no cubiertos (p.e la adecuación del suelo de fundación); el deterioro de la imagen del distrito y de su institucionalidad si el proceso de destrucción prosigue; el enigma que aún cubre el sino transformador del hombre; y la desatención a la condición de vulnerabilidad social de la comunidad, latente en la percepción de inseguridad y en la dudosa posibilidad de acceso a servicios básicos de calidad, son apenas algunas de las tesis que desestiman su aplicabilidad.

Es por tanto inobjetable la reconstrucción del núcleo social y de su tejido, en escenarios seguros (de baja amenaza), libres del alto marco de susceptibilidad (geotécnica), y de los dañinos efectos de la intervención antrópica que encierran las laderas de Buena Vista Suroriental III Etapa, y en viviendas dignas, sísmicamente competentes, y de buena calidad constructiva. Premisas que refrendan a la Relocalización de las noventa y seis familias como la única solución (universo compilado en el *Anexo G*), es decir como el *Plan de Acción*. La compilación del tema, incluido el Plan de Gestión Social es el cuerpo básico de el *Anexo H* y de el *Anexo I*.

TABLA 8.1 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 1

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS_{prom} (ESPERADOS)
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
1	S116	Qd1	18,80	0.45	No	No	2,033
					No	Si	1,081
					Si	No	1,535
					Si	Si	0,824
	S117				No	No	1,765
					No	Si	1,042
					Si	No	1,363
					Si	Si	0,802
	S118				No	No	1,621
					No	Si	1,168
					Si	No	1,165
					Si	Si	0,657
	S118				No	No	1,744
					No	Si	1,235
					Si	No	1,287
					Si	Si	0,723
	S119				No	No	2,004
					No	Si	1,141
					Si	No	1,410
					Si	Si	0,822
	S1110	Qra1	25,40	1,60	No	No	2,104
					No	Si	1,120
					Si	No	1,606
					Si	Si	1,112
	S1111				No	No	1,825
					No	Si	1,077
					Si	No	1,398
					Si	Si	0,822
	S1112				No	No	2,190
					No	Si	1,274
					Si	No	1,545
					Si	Si	0,912
	S1113				No	No	2,503
					No	Si	1,509
					Si	No	2,139
					Si	Si	1,290
2	S211	Qd2	18,80	1,50	No	No	2,647
					No	Si	1,640
					Si	No	2,348
					Si	Si	1,452
	S211B	Qd2	18,80	1,50	No	No	1,866
					No	Si	1,262
					Si	No	1,672
					Si	Si	1,121
	S212	Qra1	25,40	1,60	No	No	2,166
					No	Si	1,281
					Si	No	1,788
					Si	Si	1,058
	S212B	Qd2	18,80	1,50	No	No	1,960
					No	Si	1,239
					Si	No	1,755
					Si	Si	1,099
	S213	Qra1	25,40	1,60	No	No	2,406
					No	Si	1,501
					Si	No	2,070
					Si	Si	1,276
3	S311	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	1,509
					No	Si	1,134
					Si	No	1,240
					Si	Si	0,914
	S312	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	2,165
					No	Si	1,693
					Si	No	1,544
					Si	Si	1,176
	S313	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,787
					No	Si	1,290
					Si	No	1,591
					Si	Si	1,137
6	S611	Qd1	18,80	0,45	No	No	1,896
					No	Si	1,024
					Si	No	1,617
					Si	Si	0,878
7	S711	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,897
					No	Si	1,289
					Si	No	1,851
					Si	Si	1,257
	S712				No	No	3,591
					No	Si	2,073
					Si	No	3,400
					Si	Si	1,963
	S713				No	No	4,218
					No	Si	2,173
					Si	No	3,542
					Si	Si	1,835

TABLA 8.2 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 2

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f prom	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
1	S125	Qd1	18,80	0,45	No	No	1,678
					No	Si	1,030
					Si	No	1,500
					Si	Si	0,920
	S126				No	No	1,788
					No	Si	1,043
					Si	No	1,615
					Si	Si	0,943
	S128	Qra1	25,40	1,60	No	No	2,416
					No	Si	1,617
					Si	No	2,383
					Si	Si	1,595
	S129				No	No	2,418
					No	Si	1,402
					Si	No	2,174
					Si	Si	1,261
	S1210	Qd1	18,80	0,45	No	No	2,119
					No	Si	1,440
					Si	No	2,028
					Si	Si	1,362
	S1211				No	No	1,884
					No	Si	1,126
					Si	No	1,575
					Si	Si	0,943
2	S221	Qd2	18,80	1,50	No	No	1,850
					No	Si	1,271
					Si	No	1,818
					Si	Si	1,248
	S222				No	No	1,956
					No	Si	1,261
					Si	No	1,667
					Si	Si	1,076
	S223				No	No	1,812
					No	Si	1,242
					Si	No	1,812
					Si	Si	1,242
	S224	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,954
					No	Si	1,261
					Si	No	1,665
					Si	Si	1,076
	S223				No	No	2,406
					No	Si	1,501
					Si	No	2,070
					Si	Si	1,276
	S225				No	No	1,799
					No	Si	1,234
					Si	No	1,799
					Si	Si	1,234
3	S321	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	1,509
					No	Si	1,134
					Si	No	1,240
					Si	Si	0,914
	S322	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	2,165
					No	Si	1,693
					Si	No	1,544
					Si	Si	1,176
	S323	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,787
					No	Si	1,290
					Si	No	1,591
					Si	Si	1,137
6	S621	Qd1	18,80	0,45	No	No	2,581
					No	Si	1,103
					Si	No	1,885
					Si	Si	0,818
	S622				No	No	2,435
					No	Si	1,215
					Si	No	1,843
					Si	Si	0,932
7	S721	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,687
					No	Si	1,275
					Si	No	1,688
					Si	Si	1,103
	S722				No	No	2,186
					No	Si	1,451
					Si	No	1,975
					Si	Si	1,311

TABLA 8.3 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON OBRAS - ALTERNATIVA 3

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f prom	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
1	S131	Qd1	18,80	0,45	No	No	1,422
					No	Si	0,914
					Si	No	1,326
					Si	Si	0,848
	S132				No	No	1,449
					No	Si	0,943
					Si	No	1,135
					Si	Si	0,735
	S133				No	No	1,891
					No	Si	0,999
					Si	No	1,401
					Si	Si	0,746
	S134				No	No	1,771
					No	Si	1,077
					Si	No	1,492
					Si	Si	0,823
	S135				No	No	2,035
					No	Si	1,129
					Si	No	1,453
					Si	Si	0,821
	S138				No	No	1,389
					No	Si	0,926
					Si	No	1,224
					Si	Si	0,817
	S139				No	No	1,697
					No	Si	1,125
					Si	No	1,535
					Si	Si	1,018
2	S231	Qd2	18,80	1,50	No	No	2,952
					No	Si	1,367
					Si	No	2,313
					Si	Si	1,067
	S232				No	No	2,369
					No	Si	1,550
					Si	No	2,205
					Si	Si	1,441
	S234	Qra1	25,40	1,60	No	No	3,072
					No	Si	1,379
					Si	No	2,223
					Si	Si	0,992
	S233				No	No	2,406
					No	Si	1,501
					Si	No	2,070
					Si	Si	1,276
	S235				No	No	1,872
					No	Si	1,312
					Si	No	1,704
					Si	Si	1,192
	S236	Qd2	18,80	1,50	No	No	2,068
					No	Si	0,927
					Si	No	1,780
					Si	Si	1,149
3	S331	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	1,509
					No	Si	1,134
					Si	No	1,240
					Si	Si	0,914
	S332	Tpb-L1	31,25	2,65	No	No	2,165
					No	Si	1,693
					Si	No	1,544
					Si	Si	1,176
	S333	Qra1	25,40	1,60	No	No	1,787
					No	Si	1,290
					Si	No	1,591
					Si	Si	1,137
6	S631	Qd1	18,80	0,45	No	No	2,581
					No	Si	1,103
					Si	No	1,885
					Si	Si	0,818
	S632				No	No	2,435
					No	Si	1,215
					Si	No	1,843
					Si	Si	0,932
7	S732	Qra1	25,40	1,60	No	No	2,348
					No	Si	1,515
					Si	No	2,014
					Si	Si	1,296
	S733				No	No	8,290
					No	Si	2,700
					Si	No	6,919
					Si	Si	2,272
	S734				No	No	2,339
					No	Si	1,705
					Si	No	2,035
					Si	Si	1,487

TABLA 8.4 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL												
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
				ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1
				S116	S117	S118	S118	S119	S1110	S1111	S1112	S1113	S211	S211B	S212	S212B
Fricción	Cohesion (T/m^2)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,406	2,001	2,208	2,208	2,686	2,236	2,047	2,476	3,062	3,316	2,413	2,679	2,511
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	2,063	1,832	1,771	1,771	2,128	2,068	1,837	2,033	2,636	3,023	2,139	2,260	2,185
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	2,003	1,701	1,470	1,716	1,880	1,979	1,672	2,119	2,168	2,449	1,594	2,071	1,735
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,658	1,527	1,033	1,279	1,321	2,151	1,758	2,158	2,168	1,780	1,319	1,652	1,408
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,274	1,190	1,230	1,230	1,522	1,191	1,203	1,441	1,846	2,054	1,642	1,584	1,602
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,094	1,082	1,985	1,985	1,201	1,098	1,088	1,179	1,589	1,874	1,475	1,337	1,412
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,069	1,004	0,826	0,960	1,080	1,055	0,986	1,235	1,307	1,511	1,049	1,224	1,073
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,887	0,893	0,580	0,715	0,759	1,145	1,041	1,256	1,307	1,110	0,882	0,978	0,867
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,842	1,574	1,670	1,670	1,983	1,718	1,605	1,792	2,669	3,002	2,185	2,241	2,271
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,628	1,461	1,393	1,393	1,632	1,591	1,472	1,514	2,351	2,802	1,979	1,943	2,016
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,444	1,268	0,937	1,181	1,189	1,460	1,233	1,433	1,776	2,016	1,365	1,634	1,494
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	1,227	1,149	0,659	0,902	0,835	1,670	1,291	1,457	1,776	1,559	1,159	1,335	1,239
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,982	0,934	0,936	0,936	1,142	0,923	0,939	1,056	1,610	1,859	1,477	1,325	1,437
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,869	0,861	0,778	0,778	0,933	0,852	0,870	0,888	1,417	1,736	1,359	1,149	1,296
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,780	0,745	0,535	0,668	0,712	1,786	0,724	0,850	1,072	1,242	0,883	0,968	0,910
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,664	0,666	0,377	0,510	0,501	0,843	0,762	0,862	1,072	0,963	0,765	0,791	0,753
			w	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
				W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qd1	Qd1	Qd1	Qd1	Qd1	Qra1	Qra1	Qra1	Qra1	Qd2	Qd2	Qra1	Qd2-Qra1
				ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	28,9	28,9	28,9	28,9	21,8	21,8	28,9	21,8
		ϕ_{min}		15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	21,8	21,8	21,8	21,8	15,7	15,7	21,8	15,7
		C_{max} (ton/m²)		0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	2,20	2,20	2,20	2,20	2,00	2,00	2,20	2,00
		C_{min} (ton/m²)		0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0009	0,0012	0,0788	0,0155	0,0236	0,0000	0,0005	0,0001	0,0001	0,0025	0,0224	0,0011	0,0112
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0118	0,0144	0,1528	0,0590	0,0685	0,0024	0,0092	0,0051	0,0012	0,0053	0,0345	0,0065	0,0206
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0376	0,0427	0,2440	0,1192	0,1270	0,0115	0,0339	0,0250	0,0039	0,0099	0,0518	0,0181	0,0353
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0870	0,0947	0,3400	0,1949	0,1946	0,0318	0,0851	0,0698	0,0095	0,0166	0,0743	0,0393	0,0568

TABLA 8.5 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL												
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
				ALT 1*	ALT 1*	ALT 1*	ALT 1*	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 1	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2
				S213	S311	S312	S313	S611	S711	S712	S713	S125	S126	S128	S129	S1210
Fricción	Cohesion (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	c_{max}	Sin	Sin	3,018	1,867	2,655	2,302	2,396	2,472	4,682	5,424	2,010	1,843	2,708	2,992	2,489
ϕ_{min}	c_{max}	Sin	Sin	2,531	1,426	2,167	2,016	1,932	2,201	4,173	4,731	1,724	1,420	2,538	2,452	2,130
ϕ_{max}	c_{min}	Sin	Sin	2,280	1,593	2,164	1,558	1,859	1,593	3,008	3,705	1,629	2,157	2,299	2,383	2,071
ϕ_{min}	c_{min}	Sin	Sin	1,793	1,149	1,674	1,270	1,397	1,322	2,499	3,013	1,348	1,731	2,120	1,843	1,791
ϕ_{max}	c_{max}	Sin	Con	1,896	1,409	2,077	1,677	1,292	1,683	2,701	2,791	1,235	1,070	1,809	1,735	1,678
ϕ_{min}	c_{max}	Sin	Con	1,607	1,087	1,717	1,491	1,040	1,503	2,405	2,428	1,058	0,824	1,702	1,420	1,489
ϕ_{max}	c_{min}	Sin	Con	1,395	1,181	1,669	1,090	1,008	1,074	1,740	1,918	1,001	1,264	1,537	1,384	1,394
ϕ_{min}	c_{min}	Sin	Con	1,107	0,861	1,307	0,903	0,758	0,896	1,444	1,557	0,825	1,014	1,421	1,070	1,200
ϕ_{max}	c_{max}	Con	Sin	2,629	1,543	1,914	2,074	2,068	2,419	4,461	4,640	1,807	1,638	2,670	2,710	2,356
ϕ_{min}	c_{max}	Con	Sin	2,249	1,208	1,656	1,850	1,702	2,162	4,013	4,161	1,580	1,277	2,510	2,248	2,120
ϕ_{max}	c_{min}	Con	Sin	1,891	1,272	1,433	1,332	1,532	1,540	2,788	2,923	1,418	1,955	2,261	2,100	1,938
ϕ_{min}	c_{min}	Con	Sin	1,511	0,936	1,172	1,106	1,167	1,284	2,339	2,445	1,197	1,590	2,092	1,638	1,696
ϕ_{max}	c_{max}	Con	Con	1,634	1,142	1,458	1,497	1,119	1,646	2,574	2,397	1,109	0,951	1,784	1,571	1,587
ϕ_{min}	c_{max}	Con	Con	1,416	0,920	1,289	1,360	0,919	1,477	2,313	2,142	0,969	0,741	1,683	1,302	1,425
ϕ_{max}	c_{min}	Con	Con	1,135	0,910	1,066	0,917	0,836	1,037	1,614	1,528	0,870	1,148	1,511	1,220	1,302
ϕ_{min}	c_{min}	Con	Con	0,918	0,685	0,892	0,774	0,637	0,869	1,352	1,273	0,731	0,933	1,402	0,951	1,134
			w	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
				W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qra1	Tpb-L1	Tpb-L1	Qra1	Qd1	Qra1	Qra1	Qra1	Qd1	Qd1	Qra1	Qra1	Qd1
				ah=0.22 g	ah=0.16 g	ah=0.16 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	0,22g	0,22g	ah=0.22 g
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		28,9	36,4	36,4	28,9	21,8	28,9	28,9	28,9	21,8	21,8	28,9	28,9	21,8
		ϕ_{min}		21,8	26,1	26,1	21,8	15,7	21,8	21,8	21,8	15,7	15,7	21,8	21,8	15,7
		c_{max} (ton/m²)		2,20	3,70	3,70	2,20	0,90	2,20	2,20	2,20	0,90	0,90	2,20	2,20	0,90
		c_{min} (ton/m²)		0,90	1,60	1,60	0,90	0,00	0,90	0,90	0,90	0,30	0,30	0,90	0,90	0,30
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0008	0,0280	0,0010	0,0241	0,0064	0,0245	0,0014	0,0003	0,0029	0,0027	0,0000	0,0003	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0030	0,0592	0,0074	0,0373	0,0216	0,0289	0,0020	0,0009	0,0147	0,0127	0,0000	0,0016	0,0001
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0077	0,1036	0,0175	0,0533	0,0478	0,0357	0,0030	0,0021	0,0368	0,0317	0,0000	0,0047	0,0005
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0161	0,1586	0,0320	0,0780	0,0900	0,0457	0,0044	0,0040	0,0748	0,0649	0,0000	0,0106	0,0011

* Aplica para todas las alternartivas

TABLA 8.6 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL													
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS													
				ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 2	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3
				S1211	S221	S222	S223	S224	S225	S621	S622	S721	S722	S131	S132	S133	S134
Fricción	Cohesion (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	0	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,477	2,414	2,041	1,886	2,259	2,224	3,358	3,172	2,504	2,800	1,555	1,461	2,661	2,495
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	2,100	2,178	1,978	1,861	1,899	1,948	2,601	2,454	1,182	2,428	1,446	1,458	2,176	2,011
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,667	1,522	1,933	1,763	2,009	1,651	2,574	2,415	1,716	1,943	1,400	1,440	1,976	1,180
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,293	1,286	1,870	1,736	1,648	1,372	1,790	1,697	1,394	1,572	1,287	1,437	1,490	1,434
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,478	1,660	1,320	1,297	1,452	1,522	1,435	1,578	1,640	1,861	1,005	0,951	1,417	1,365
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,252	1,502	1,274	1,277	1,225	1,338	1,108	1,217	1,432	1,615	0,930	0,949	1,156	1,098
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,000	1,039	1,247	1,207	1,296	1,130	1,098	1,213	1,118	1,287	0,901	0,937	1,060	1,055
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,774	0,882	1,202	1,186	1,069	0,944	0,773	0,854	0,911	1,042	0,820	0,935	0,798	0,788
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	2,112	2,376	1,746	1,886	1,929	2,224	2,548	2,476	2,202	2,556	1,444	1,146	2,114	1,940
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,844	2,152	1,698	1,861	1,649	1,948	2,032	1,965	1,963	2,251	1,367	1,144	1,792	1,621
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,306	1,484	1,636	1,763	1,681	1,651	1,738	1,720	1,413	1,699	1,287	1,125	1,430	1,363
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	1,038	1,260	1,588	1,736	1,400	1,372	1,222	1,209	1,174	1,395	1,206	1,123	1,106	1,044
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,263	1,634	1,131	1,297	1,240	1,522	1,100	1,245	1,439	1,698	0,931	0,743	1,128	1,067
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,101	1,484	1,096	1,277	1,065	1,338	0,872	0,983	1,287	1,497	0,876	0,741	0,953	0,888
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,786	1,012	1,057	1,207	1,087	1,130	0,763	0,881	0,919	1,123	0,823	0,728	0,772	0,759
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,623	0,864	1,021	1,186	0,911	0,944	0,538	0,621	0,765	0,925	0,763	0,726	0,596	0,579
				Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			w	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qd1	Qd2	Qd2	Qd2	Qra1	Qra1	Qd1	Qd1	Qra1	Qra1	Qd1	Qd1	Qd1	Qd1
				ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	0,22g	0,22g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	0,22g	0,22g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		21,8	21,8	21,8	21,8	28,9	28,9	21,8	21,8	28,9	28,9	21,8	21,8	21,8	21,8
		ϕ_{min}		15,7	15,7	15,7	15,7	21,8	21,8	15,7	15,7	21,8	21,8	15,7	15,7	15,7	15,7
		C_{max} (ton/m²)		0,90	2,00	2,00	2,00	2,20	2,20	0,90	0,90	2,20	2,20	0,90	0,90	0,90	0,90
		C_{min} (ton/m²)		0,30	9,00	9,00	9,00	0,90	0,90	0,00	0,00	0,90	0,90	0,30	0,00	0,30	0,30
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0242	0,0316	0,0000	0,0000	0,0001	0,0056	0,0033	0,0037	0,0821	0,0053	0,0019	0,0021	0,0065	0,0653
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0468	0,0359	0,0002	0,0000	0,0019	0,0080	0,0191	0,0164	0,0754	0,0094	0,0195	0,0208	0,0260	0,0733
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0784	0,0427	0,0009	0,0000	0,0080	0,0120	0,0477	0,0390	0,0723	0,0157	0,0491	0,0513	0,0576	0,0931
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,1192	0,0527	0,0024	0,0000	0,0211	0,0184	0,0946	0,0758	0,0786	0,0249	0,0977	0,0999	0,1047	0,1325

TABLA 8.7 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL CON OBRAS (CONTINUACIÓN)

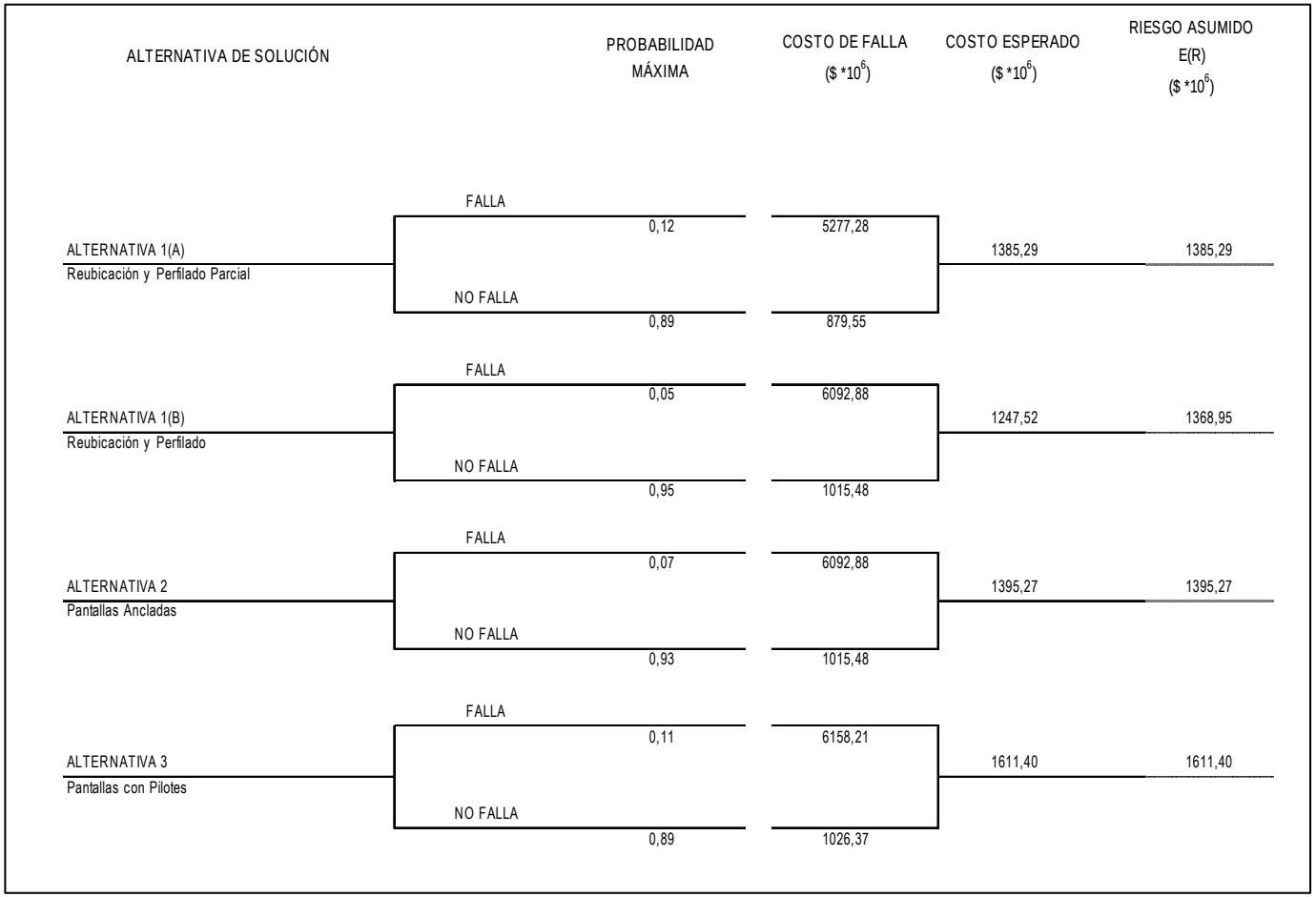
VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL CONDICIÓN DE ANÁLISIS												
				ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3	ALT 3
				S135	S138	S139	S231	S232	S234	S235	S236	S631	S632	S732	S733	S734
Fricción	Cohesion (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,759	1,634	1,989	3,121	3,111	3,589	2,388	2,653	3,358	3,172	3,040	10,478	2,751
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	2,205	1,363	1,694	2,984	2,844	3,014	2,149	2,319	2,601	2,454	2,684	8,894	2,522
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,864	1,414	1,700	2,922	1,894	3,130	1,596	1,818	2,574	2,415	2,013	7,686	2,157
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,310	1,143	1,403	2,780	1,627	2,553	1,355	1,480	1,790	1,697	1,654	6,101	1,925
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,524	1,088	1,320	1,431	2,023	1,608	1,674	1,709,	1,435	1,578	1,962	3,404	2,000
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,215	0,909	1,123	1,365	1,852	1,356	1,512	1,493	1,108	1,217	1,734	2,877	1,838
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,044	0,943	1,128	1,404	1,266	1,403	1,112	1,175	1,098	1,213	1,297	2,524	1,574
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,734	0,763	0,929	1,266	1,056	1,149	0,948	0,956	0,773	0,854	1,066	1,996	1,408
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	2,074	1,440	1,799	2,455	2,918	2,626	2,193	2,314	2,548	2,476	2,653	8,887	2,394
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,723	1,226	1,560	2,355	2,709	2,278	2,007	2,080	2,032	1,965	2,404	7,740	2,262
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,184	1,221	1,511	2,275	1,701	2,169	1,401	1,482	1,738	1,720	1,625	6,098	1,811
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,832	1,007	1,269	2,166	1,491	1,820	1,214	1,243	1,222	1,209	1,373	4,950	1,672
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,159	0,960	1,195	1,120	1,896	1,168	1,534	1,491	1,100	1,245	1,708	2,906	1,743
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,957	0,818	1,033	1,074	1,763	1,019	1,411	1,338	0,872	0,983	1,551	2,515	1,650
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,685	0,817	1,003	1,089	1,137	0,966	0,975	0,962	0,763	0,881	1,043	2,030	1,328
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,482	0,674	0,841	0,981	0,968	0,815	0,847	0,804	0,538	0,621	0,883	1,638	1,228
				Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			w	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
Material				Qd1	Qd1	Qd1	Qd2	Qd2	Qra1	Qra1	Qd2	Qd1	Qd1	Qra1	Qra1	Qra1
				ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	0,22g	0,22g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	ah=0.22 g	0,22g	0,22g	0,22g
Valores paramétricos empleados en cada sección			ϕ_{max}	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	28,9	28,9	21,8	21,8	21,8	28,9	28,9	28,9
			ϕ_{min}	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	21,8	21,8	15,7	15,7	15,7	21,8	21,8	21,8
			C_{max} (ton/m²)	0,90	0,90	0,90	2,00	2,00	2,20	2,20	2,00	0,90	0,90	2,20	2,20	2,20
			C_{min} (ton/m²)	0,00	0,30	0,30	9,00	9,00	0,90	0,90	0,90	0,00	0,00	0,90	0,90	0,90
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0276	0,0146	0,0007	0,0000	0,0137	0,0001	0,0174	0,0100	0,0033	0,0037	0,0068	0,0000	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0714	0,0433	0,0059	0,0006	0,0181	0,0032	0,0262	0,0251	0,0191	0,0164	0,0137	0,0000	0,0002
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,1283	0,0853	0,0178	0,0027	0,0242	0,0154	0,0387	0,0424	0,0477	0,0390	0,0237	0,0001	0,0005
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,1939	0,1434	0,0405	0,0076	0,0323	0,0428	0,0551	0,0605	0,0946	0,0758	0,0371	0,0003	0,0011

TABLA 8.8 PRESUPUESTO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS

								Alt 1 (A)	Alt 1 (B)	Alt 2.	Alt 3.
Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT ALT 1(A)	CANT ALT 1(B)	CANT ALT 2	CANT ALT 3	V/UNIT	RELOCALIZACIÓN TOTAL	RELOCALIZACIÓN TOTAL	PANTALLA ANCLADA	PANTALLA PILOTES
1	PRELIMINARES Y MOVIMIENTO DE TIERRA										
1-1	Localización y replanteo	M2	7.369,0	7.369,0	9.048,0	7.932,0	$ 387	$ 2.849.980	$ 2.849.980	$ 3.499.338	$ 3.067.722
1-2	Campamento e Instalaciones Provisionales	GLB	1,00	1,00	1,00	1,00	$ 1.355.749	$ 1.355.749	$ 1.355.749	$ 1.355.749	$ 1.355.749
1-3	Cerramiento en poli sombra	M	344,50	344,50	391,00	354,00	$ 1.653	$ 569.421	$ 569.421	$ 646.280	$ 585.123
1-4	Descapote	M2	3.573,00	3.573,00	3.573,00	3.172,80	$ 5.142	$ 18.373.036	$ 18.373.036	$ 18.373.036	$ 16.315.133
1-5	Perfilado de taludes (incluye comision de topografia)	M3	10791,9	15.417,00	7.593,00	2.483,14	$ 16.672	$ 179.923.906	$ 257.034.151	$ 126.591.445	$ 41.399.220
1-6	Terraplenes	M3	1.372,49	1.960,70	213,97	213,97	$ 8.938	$ 12.266.744	$ 17.523.920	$ 1.912.375	$ 1.912.375
1-7	Entibado Horizontal/ Vertical tipo 1	M2	328,73	657,45	355,80	1.245,19	$ 19.321	$ 6.351.179	$ 12.702.358	$ 6.874.285	$ 24.057.908
1-8	Compra de lotes	M2	1.211,19	1.211,19	807,46	807,46	$ 253.968	$ 307.603.810	$ 307.603.810	$ 205.068.394	$ 205.068.394
2	DEMOLICIONES										
2-1	Demolición de casas 3 pisos, mamposteria y prelosa.	M2	5002,56	5002,56	3335,04	3335,04	$ 35.644	$ 178.310.248	$ 178.310.248	$ 118.873.499	$ 118.873.499
2-2	Demolición de canchas multiples	M2	734,68	734,68	734,68	325,23	$ 23.423	$ 17.208.704	$ 17.208.704	$ 17.208.704	$ 7.617.992
2-3	Retiro y disposición de escombros/sobrantes a sitio autorizado (distancia inferior a 5 Km)	M3	14421,97	18458,86	10714,07	5604,21	$ 6.511	$ 93.895.438	$ 120.177.946	$ 69.754.846	$ 36.486.676
3	RELOCALIZACIÓN										
3-1	Indemnizacion de familias deshabitadas en el complejo residencial	UND	96	96	64	64	$ 31.056.250	$ 2.981.400.000	$ 2.981.400.000	$ 1.987.600.000	$ 1.987.600.000
3-2	Reubicación temporal (canon de arrendamiento, equivalente a $248000/mes)	MES	480	480	960	960	$ 248.000	$ 119.040.000	$ 119.040.000	$ 238.080.000	$ 238.080.000
4	REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL										
4-1	Elemento de Borde en Muro Interno	UND	0	0	80	80	$ 415.442	$ -	$ -	$ 33.235.391	$ 33.235.391
4-2	Elemento de Borde en Fachada (MODULO 4 VIVIENDAS)	MODULO	0	0	8	8	$ 1.277.341	$ -	$ -	$ 10.218.727	$ 10.218.727
4-3	Viga de Amarre sección 12 x 20 cm 4 D 1/2" + flejes 3/8" c. 15 cm, concreto de 21 Mpa	UND	0	0	32	32	$ 396.569	$ -	$ -	$ 12.690.223	$ 12.690.223
4-4	Pañete Estructural	UND	0	0	32	32	$ 3.933.683	$ -	$ -	$ 125.877.865	$ 125.877.865
4-5	Refuerzo de Cimentacion	UND	0	0	32	32	$ 4.142.995	$ -	$ -	$ 132.575.832	$ 132.575.832
4-6	Estuco y Pintura de paredes	UND	0	0	32	32	$ 1.028.578	$ -	$ -	$ 32.914.506	$ 32.914.506
4-7	Suministro e Instalación de Piso en ceramica (primera y segunda planta)	UND	0	0	32	32	$ 4.172.318	$ -	$ -	$ 133.514.165	$ 133.514.165
4-8	Enchape y accesorios de baño (Incluye un sanitario, un lavamanos e instalación de griferia)	UND	0	0	32	32	$ 1.199.169	$ -	$ -	$ 38.373.413	$ 38.373.413
4-9	Reubicación de red de gas domiciliario de 1". Incluye suministro e instalación de tubería y de 4 acometidas	M	0	0	800	800	$ 43.519	$ -	$ -	$ 34.815.344	$ 34.815.344
5	PANTALLA DE CONCRETO EN CANTILIVER										
5-1	Pantalla Anclada (concreto 21 Mpa), no incluye retiro, ni transporte de material	M3	0,00	0,00	692,93	257,63	$ 380.286	$ -	$ -	$ 263.511.845	$ 97.973.181
5-2	Anclajes de tres torones, ϕ=2"	M	0,00	0,00	968,00	330,00	$ 287.452	$ -	$ -	$ 278.253.760	$ 94.859.236
6	MURO EN TIERRA ARMADA										
6-1	Muro en tierra armada, incluye material seleccionado y geotextil T-2400	M3	0,00	1179,1	465,82	465,82	$ 143.558	$ -	$ 169.269.238	$ 66.872.188	$ 66.872.188
7	PANTALLA DE PILAS										
7-1	Viga de amarre pilotes (3000 psi)	M	0,00	0,00	54,00	165,81	$ 105.847	$ -	$ -	$ 5.715.719	$ 17.550.570
7-2	Pilotes preexcavados (incluye concreto de 21 Mpa, perfil tubular de 16" y perfil IPE240)	M	0,00	0,00	243,00	1175,00	$ 651.796	$ -	$ -	$ 158.386.467	$ 765.860.488
8	OBRAS DE DRENAJE										
8-1	Cuneta Revestidas en Concreto Fundidas en el Lugar	M	478,67	598,34	564,64	257,69	$ 330.818	$ 158.353.505	$ 197.941.881	$ 186.794.261	$ 85.249.619
8-2	Filtros y subdrenes chimenea	M	517,13	646,41	571,52	450,69	$ 174.448	$ 90.211.546	$ 112.764.432	$ 99.701.079	$ 78.622.010
9	BIO INGENIERIA										
9-1	Empradizacion con cespedón	M2	1874	2342,50	2964,30	8259,60	$ 4.953	$ 9.281.797	$ 11.602.246	$ 14.681.980	$ 40.909.248
9-2	Rocería y limpieza	M2	1961,71	2452,14	2452,14	2452,14	$ 56	$ 109.785	$ 137.232	$ 137.232	$ 137.232
9-3	Siembra de árboles	UND	83,00	83,00	108,00	108,00	$ 53.186	$ 4.414.421	$ 4.414.421	$ 5.744.066	$ 5.744.066
10	MOBILIARIO URBANISTICO										
10-1	Poste Peatonal M130 H=6m Brazo Doble	UND	0,00	15	15	15	$ 1.851.360	$ -	$ 27.770.400	$ 27.770.400	$ 27.770.400
10-2	Banca en Concreto con Espaldar M30	UND	0,00	16	16	16	$ 304.500	$ -	$ 4.872.000	$ 4.872.000	$ 4.872.000
10-3	Adoquin Concreto Peatonal Cruz	M2	0,00	366,48	366,48	366,48	$ 37.830	$ -	$ 13.863.938	$ 13.864.090	$ 13.864.090
10-4	Caneca en Acero Inoxidable Tipo Barcelona	UND	0,00	12	12,00	12,00	$ 216.118	$ -	$ 2.593.416	$ 2.593.416	$ 2.593.416
11	PANTALLA DE PILAS ZONA HOMOGENEA LEI-tra-l-1										
11-1	Viga de amarre pilotes (3000 psi)	M	0,00	55,34	55,34	55,34	$ 105.847	$ -	$ 5.857.448	$ 5.857.448	$ 5.857.448
11-2	Pilotes preexcavados (incluye concreto de 21 Mpa, perfil tubular de 16" y perfil IPE240)	M	0,00	261,00	261,00	261,00	$ 651.796	$ -	$ 170.118.798	$ 170.118.798	$ 170.118.798
12	ANDENES										
12-1	Suministro y colocación de concretos para anden, (incluye dilatación cada 1.5 m)	M3	0,00	0,00	0,00	9,59	$ 370.506	$ -	$ -	$ -	$ 3.554.636
13	MANTENIMIENTO										
13-1	Mantenimiento (Se asume entre el 20% del costo de la alternativa)	GLB	1,00	1,00	1,00	1,00		$ 216.215.854	$ 329.493.336	$ 484.360.014	$ 483.808.721

COSTOS DIRECTOS	$ 4.397.735.122	$ 5.084.848.109	$ 5.139.288.178	$ 5.135.980.418
AIU (25%)	$ 324.323.780	$ 496.102.027	$ 728.402.045	$ 727.575.104
COSTO TOTAL ALTERNATIVA	$ 4.722.058.902	$ 5.580.950.137	$ 5.867.690.223	$ 5.863.555.522

FIGURA 8.8 ÁRBOL DE DECISIÓN



BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá D.C.
- AZIZI, F. (2000). "Applied Analyses in Geotechnics". University of Plymouth, UK. E and FN Spon. London. Chapter 8. Pp 382 – 425
- BIENIAWSKI, Z. T. (1976). Rock Mass classification in Rock Engineering. In Exploration for Rock Engineering. Cape Town.
- BRAVO L, Álvaro C. (2008). Diagnóstico técnico DI-3944, Barrio Buenavista Oriental : Evento 95599. Bogotá D.C. : DPAE, Coordinación de asistencia técnica.
- BOWLES J. (1988). "Foundation Analysis and Design". McGraw-Hill International Editions.
- CARO PEÑA, Pablo Enrique. (1986). Convenio 200-86. Departamento Administrativo de Planeación del Distrito Especial de Bogotá. Bogotá D.C.
- CODUTO DONALD P. (2001). "Foundation Design, Principles and Practices". Second edition. Prentice Hall, New Jersey.
- CORNFORTH D H (2005). "Landslide in Practice – Investigation, Analysis, and Remedial/preventative Option in Soil". John Wiley and Sons.
- DAS BRAJA M. (1999). "Principios de Ingeniería de Fundaciones". Cuarta Edición. California State University. Thomson Editores.
- (_____). (2004). "Principles of Foundation Engineering". 5E. California. Thomson Learning Inc.
- DAY, Robert W. (1999) "Forensic Geotechnical and Foundation Engineering" Mc Graw Hill. United States.
- DE PORTA J. (1974) Léxico Estratigráfico. París : Centre National de la Recherche Scientifique.
- DEERE, D. U., and PATTON, F. D. (1971). Slope Stability in Residual Soils. In Proc., Fourth Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Juan, Puerto Rico, American Society of Civil Engineers, New York.
- DUNCAN J. M. and Wright S. G. (2005). "Soil Strength and Slope Stability". Wiley and Sons Inc. New Jersey.
- HEWITT V, Víctor M. (2009a). Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental : Evento 96939 – Emergencia 2610. Bogotá D.C. : DPAE, Coordinación de asistencia técnica.

- HOEK E (1995). "Support of Underground Excavation in Hard Rock". January, 1995. AA. Balkema Publisher.

- (_____). (2009b) Diagnóstico técnico DI-3991, Barrio Buenavista Oriental : Eventos 95992, 96633 y 96851. Bogotá D.C. : DPAE, Coordinación de asistencia técnica.

- (_____). (2008a) Diagnóstico técnico DI-3848, Barrio Buenavista Oriental : Eventos 91103,94051 y 94080. Bogotá D.C. : DPAE, Coordinación de asistencia técnica.

- (_____). (2000). Diagnóstico técnico DI-3882, Barrio Buenavista Oriental : Evento 94913. Bogotá D.C. : DPAE, Coordinación de asistencia técnica, 2008bCap 1, Pág 27HIDROGEOLOGÍA Y GEOTECNIA Ltda. Estudio de Zonificación de Riesgos por Remoción en Masa en los Barrios Triángulo, Triángulo Alto y Corinto de la Localidad de San Cristóbal. FOPAE-DPAE. Bogotá D.C.

- ISRM. (1981). Rock Caractherization. Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. Brown, E. T. Ed. Commision on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press.

- GEOCING LTDA. (2007). Monitoreo Geotécnico y Estructural en el Sector de la Urbanización de Villa de los Alpes Localidad de San Cristóbal.

- GEOINGENIERÍA LTDA. (2000). Estudio de Riesgos por Remoción en Masa, y Evaluación de Alternativa de Mitigación para la Urbanización Villa de los Alpes, en la Localidad de San Cristóbal: Informe Final. DPAE – FOPAE. Bogotá D.C.

- GIA LTDA Y GEOCING Ltda. (2006). Estudio de Riesgos por Remoción en Masa, Evaluación de Alternativas de Mitigación y Diseños Detallados de Medidas de Mitigación en los Barrios El Codito, Mirador del Norte, y Villa Nidia de la Localidad de Usaquén. DPAE. Bogotá D. C.

- GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis. (2004) et al. Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall. Madrid.

- GONZÁLEZ G. A. (1987). "Analysis of Infiltration Test". VIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Sociedad Colombiana de Geotecnia.

- GUTIÉRREZ & COLEGIAL. (1987). Geología y aspectos geotécnicos de la parte central del sector denominado "Ciudad Bolívar" en el Distrito Especial de Bogotá. Trabajo de Grado. Bogotá D. C. : Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia.

- IFCAYA. (1988). Estudio Geológico y Geotécnico de Algunos Sitios Críticos en los Barrios Gran Colombia, Triángulo, Corinto y Ramajal. Bogotá D.C. : Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaria de Obras Públicas. División de Estudio.

- INGENIERÍA Y GEORIESGOS. (2005). Estudio de Riesgos por Remoción en Masa y de Compresibilidad del Terreno, Evaluación de Alternativas de Mitigación del Riesgo y Diseños Detallados de las Medidas Recomendadas para su Implementación en el Corto Plazo en un Sector del Barrio Atenas en la Localidad de San Cristóbal de la Ciudad de Bogotá D.C. Informe Final. Bogotá D.C.

- INGENIERÍA Y GEOTECNIA. (1995). Estudio Geotécnico y de Cimentaciones: Urbanización Los Altos del Zipa – Zona B Avenida Ciudad de Villavicencio – Calle 41 Sur: Informe Final. Bogotá D.C.

- INGEOCIM LTDA. (1998). Zonificación por Inestabilidad del Terreno para Diferentes Localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá D. C. : Mapa Geológico. UPES - FOPAE. Bogotá D.C.

- INGEOMINAS. (2003). Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá. Bogotá D.C.
- INGEOMINAS - UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. (1997). Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá: Convenio Interadministrativo 01-93. Santa Fe de Bogotá D. E..
- JULIVERT M. (1968). Lexique Estratigraphique Internationale. Vol. V Fasc. 4ª. París.
- LEE M. E, and Jones D. K C. (2004). "Landslide Risk Assesment". Thomas Telford.
- (_____). (1961). Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá: Boletín de Geología No. 7:5-36. Bucaramanga, Santander.
- PÉREZ Hernando. (2007). Diagnóstico técnico DI-3460, Barrio Buenavista Oriental. Bogotá D.C.: DPAE, Coordinación de Asistencia Técnica. Bogotá D.C.
- REYES G. (2005). José L. Diagnóstico técnico DI-3996, Barrio Buenavista Oriental, Bogotá D.C.: DPAE, Coordinación de asistencia técnica. Bogotá D.C.
- SOWERS, G. F., and CARTER, B. R. (1979). paracti Rockslide, Bolivia. In Rockslides and Avalanches (B. Voight, ed.), Developments in Geothechnical Engineering.
- SUÁREZ D., Jaime. (2009). "Deslizamientos – Técnicas de Remediación". Volumen 2. Primera Edición. División de Publicaciones UIS. Bucaramanga, Santander.
- SUÁREZ D., Jaime. (1998). "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales". Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Santander.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. (2006). Diagnóstico Geotécnico y Estructural de 11 (Once) Proyectos de Vivienda de la Caja de Vivienda Popular.: Informe Final. Tomo 8. Urbanización: Buenavista Oriental III Etapa. Alcaldía Mayor de Bogotá. Caja de Vivienda Popular. Bogotá D.C.
- VAN DER Hammen T. (1955). Plioceno y Pleistoceno del Altiplano de Bogotá y Alrededores: Análisis Geográficos No. 24. Bogotá : Publicación IGAC
- (_____). (1995). Memoria Explicativa de los Mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá: Revista Análisis geográficos No. 24. Bogotá: IGAC.
- VAN ZUIDAM R. (1985). Aerial Photo-Interpretattion in Terrain Analysis and Geomorfhologic Mapping. Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- VESIC, Aleksandar (1975). "Bearing Capacity of Shallow Foundations". Foundation Engineering Handbook. Winterkorn and Fang. Pp 121 – 147.
- VILLAMIL V. Tulio I. (2008). Diagnóstico técnico DI-3633, Barrio Buenavista Oriental : Coordinación de asistencia técnica, Evento 86303. Bogotá D.C. : DPAE.
- TURNER A. K. AND SCHUSTER L R. (1996). "Landslides Investigation and Mitigation". Special Report 247. Transportation Research Borrad. Nacional Research Council. USA.