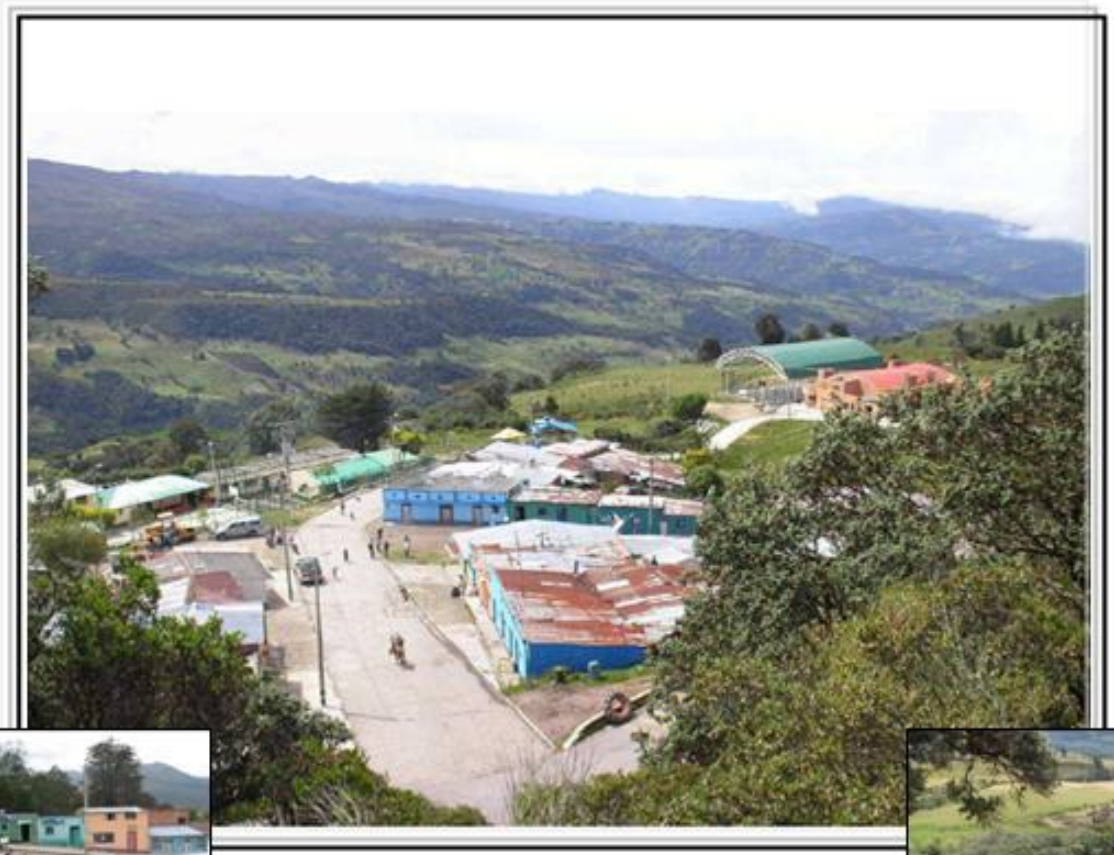
ALCALDIA MAYOR
DE BOGOTA D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de prevención y
Atención a Emergencias

CLASIFICADO

ESTUDIO DE RIESGOS POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN PARA EL CENTRO POBLADO SAN JUAN DE SUMAPAZ, DE LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ, EN BOGOTÁ D.C.







GIA - 062- 09

CONTRATO No. Cons. 749 - 2009

PARTE 1 (pp. 1 – 200) DE 5 PARTES

ORIGINAL

TEXTO

JULIO DE 2010

GIA CONSULTORES LTDA

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 el Centro Poblado de San Juan de Sumapaz, de la Localidad de Sumapaz, en Bogotá D.C.

AUTOR: GIA CONSULTORES LTDA.

RESUMEN:

En un país en el que el crecimiento de las ciudades, las poblaciones y los caseríos está teñido por el caos y la invasión, en algunos casos engendrados por la violencia o la pobreza, y en el que lo rural parece proscrito, es alentador hallar, indistinto del tamaño y de la capacidad económica, destellos de esperanza y de cambio, emanados desde la institucionalidad. San Juan de Sumapaz es uno de ellos.

El centro poblado hace parte del espacio rural del distrito capital; su crecimiento silencioso y lento, emerge desde los albores de la década del 50, alejado del gobierno local (bajo el marco de la desatención) y al margen del desarrollo del distrito capital, a pesar de estar en uno de los escenarios de mayor riqueza hídrica, y de fauna y flora del país y del continente: "El Paramo de Sumapaz". Para remediar el prolongado abandono, se han comenzado una serie de proyectos que propenden no sólo por la recuperación y la protección de lo rural sino por el bienestar de la comunidad, sin someterlos, a pesar de las restricciones ambientales, al reasentamiento; el estudio de riesgos (por FRM) es pieza indiscutible, no sólo porque permite subsanar la emergencia acaecida en el 2007, sino porque sirve como instrumento de planificación para el desarrollo "seguro" (al permitir el ajuste del POT).

La población descansa en un amplio escalón, cubierto en gran parte por espesos depósitos de suelos residuales arcillosos, adosados a contrapendientes y, estrechas, laderas estructurales, de hasta cuarenta grados de inclinación. Conjunto que favorece la incubación de procesos de inestabilidad (FRM), y realza la importancia del estudio, y de la puesta en marcha de sus partes constitutivas: el levantamiento topográfico, las investigaciones geológica, geotécnica, hidrológica e hidráulica, las evaluaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo; componentes trascendentes para la estructuración de las alternativas y la selección de la más favorable técnica y económicamente.

PALABRAS CLAVES:
San Juan, Sumapaz, morfodinámica; contrapendiente estructural; amenaza; vulnerabilidad; riesgo; mitigación..

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-749-2009	Español	847	3

TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO 15
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS 16

1 CAPÍTULO 1 - GENERALIDADES 18
1.1 INTRODUCCIÓN 19
1.2 LOCALIZACIÓN 19
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 20
1.4 ANTECEDENTES 21
1.5 ALCANCES 21
1.6 LIMITACIONES 22
1.7 METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES 22
1.7.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN EXISTENTE 22
1.7.1.1 INFORMACIÓN ESPECÍFICA 23
1.7.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA 23
1.7.2.1 BIBLIOGRAFÍA 23
1.7.3 VISITA DE RECONOCIMIENTO 24
1.7.4 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE Y TEMÁTICA 24
1.7.4.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 24
1.7.4.2 ESTUDIOS GEOLÓGICOS Y GEOMORFOLÓGICOS 25
1.7.5 ESTUDIO GEOTÉCNICO BÁSICO 25
1.7.5.1 INVENTARIO DE PROCESOS DE INESTABILIDAD 25
1.7.5.2 PROGRAMACIÓN DE EXPLORACIÓN DE SUBSUELO 25
1.7.6 ANÁLISIS GEOTÉCNICO 25
1.7.6.1 MODELO GEOTÉCNICO 25
1.7.6.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 26
1.7.6.3 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD 26
1.7.7 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR REMOCIÓN EN MASA 26
1.7.8 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO 27
1.7.9 EVALUACIÓN DE MITIGABILIDAD 27
1.7.10 ORGANIZACIÓN DEL INFORME 27

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.1 VÉRTICES DEL TERRENO 20

TABLA 1.2 CONTENIDO 28
TABLA 1.3 ANEXOS 28
TABLA 1.4 PLANOS 28

2 CAPÍTULO 2 - TOPOGRAFÍA 29
2.1 ALCANCE ESPECÍFICO DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO 30
2.2 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 30
2.2.1 TRABAJO DE CAMPO 30
2.2.2 LOCALIZACIÓN CARTOGRÁFICA 31
2.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE AMARRE 32
2.2.4 DESCRIPCIÓN DE LA POLIGONAL DE CIERRE 33
2.2.5 AJUSTES DEL LEVANTAMIENTO 33
2.2.6 AMOJONAMIENTO DE REFERENCIA 33
2.2.7 CONDENSACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE CAMPO 34
2.2.8 TRABAJO DE OFICINA 34
2.3 EQUIPO 34

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO 31
TABLA 2.2 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO (CONTINUACIÓN) 32
TABLA 2.3 MOJONES MATERIALIZADOS EN CAMPO 34
TABLA 2.4 RELACIÓN DE EQUIPOS Y ELEMENTOS POR COMISIÓN 35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 POLIGONAL DE AMARRE 32
FIGURA 2.2 POLIGONAL DE CIERRE 33

3 CAPÍTULO 3 – GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 36
3.1 MÉTODO DE TRABAJO 37
3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE 38
3.3 GEOLOGÍA GENERAL 39
3.3.1 ESTRATIGRAFÍA 40
3.3.1.1 CRETÁCICO 41
3.3.1.2 TERCIARIO 43
3.3.1.3 CUATERNARIO 44

3.3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 45
3.4 GEOLOGÍA LOCAL 45
3.4.1 ESTRATIGRAFÍA 46
3.4.1.1 UNIDADES DE SUELO 46
3.4.1.2 UNIDADES DE ROCA 48
3.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 50
3.4.2.1 DISCONTINUIDADES 50
3.4.2.2 LINEAMIENTOS FOTOGEOLÓGICOS 51
3.5 GEOMORFOLOGIA LOCAL 51
3.5.1 MORFOESTRUCTURAL (FORMAS) 51
3.5.1.1 UNIDAD DE LADERA ESTRUCTURAL INTERVENIDA (LEI) 52
3.5.1.2 UNIDAD DE CONTRAPENDIENTE ESTRUCTURAL (CE) 52
3.5.1.2.1 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida (CeNI) 52
3.5.1.2.2 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Escarpe en Roca(CeNI – er) 53
3.5.1.2.3 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Terrazas en Suelo Residual(CeNI – tsr) 53
3.5.1.2.4 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Laderas en Suelo Residual(CeNI – lsr) 54
3.5.1.2.5 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Laderas en Suelo Residual(CeI – lsr) 55
3.5.1.2.6 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Taludes en Suelo Residual Traslocado (CeI – lsrt) 56
3.5.1.2.7 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Taludes de Relleno Antrópico Traslocado (CeI – trat) 56
3.5.1.2.8 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Escarpe Antrópico en Roca (CeI – ear) 56
3.5.1.2.9 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Relleno Antrópico para Desarrollo Urbanístico (CeI – eradu) 57
3.5.1.2.10 Subunidades Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Suelo Residual para Desarrollo Urbanístico (CeI – esrdu) 58
3.5.1.2.11 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Relleno Antrópico para Desarrollo Urbanístico (CeI – eradu) 58
3.5.2 PROCESOS MORFODINÁMICOS 59
3.5.2.1 METEORIZACIÓN 59
3.5.2.2 PROCESOS DE EROSIÓN 60
3.5.2.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM) 60
3.6 ANTECEDENTES DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA 61
3.6.1 AÑO 1951 (VUELO IGAC C-606 FOTOGRAFIAS 288-291) 62
3.6.2 AÑO 1988 (VUELO IGAC C-2341 FOTOGRAFIAS 243-246) 62
3.6.3 (FOTO SATELITAL GOOGLE EARTH - 2007) 63
3.7 HIDROGEOLOGÍA 63
3.7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS 63

3.7.2 RELEVAMIENTO DE PUNTOS DE AGUA 67
3.7.3 MOVIMIENTO DEL AGUA 67
3.8 AMENAZA SÍSMICA 68
3.8.1 FUENTES SISMOGÉNICAS 68
3.8.2 CUALIFICACIÓN DE AMENAZA LOCAL 69
3.8.3 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO 69

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO 40
TABLA 3.2 VUELOS FOTOINTERPRETADOS 41
TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS 67
TABLA 3.4 FUENTES SISMOGÉNICAS PARA AMENAZA SÍSMICA EN BOGOTÁ Y SU ZONA RURAL 68
TABLA 3.5 FACTORES DE AMPLIFICACIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO (MEDVEDEV, 1965) 70
TABLA 3.6 ACELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE Y DE DISEÑO 71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-606_290 (AÑO 1951) 64
FIGURA 3.2 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-2341-244 (AÑO 1988) 65
FIGURA 3.3 IMAGEN GOOGLE EARTH (TOMADO DE SARACHE, 2007) 66

4 CAPÍTULO 4 – ESTUDIO GEOTÉCNICO 73
4.1 INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO 74
4.1.1 MÉTODO DE TRABAJO 74
4.1.2 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 75
4.1.2.1 MÉTODOS DIRECTOS 75
4.1.2.2 MÉTODOS INDIRECTOS: REFRACCIÓN SÍSMICA 78
4.1.3 ENSAYOS DE CAMPO 80
4.1.4 ENSAYOS DE LABORATORIO 86
4.2 CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA 88
4.2.1 SUELOS 88
4.2.1.1 MATERIAL 1: SUELO ORGÁNICO, QSO 88
4.2.1.2 MATERIAL 2: RELLENOS ANTRÓPICOS MIXTOS, Q_{ARM1} Y Q_{ARM2} 88
4.2.1.3 MATERIAL 3: DEPÓSITOS COLUVIALES, Q_{CO} 92
4.2.1.4 MATERIAL 4: SUELOS RESIDUALES DE LA FORMACIÓN FUSAGASUGÁ, $Q_{PGLF\text{-}LM\text{-}SR}$ Y $Q_{PGLF\text{-}LD\text{-}SR}$ 94
4.2.2 MACIZO ROCOSO 94

4.2.2.1 MATERIAL ROCOSO ____ 94
4.2.2.1.1 Material 5: Lodolitas y Limolitas de la Formación Fusagasugá, P_{glf-Ld} y P_{glf-Lm} 94
4.2.2.1.2 Material 6: Areniscas de la Formación Fusagasugá, P_{GLF-A1} y $P_{PGLF-A2}$ 96
4.2.2.2 DISCONTINUIDADES ____ 96
4.2.2.3 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO ____ 98
4.2.2.4 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DEL MACIZO ROCOSO ____ 99
4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA ____ 100

LISTA DE TABLAS

TABLA 4.1 LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE EXPLORACIÓN DIRECTA DEL SUBSUELO ____ 77
TABLA 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES ESTRATIGRÁFICOS ____ 78
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 ____ 85
TABLA 4.8 RELACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO ____ 86
TABLA 4.9 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO ____ 89
TABLA 4.10 RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO (CONTINUACIÓN) ____ 90
TABLA 4.11 CARGAS PUNTUALES ____ 91
TABLA 4.12 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 1: QSO ____ 92
TABLA 4.13 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 3: QCO ____ 93
TABLA 4.14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 4: QPGLF-LD-SR Y QPGLF-LM-SR ____ 93
TABLA 4.15 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 5: PGLF-LD Y PGLF-LM ____ 95
TABLA 4.16 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 6: P_{GLF-A_1} Y P_{GLF-A_2} ____ 95
TABLA 4.17 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO ____ 98
TABLA 4.18 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO ____ 99
TABLA 4.19 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO ____ 100
TABLA 4.20 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO (CONTINUACIÓN) ____ 101
TABLA 4.21 ZONAS HOMOGÉNEAS ____ 103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 ESQUEMA OPERATIVO DE UNA LÍNEA SÍSMICA DE 60 M DE PROFUNDIDAD (L=138 M) ____ 79
FIGURA 4.2 ESQUEMA OPERATIVO DE UNA LÍNEA SÍSMICA DE 30 M DE PROFUNDIDAD (L=55 M) ____ 80

FIGURA 4.3 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QSO 83
FIGURA 4.4 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QPGLF-LM-SR 83
FIGURA 4.5 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QPGLF-LD-SR 84
FIGURA 4.6 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA LOS MATERIALES PGLF-LM Y PGLF-LD 84
FIGURA 4.7 CARTA DE PLASTICIDAD 87
FIGURA 4.8 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES 97
FIGURA 4.9 RESUMEN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES 97

5 CAPÍTULO 5 - HIDROLOGÍA, COBERTURA Y USOS DEL SUELO 104
5.1 ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS 105
5.1.1 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 105
5.1.2 CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA 106
5.1.3 PRECIPITACIONES DE CORTA DURACIÓN 107
5.1.4 RELACIÓN LLUVIA-DESLIZAMIENTO 110
5.1.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO 112
5.1.5.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS MICROCUENCAS 112
5.1.5.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE LAS CUENCAS 113
5.1.5.3 CAUDALES MÁXIMOS ESPERADOS 115
5.1.5.4 EVALUACIÓN HIDRÁULICA 122
5.1.6 CONDICIONES NATURALES DEL DRENAJE 124
5.1.7 CONDICIONES ARTIFICIALES DEL DRENAJE 124
5.2 COBERTURA Y USOS DEL SUELO 124
5.2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO 124
5.2.2 CLASIFICACIÓN DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO 125

LISTA DE TABLAS

TABLA 5.1 SERIE HISTÓRICA DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA (MM) ESTACIÓN SAN JUAN 107
TABLA 5.2 PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO 108
TABLA 5.3 PRECIPITACIÓN – DURACIÓN – TR. 109
TABLA 5.4 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – TR. 110
TABLA 5.5 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LAS CUENCAS 112
TABLA 5.6 TORMENTA DE DISEÑO - QUEBRADA SAN JUAN 1 TR=100 AÑOS 117
TABLA 5.7 TORMENTA DE DISEÑO - QUEBRADA SAN JUAN 2 TR=100 AÑOS. 118
TABLA 5.8 HIDROGRAMA UNITARIO – QUEBRADA SAN JUAN 1. TR = 100 AÑOS. 119
TABLA 5.9 HIDROGRAMA UNITARIO - QUEBRADA SAN JUAN 2. TR = 100 AÑOS 119

TABLA 5.10 CRECIENTE – QDA. SAN JUAN 1. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS) 120
TABLA 5.11 CRECIENTE QUEBRADA SAN JUAN 2. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS) 121
TABLA 5.12 PERFIL DE LA CRECIENTE (TR = 100 AÑOS) - QDA. SAN JUAN 1 123
TABLA 5.13 PERFIL DE LA CRECIENTE (TR = 100 AÑOS) - QDA SAN JUAN 2 123
TABLA 5.14 LEYENDA Y CLASIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA TIERRA 126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 5.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (ESTACIÓN SAN JUAN) 106
FIGURA 5.2 CURVAS PRECIPITACIÓN – DURACIÓN – TR. 109
FIGURA 5.3 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – TR. 110
FIGURA 5.4 MÓDULO DE PRECIPITACIÓN ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SAN JUAN – SANTA MARÍA DE USME 111
FIGURA 5.5 PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SAN JUAN – SANTA MARÍA DE USME 112
FIGURA 5.6 MICROCUENCAS DE LAS QUEBRADAS DEL CASCO URBANO 113
FIGURA 5.7 CRECIENTE – QDA. SAN JUAN 1. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS) 119
FIGURA 5.8 CRECIENTE QDA. SAN JUAN 2 - TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS) 122

6 CAPÍTULO 6 – EVALUACIÓN DE AMENAZA 127
6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO 128
6.2 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTABILIDAD 132
6.2.1 HIPÓTESIS DE TRABAJO 132
6.2.1.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA 133
6.2.1.2 MECANISMOS DE FALLA 138
6.2.1.3 EVENTOS DETONANTES 139
6.2.1.3.1 Agua 139
6.2.1.3.2 Sismo 141
6.2.1.4 MODELACIÓN DE ESTABILIDAD 142
6.2.2 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA 142
6.2.2.1 CONSIDERACIONES 142
6.2.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS 143
6.2.3 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA 145

LISTA DE TABLAS

TABLA 6.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TALUDES - ESTADO ACTUAL 129
TABLA 6.2 RESUMEN DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO 130
TABLA 6.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES 140

TABLA 6.4 PROBABILIDADES DE AGENTES EXÓGENOS 142
TABLA 6.5 CATEGORIZACIÓN DE LA AMENAZA (ADAPTADO DE GONZÁLEZ Y MILLÁN, 1999) 145
TABLA 6.6 ESPERANZAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD. 147
TABLA 6.7 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN) 148
TABLA 6.8 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN) 149
TABLA 6.9 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL 150
TABLA 6.10 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 151
TABLA 6.11 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 152
TABLA 6.12 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 153
TABLA 6.13 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN) 154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO 131
FIGURA 6.2 ENVOLVENTE DE LARSON QPGLF-LD-SR 134
FIGURA 6.3 ENVOLVENTE DE LARSON PGLF-LD 135
FIGURA 6.4 ENVOLVENTE DE LARSON PGLF-A 135
FIGURA 6.5 RETROANÁLISIS: SECCIÓN A-A' 136
FIGURA 6.6 RETROANÁLISIS: SECCIÓN B-B' 137
FIGURA 6.7 AMENAZA FUTURA (20 AÑOS) 155

7 CAPÍTULO 7 – EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO 156
7.1 VULNERABILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA 157
7.1.1 METODOLOGÍA 157
7.1.1.1 CRITERIOS APLICADOS 157
7.1.1.2 INFORMACIÓN PRIMARIA 160
7.1.2 VULNERABILIDAD SOCIAL. 161
7.1.3 VULNERABILIDAD FÍSICA 164
7.1.4 ZONIFICACIÓN DE VULNERABILIDAD 168
7.2 VULNERABILIDAD SÍSMICA 168
7.3 RIESGO. 169
7.3.1 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 169

7.3.2 ZONIFICACIÓN DE RIESGO. 170

LISTA DE TABLAS

TABLA 7.1 EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RESPUESTA DE LA EDIFICACIÓN 158
TABLA 7.2 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA ESTRUCTURAL 158
TABLA 7.3 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN 158
TABLA 7.4 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: PARTES ESTRUCTURALES 158
TABLA 7.5 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: DAÑO EN LA CONSTRUCCIÓN (TOMADO Y ADAPTADO DE DAY, 1999) 159
TABLA 7.6 CALIFICACIÓN PARA VARIABLE: SISTEMA DE CIMENTACIÓN 159
TABLA 7.7 CAPACIDAD DE ENDEUDAMIENTO 163
TABLA 7.8 PORCENTAJE DE PÉRDIDAS 163
TABLA 7.9 RECUPERACIÓN ECONÓMICA 164
TABLA 7.10 MATRIZ DE INTENSIDAD DE DAÑO 165
TABLA 7.11 TABLA DE CLASIFICACIÓN DE DAÑOS PROPUESTA POR DRM 165
TABLA 7.12 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO 166
TABLA 7.13 ÁREA DE AFECTACIÓN SEGÚN ÁREA DE EXPOSICIÓN 167
TABLA 7.14 CATEGORIZACIÓN DE LOS NIVELES DE VULNERABILIDAD (IVF) 168
TABLA 7.15 CATEGORIZACIÓN DEL RIESGO 170

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 173
8.2 AMENAZA FUTURA (AMENAZA CON OBRAS) 181
8.3 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA Y PLAN DE ACCIÓN 192
8.4 BENEFICIOS: INFRAESTRUCTURA Y POBLACIÓN 193

LISTA DE TABLAS

TABLA 8.1 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 2 183
TABLA 8.2 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 2 (CONTINUACIÓN) 184
TABLA 8.3 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 3 185

TABLA 8.4 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 3 (CONTINUACIÓN) 186
TABLA 8.5 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 2 187
TABLA 8.6 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 2 (CONTINUACIÓN) 188
TABLA 8.7 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 3 189
TABLA 8.8 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO COMPARATIVO ENTRE LAS ALTERNATIVAS 194

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 8.1 ALTERNATIVA 1 175
FIGURA 8.2 ALTERNATIVA 2 176
FIGURA 8.3 DETALLES – ALTERNATIVA 2 177
FIGURA 8.4 ALTERNATIVA 3 178
FIGURA 8.5 DETALLES – ALTERNATIVA 3 179
FIGURA 8.6 RESTRICCIONES AMBIENTALES 180
FIGURA 8.7 AMENAZA POR FRM CON OBRAS – ALTERNATIVA 2 190
FIGURA 8.8 RIESGO POR FRM – ALTERNATIVA 2 191
FIGURA 8.9 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (10 AÑOS) - ZONA CEI-LSRT-I-1 Y CEI-TRAT-I-1 (SECCIONES 1-1 Y 2-2) 195
FIGURA 8.10 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (50 AÑOS) - ZONA CEI-LSRT-I-1 Y CEI-TRAT-I-1 (SECCIONES 1-1 Y 2-2) 195
FIGURA 8.11 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (10 AÑOS) - REGIONES CEI-LSR-I-3, CEI-LSR-I-4, CEI-LSR-I-5, CEI-LSR-I-6 Y CENI-LSR-I-1 (SECCIONES 3-3, 4-4, 7-7, 8-8, 9-9 Y 10-10) 196
FIGURA 8.12 PLAN DE ACCIÓN 197
FIGURA 8.13 AMENAZA POR FRM CON OBRAS - PLAN DE ACCIÓN 198
FIGURA 8.14 RIESGO POR FRM - PLAN DE ACCIÓN 199
FIGURA 8.15 CRONOGRAMA DEL PLAN DE ACCIÓN 200

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A CORRESPONDENCIA
ANEXO B TOPOGRAFÍA
ANEXO B.1 CERTIFICADO DE COORDENADAS
ANEXO B.2 MOJONES DE REFERENCIA
ANEXO B.3 CARTERA ELECTRÓNICA
ANEXO B.3.1 POLIGONAL DE CIERRE
ANEXO B.3.2 DATOS CRUDOS

ANEXO B.4 _____ CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
ANEXO C _____ GEOLOGÍA
ANEXO C.1 _____ COLUMNA ESTRATIGRÁFICA
ANEXO C.2 _____ LEVANTAMIENTO ESTRUCTURAL
ANEXO C.3 _____ FOTOINTERPRETACIÓN
ANEXO C.4 _____ INVENTARIO DE PROCESOS
ANEXO D _____ GEOTECNIA
ANEXO D.1 _____ EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO
ANEXO D.1.1 _____ EXPLORACIÓN REALIZADA POR GIA C.L.
ANEXO D.1.2 _____ EXPLORACIÓN REALIZADA POR OTROS CONSULTORES.
ANEXO D.2 _____ ENSAYOS DE LABORATORIO
ANEXO D.3 _____ ENSAYOS DE LABORATORIO (OTROS CONSULTORES)
ANEXO E _____ HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
ANEXO F _____ AMENAZA
ANEXO F.1 _____ ANÁLISIS CINEMÁTICO
ANEXO F.2 _____ ANÁLISIS PARAMÉTRICO
ANEXO F.3 _____ SUPERFICIES CRÍTICAS SLIDE
ANEXO F.4 _____ DISTANCIA DE VIAJES DE SUELOS
ANEXO G _____ VULNERABILIDAD
ANEXO G.1 _____ INSTRUCTIVO DEL FORMATO DE INVENTARIO DE VIVIENDAS
ANEXO G.2 _____ INVENTARIO DE VIVIENDAS
ANEXO G.3 _____ AUSCULTACIÓN DE VIVIENDAS – REGISTRO FOTOGRÁFICO
ANEXO G.4 _____ INFORMACIÓN PREDIAL
ANEXO H _____ PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS
ANEXO H.1 _____ PREDISEÑO DE ALTERNATIVAS
ANEXO H.2 _____ RESULTADOS DE LA MODELACIÓN (EVALUACIÓN DE AMENAZA FUTURA CON OBRAS)
ANEXO H.3 _____ SUPERFICIES CRÍTICAS CON OBRAS - SLIDE
ANEXO H.4 _____ CANTIDADES DE OBRA
ANEXO H.5 _____ ANÁLISIS DE PRECIOS Y COSTOS DE REFERENCIA
ANEXO I _____ PROGRAMA DE PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

LISTA DE PLANOS

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, COBERTURA Y USO DEL SUELO
PLANO 7 _____ ZONAS HOMOGÉNEAS
PLANO 8 _____ AMENAZA - CONDICIÓN ACTUAL Y FUTURA
PLANO 9 _____ VULNERABILIDAD - CONDICIÓN ACTUAL
PLANO 10 _____ RIESGO POR FRM – CONDICIÓN ACTUAL Y FUTURA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES _____ 202

BIBLIOGRAFÍA _____ 204

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

Al sur del distrito capital, en la subcuenca del río Sumapaz, se erige la localidad del mismo nombre; esta reserva natural, que representa el área rural de la urbe, alberga el páramo más grande del mundo y es una de las más importantes fuentes hídricas de la región. Al interior del parque natural, y situada entre los 3500 m.s.n.m. y los 4000 m.s.n.m., se yergue la vereda San Juan de Sumapaz y su centro poblado, uno de los tres (3) corregimientos de la localidad y objeto del presente estudio, que GIA Consultores adelanta comisionado por el Departamento de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá, DPAE.

Las altas pendientes, el intenso marco tectónico, la exuberante riqueza hídrica, los espesos horizontes residuales (en buena parte arcillosos), el marcado dominio de bancos lodolíticos, ponen de relieve la posibilidad de movilización de las laderas en San Juan. Ejemplo notorio es el deslizamiento ocurrido en la proximidad al matadero, en el costado sur de la población, detonado por la ruptura de la línea de alcantarillado que se desprende del tanque de aguas negras, cimentado en esta parte del centro poblado. Tal ha sido su impacto que despertó el interés de las entidades públicas que, por medio de este proceso investigativo, propenden por la seguridad de los habitantes.

El presente informe describe las actividades realizadas (el reconocimiento geológico, el geotécnico, el inventario y la caracterización de los procesos morfodinámicos, y la exploración del subsuelo), para deducir los estados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, y formular las alternativas para la mitigación del riesgo.

1.2 LOCALIZACIÓN

San Juan de Sumapaz, se emplaza en el flanco occidental del Páramo de Sumapaz, accidente regional con dirección dominante Noreste-Suroeste, enmarcado en la cordillera oriental, en jurisdicción político-administrativa de la localidad de Sumapaz, en el Distrito Capital (véase el *Plano 1*). El centro poblado abarca un poco más de quince (15) ha, diez (10) de ellas aglutinan la escuela, la UPA San Juan, el centro de convenciones, el polideportivo, las calles, y las veintidós (22) viviendas, en las que moran los más de 60 habitantes (población proyectada con base en la tasa de crecimiento de Bogotá fijada en 1.48% por el DANE, y el marco demográfico reseñado por Sarache, 2007), e integran la que se rotula como “área de estudio”, enmarcada en el polígono que se traza con los puntos definidos en la *Tabla 1.1*.

TABLA 1.1 VÉRTICES DEL TERRENO

ESTE	NORTE
937404.2	973829.8
937485.1	973804.5
937538.0	973733.5
937539.4	973710.5
937526.2	973672.2
937437.5	973541.7
937400.7	973506.9
937344.5	973499.7
937170.2	973553.4
937084.0	973640.4
937091.8	973688.0
937193.9	973747.1
937214.0	973767.1
937284.6	973792.3
937362.1	973825.0
937404.2	973829.8

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A mediados del año 2008, la ruptura de un ducto de aguas residuales emplazado a media ladera en cercanías al matadero veredal de San Juan y al botadero local (papel asumido más por vocación cultural), encarnó el detonante para que una masa se deslizara, constriñendo consigo una sección del cauce de uno de los dos cuerpos de agua (bautizados aquí como San Juan 1, la del extremo occidental y San Juan 2, la del trazo oriental, véase el *Plano 2*) que discurren por el poblado pero sin acarrear daño alguno en las edificaciones, circunstancia que desestimó su importancia en el seno de la comunidad, al punto de asumirlo como un evento aislado, de difícil repetición y de escasa complicidad del contexto geomorfológico (i.e. el material, el patrón de drenaje o la exigencia topográfica). Contrario al arraigado acervo cultural. Procesos de menor proporción, asociados entre otras causas, al mal manejo de las aguas superficiales, son hoy evidentes al centro y sur-oriente de San Juan, amenazan con involucrar las edificaciones y las vías.

El aparente rompimiento del, hasta ahora, dominante equilibrio natural de las laderas, sumado a la importancia de promover la expansión y el desarrollo seguro (i.e. bajo estadios controlados o mitigables de riesgo) de San Juan justifican y dan vida a este estudio (cobijado bajo el contrato Nº 749 de 2009 suscrito entre el FOPAE-DPAE y Gia Consultores Ltda.)

1.4 ANTECEDENTES

El área definida para el Centro Poblado de San Juan de Sumapaz, está ocupado por veintisiete (27) construcciones, destinadas en su mayoría a fines residenciales, y en menor proporción a usos educativos, comerciales, de salud y recreativos. Su crecimiento es apenas perceptible desde hace más de veinte años, (tal y como lo muestra la aérofoto IGAC C-2341_244 del año 1988), en la que su estructura actual se había completado y la migración de la población joven, fuerza de trabajo y desarrollo, en busca de mejores oportunidades de ingreso, ha marcado su lento crecimiento, que podría incentivarse con planes y proyectos de desarrollo, entre los que se incluye la construcción de la Alcaldía Local.

Y aún cuando San Juan parece ser un recinto seguro (por lo menos desde la perspectiva de la morfodinámica), según se desprende la ausencia de reportes de emergencias naturales previos al que motiva la realización de este estudio (véase el *Numeral 1.3*), y de las nimias manifestaciones en las poblaciones circundantes sintetizadas sólo en el diagnóstico técnico DI-4183, para la Finca La Esperanza en la Vereda Tunal Bajo, de fecha 24 de mayo del 2008 día en el que simultáneamente ocurrió un sismo, la susceptibilidad natural del medio, y la intervención incontrolada y sin miramientos de la población (revelada en la apertura de una vía hacia el cementerio) dejan entrever que las condiciones están dadas para la formación de nuevos focos de inestabilidad. Su condición es por tanto inaplazable.

En este sentido el artículo 137 (áreas rurales en amenaza por remoción en masa) del Decreto 190 de 2004 – Plan de Ordenamiento Territorial – POT, que establece que la Dirección de Prevención y Atención de Emergencia (DPAE) ampliará la zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa a las zonas rurales del Distrito Capital no cubiertas por el mapa actual, erige el puente para la actuación institucional y favorece la planificación en condiciones seguras.

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 la estabilidad global y local para condiciones estáticas y dinámicas.
- Evaluación y zonificación de la amenaza, de la vulnerabilidad y del riesgo.
- Comparación y selección de alternativas para el 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 las zonas en que se realizaría la exploración del subsuelo, fueron los más claros signos de la participación comunitaria. Participación que sólo mejoró su dinámica luego de que la DPAE retomara su rol protagónico como facilitadora.

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 en los términos de referencia. Bajo esta perspectiva, el contenido técnico, se estructura lógica y consecuentemente, y se enmarcan sus alcances dentro de las directrices de la institución y de las políticas distritales. Los pasos que conciernen la realización del estudio se exponen a continuación:

1.7.1 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Se refiere a la obtención de información secundaria: fotografías aéreas, cartografía y estudios previos de topografía, geología, geomorfología, geotecnia, hidrología, climatología, usos del suelo, sismología, etc., disponibles en entidades como el IGAC, la DPAE, el Ingeominas, la Secretaría de Salud Distrital, la Secretaría de Educación Distrital y la Alcaldía Local de Sumapaz, entre otras, así como el análisis y evaluación del estado de las 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.

No obstante, la escasa documentación de los planes de expansión en poder de las entidades, revelada en sus escuetos comunicados (agrupados en el *Anexo A*) pone en entredicho el análisis de la amenaza y riesgo futuros, tarea relevante dentro del estudio, y dilucidar, para el mediano plazo, la viabilidad de los proyectos mediatos (v.g. la Alcaldía Local). En adelante se precisan algunas de las referencias empleadas, ordenadas y discriminadas de manera alguna:

1.7.1.1 INFORMACIÓN ESPECÍFICA

- CONSORCIO SPD (2005). Parque Vecinal San Juan. IDRD. Bogotá D.C.
- CONSORCIO SUMAPAZ 2007 (2007). "Estudio de Suelos y Cimentaciones – Sede Administrativa Local de Sumapaz". Bogotá D.C.
- CONSORCIO SUMAPAZ 2008 (2008). "Construcción del Sistema de Acueducto para la Vereda de Mochuelo Alto Sector Lagunitas de la Localidad de Ciudad Bolívar y El Diseño y Construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Sistema de Alcantarillado de la Vereda de San Juan y el Diseño y Construcción de la Captación Nueva Para el Sistema de Acueducto para las Veredas de Animas Altas, Auras y Nazareth, Sobre la Quebrada Taque Grande en la Localidad de Sumapaz". Acueducto. Bogotá D.C.
- GEOCING LTDA (2005). "Estudios y Elaboración de Mapas de Riesgo Físico y Red de Comunicaciones para los Asentamientos de Betania, Nazareth y La Unión de la Localidad de Sumapaz". Secretaría de Gobierno. Bogotá D.C.
- HOYOS (2007). "Diseños Detallados, Presupuestos y Especificaciones Técnicas de las Obras de Mitigación de Riesgo en los Asentamientos Betania 1, Betania 2", La Unión 1 y La Unión 2 de la Localidad de Sumapaz en Bogotá D.C.". Dpae - Fopae. Bogotá D.C.
- 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.
- MONTENEGRO LIZARRALDE & CIA. LTDA. (1997). "Usme, Ciudad Bolívar y Sumapaz. Instrumentos de Manejo Administrativo y Urbanístico de las Áreas Rurales". Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Bogotá D.C.
- SARACHE (2007). "Asesorar Ajustar y Articular la Propuesta de los Planes de Mejoramiento Integral de los Centros Poblados Rurales San Juan y La Unión y los Asentamientos Menores Santo Domingo, Concepción, Capitolio y Granada de la Unidad de Planeamiento Rural del Rio Sumapaz que Viabilice la Formulación del Proyecto de Decreto de Reglamentación". Secretaría Distrital de Planeación. Bogotá D.C.

Son la muestra patente del seguimiento y que fungen como pilares fundamentales, junto con el conocimiento de los habitantes en la reconstrucción del proceso, y por consiguiente para aproximarse al reconocimiento de sus agentes condicionantes y desencadenantes; se subraya la participación del agua lluvia y de infiltración, representada 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 e identificar los agentes detonantes de los procesos morfodinámicos.

1.7.4 ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE Y TEMÁTICA

1.7.4.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

A fe de estructurar 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 1:750), 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 SURVEY PROJECT MANAGER 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 la orientación de la estratificación y la influencia de los planos de discontinuidad y de 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 1:25000 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

Esta labor se abordó mediante la ejecución de ocho (8) perforaciones mecánicas con avance de percusión y lavado y rotación, cuatro (4) líneas de refracción sísmica, diez (10) apiques, dos (2) trincheras, seis (6) columnas estratigráficas 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, acorde con el nivel de esfuerzos al que están sometidas 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 se 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. 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 suelo), condición estructural, propiedades físico-mecánicas, y drenaje. Esta tarea implica la convolución de los estudios básicos: geología -estratigrafía y estructural-, geomorfología -unidades morfológicas, morfométricas y procesos-, hidrogeología, investigación del subsuelo y 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 el centro poblado. 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 diferentes condiciones, variando los parámetros de resistencia entre los valores mínimos y máximos 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 constituye en 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 deducción del índice de vulnerabilidad física 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 edificación 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 alternativas para la 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 reducir el nivel de vulnerabilidad.

1.7.10 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El segundo informe técnico contiene ocho (8) capítulos, nueve (9) anexos y diez (10) 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	TOPOGRAFÍA
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 RIESGOS
CAPÍTULO 8	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

TABLA 1.3 ANEXOS

ANEXO	CONTENIDO
ANEXO A	CORRESPONDENCIA
ANEXO B	TOPOGRAFÍA
ANEXO C	GEOLOGÍA
ANEXO D	GEOTECNIA
ANEXO E	HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA
ANEXO F	AMENAZA
ANEXO G	VULNERABILIDAD
ANEXO H	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS
ANEXO I	PROGRAMA DE PARTICIPACIÓN COMUNITARIA

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, COBERTURA Y USO DEL SUELO
PLANO 7	ZONAS HOMOGÉNEAS
PLANO 8	AMENAZA - CONDICIÓN ACTUAL Y FUTURA
PLANO 9	VULNERABILIDAD – CONDICIÓN ACTUAL
PLANO 10	RIESGO POR FRM – CONDICIÓN ACTUAL Y FUTURA

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 identifica y registra: la morfometría de las laderas, los rastros de inestabilidad, las viviendas, las vías, y todo tipo de estructura física: postes, pasos peatonales, pozos, hidrantes, válvulas, cajas, paramentos, cercas y escaleras, entre otras. En adelante se describen las labores comprendidas para tal fin y se exponen los resultados.

2.1 ALCANCE

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 a partir del punto CODAZZI - 2010
- Captura de información topográfica en tres dimensiones: X (Este), Y (Norte), Z (Cota).
- Registro detallado del poblado y sus alrededores, involucra: 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 la inspección visual en campo de San Juan y una vez evaluada la información disponible, se procedió al 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, compuesto por la toma de secciones transversales y la captura de una nube de puntos.

2.2.1 TRABAJO DE CAMPO

El levantamiento topográfico involucró la captura de 8332 puntos, y tuvo una duración de nueve (9) días, marcados entre el 05 y el 13 de febrero de 2010. Se llevó a cabo en tres etapas. La primera encerró el

geoposicionamiento, y el diseño y tendido de la poligonal de cierre, para lo que se realizó el traslado de coordenadas y el amojonamiento de tres (3) vértices: GPS1, GPS2 Y GPS3, y se definieron los auxiliares para la radiación de los detalles. La segunda comprendió el espacio abierto; allí se tomó la información necesaria para la obtención de las 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 i.e: los canales, las vías, las construcciones, los postes de energía y alumbrados, los pozos, las estructuras de contención (muros gaviones y muros en concreto) y los árboles, entre otros; 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

San Juan de Sumapaz, se emplaza en el flanco occidental del Páramo de Sumapaz, accidente regional con dirección dominante Noreste-Suroeste enmarcado en la cordillera oriental, en jurisdicción político-administrativa de la localidad de Sumapaz, ya setenta Kilómetros al sur del perímetro urbano del Distrito Capital. El área de estudio se enmarca en un polígono, de 10.14 Ha, con elevaciones que varían desde los 3449.229 m.s.n.m. hasta los 3630.008 m.s.n.m, y cuyos vértices se listan en la *Tabla 2.1* y en la *Tabla 2.2*.

TABLA 2.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO

NORTE (M)	ESTE (M)
937404.2	973829.8
937485.1	973804.5
937538.0	973733.5
937539.4	973710.5
937526.2	973672.2
937437.5	973541.7
937400.7	973506.9
937344.5	973499.7

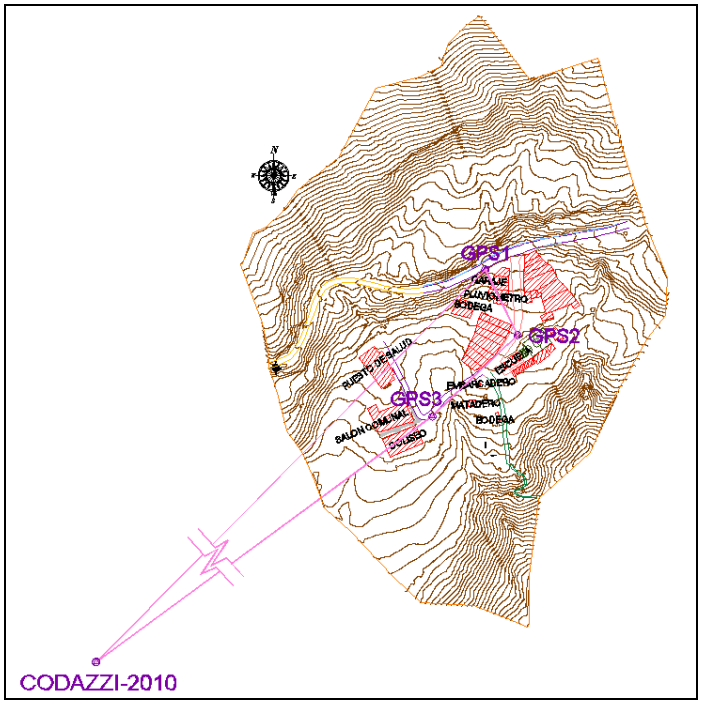
TABLA 2.2 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO (CONTINUACIÓN)

NORTE (M)	ESTE (M)
937170.2	973553.4
937084.0	973640.4
937091.8	973688.0
937193.9	973747.1
937214.0	973767.1
937284.6	973792.3
937362.1	973825.0
937404.2	973829.8

2.2.3 AMARRE DE COORDENADAS

El levantamiento está amarrado al sistema de posicionamiento global del IGAC. El punto de partida es la placa CODAZZI-2010, emplazada 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 la cota 2588.6 m.s.n.m.; de ella se hace el traslado de coordenadas a los puntos GPS1, GPS2 y GPS3, fincados en San Juan de Sumapaz, para el cálculo de las coordenadas, se emplea el software ASHTECH SOLUTION. La *Figura 2.1* ilustra la poligonal, y el *Anexo B.1* contiene la certificación del punto de amarre expedida por el IGAC.

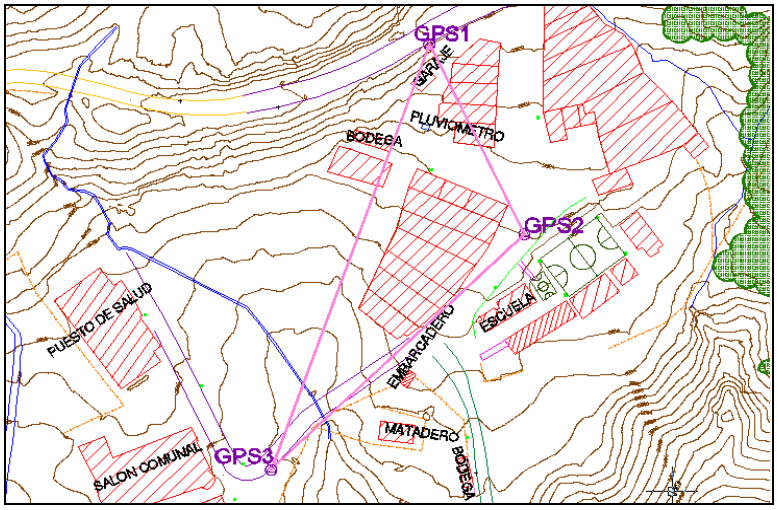
FIGURA 2.1 POLIGONAL DE AMARRE



2.2.4 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 tres (3) estaciones de referencia o deltas: el GPS1, el GPS2 y el GPS3, 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.

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 = -0.004 m.
- Error de cierre en coordenadas E =- 0.007 m.
- Error de cierre en ángulo = 4”
- Precisión = 1:40499

En el *Anexo B.3.1* se exhibe el cálculo de la poligonal de cierre.

2.2.6 AMOJONAMIENTO DE REFERENCIA

Se materializó con tres (3) placas fijadas y marcadas como GPS1, GPS2 y GPS3. El GPS1 cimentado en la esquina suroccidental del tope del cuerpo del muro de contención, que, confina al corredor vial Bogotá – La Unión, a 25 metros de la esquina suroccidental de la entrada al centro poblado. El GPS adosado en el bordillo sur de la vía principal del centro poblado, a ocho (8) metros al noreste de la entrada a la Escuela San Juan. Y el GPS3 está cerca al pc de la curva previa al encuentro con el Hospital Nazaret, en el bordillo a veinte (20) metros (en la horizontal) al suroccidente de la alcantarilla que encausa la Quebrada San Juan. Las

coordenadas y elevación de cada uno de los vértices materializados se ilustran en la *Tabla 2.3*, y su nivelación geométrica se plasma en el *Anexo B.2*.

TABLA 2.3 MOJONES MATERIALIZADOS EN CAMPO

MOJÓN	NORTE	ESTE	COTA
GPS 1	937391.618	973694.46	3532.055
GPS 2	937330.681	973724.257	3522.028
GPS 3	937254.960	973645.018	3512.498

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 (COMMUNICATION, REDUCTION AND CONVERSION PROGRAM) permitió procesar la 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 se llevó a cabo 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 papel importante las secciones transversales.

El proceso así desarrollado puede entenderse como una conceptualización de un submodelo para SIG, puesto que 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 las construcciones, 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. El *Anexo B.3* compila el listado de coordenadas del levantamiento topográfico.

2.3 EQUIPO

El equipo utilizado involucra una Estación Total TOPCON GTS-236W de precisión angular al segundo y alcances de lectura con prisma sencillo, capacidad para almacenar hasta 9000 puntos topográficos y lectura vertical cenital; dos (2) GPS TRIMBLE 4000 SSE de alta precisión, georeferenciados con la información

suministrada por el IGAC del vértice CODAZZI 2010, destinados al traslado de coordenadas; radios de onda corta, y un nivel automático. El post-proceso se llevó a cabo con en el software SURVEY PROJECT MANAGER. El equipo y los recursos empleados se relacionan en la *Tabla 2.4* y el certificado de calibración de la estación y del nivel se expone en el *Anexo B.4*.

TABLA 2.4 RELACIÓN DE EQUIPOS Y ELEMENTOS POR COMISIÓN

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
ESTACIÓN TOPCON GTS-236W	1
GPS TRIMBLE 4000 SSE	2
NIVEL AUTOMÁTICO	1
PRISMAS	3
RADIOS DE ONDA CORTA	4
VEHÍCULO	1

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

CAPÍTULO 3

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La evaluación geológica está orientada, principalmente, hacia la obtención del modelo geológico y estratigráfico, así como a la definición del marco geomorfológico, los que aunados permitan optimizar la exploración geotécnica e interpretar las condiciones de estabilidad, y facilitar el planteamiento de las recomendaciones de mitigación para los escenarios de riesgo. La generación y definición de los modelos geológicos tanto estratigráficos como estructurales, son derroteros principales para lograr diferenciar el comportamiento entre y de unidades litológicas 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 refracción sísmica), 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 los planos topográficos a escala 1:100000 y 1:25000, disponibles en el IGAC y en otras entidades. Cabe anotar que las escalas referidas son las más detalladas disponibles en la entidad.

- Reconocimiento general del terreno e identificación de las unidades de roca, y 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 geológicos regional y detallado. La cartografía 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 los cortes hechos para la construcción de las diferentes estructuras civiles.
- 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.

3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

Del extenso catálogo de documentos técnicos en manos de las entidades públicas (El Acueducto, la DPAE, la Dirección Administrativa de Planeación Distrital, etc), tal vez los de mayor trascendencia para diagramar el esquema preliminar del centro poblado son:

- Consorcio Sumapaz (2008), "Construcción del Sistema de Acueducto para la Vereda de Mochuelo Alto Sector Lagunitas de la localidad de Ciudad Bolívar, y el Diseño y Construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Sistema de Alcantarillado de la Vereda de San Juan y el Diseño y Construcción de la Captación Nueva para el Sistema de Acueducto para las Veredas de Animas Altas, Auras y Nazareth, Sobre la Quebrada Taque Grande en la Localidad de Sumapaz". Acueducto, Agua y alcantarillado de Bogotá. Bogotá D.C.

- Consorcio Sumapaz(2007). "Est5ucio de Suelos y Cimentaciones – Sede Administrativa Local de Sumapaz – Localidad de Sumapaz". Informe Final. Bogotá D.C.

- DAPD (2009) "Proyecto Borrador de Decreto UPR Sumapaz". DAPD, Unidad de Planeamiento Rural, Bogotá D.C.

- Geocing (2005), "Estudios y Elaboración de Mapas de Riesgo Físico y Red de Comunicaciones para los Asentamientos de Betania, Nazareth y la Unión de la Localidad de Sumapaz". Secretaría de Gobierno. Bogotá D.C.

- Hoyos E.O. (2007), "Diseños Detallados, Presupuestos y Especificaciones Técnicas de las Obras de Mitigación de Riesgo en los Asentamientos Betania 1, Betania 2, La Unión 1 y La Unión 2 de la Localidad de Sumapaz en Bogotá D.C.". FOPAE, Bogotá D.C.

- INGEOMINAS (1999), "Plancha 265 Icononzo - Esc 1:100.000". Bogotá D.C.
- Lesmes M. C. (2009), "Diagnóstico Técnico DI-4183, Finca La Esperanza, en La Vereda Tunal Bajo - Corregimiento de San Juan". FOPAE – DPAE. Bogotá D.C.

- Montenegro L.F. (1997), "Usme, Ciudad Bolívar, Sumapaz. Instrumentos de Manejo Administrativo y Urbanístico de las Áreas Rurales". DAPD, Santafé de Bogotá.

- Sarache E. (2007), "Asesorar, Ajustar y Articular la Propuesta de los Planes de Mejoramiento Integral de los Centros Poblados Rurales San Juan y La Unión y los Asentamientos Menores Santo Domingo, Concepción, Capitolio y Granada de la Unidad de Planeamiento Rural del Río Sumapaz que Viabilice la Formulación del Proyecto de Decreto de Reglamentación". DAPD, Bogotá D.C.

Los estudios consultados, que incluyen San Juan y regiones próximas a él, permiten reseñar, entre otras particularidades, las siguientes:

a) El plano geológico de Ingeominas (1999), escala 1: 100.000, destaca que el centro poblado se asienta sobre el extenso dominio de una ladera estructural, con buzamiento al W; y gradientes entre 6º y 16º, entallada en alternancias de arcillolitas y areniscas, de la formación Fusagasugá, reflejo ineludible de la influencia de la sistemática de fallas inversas, con rumbo NE-SW, integrada por las Fallas de Tasajares, El Chochal, El Pilar y al que hace parte el Sinclinal de San Juan, estructura última receptora del centro poblado del mismo nombre.

b) Los documentos de Hoyos (2007), Geocing (2005), el Consorcio Sumapaz (2008), Lesmes (2009) y Montenegro (1997) poca o ninguna contribución tienen. El contexto geológico regional en ningún caso incluye a San Juan, y los materiales constitutivos hacen parte bien de las formaciones Chipaque y Guadalupe, si se trata de Geocing (2008), o bien de la formación Guaduas en lo que atañe a Hoyos (2007). Mayor expectativa recaía en el Consorcio Sumapaz (2008), y en el Consorcio Sumapaz (2007), al final sólo parcialmente útiles; el primero es antagónico a su alcance, en el Consorcio Sumapaz (2008), responsable del diseño (incluido el estudio de suelos); empero el documento, la exploración del subsuelo, enmarcada por cinco a piques con profundidades modales de 1.50 m, es exigua y de manera alguna intrascendente; tan sólo se rescatan los resultados de las pruebas índice y dos cortes directos; y el segundo, aunque rico en exploración, constriñe la caracterización geomecánica (que no es otra cosa que un insuficiente número de ensayos de laboratorio) deja de lado el contexto geológico, específicamente el litoestratigráfico, en este sentido es incierto el origen de los materiales, v.g: si son suelos residuales, depósitos antrópicos o coluviales, y su diagramación en los registros de perforación.

c) Aunque Sarache (2007) fue baluarte para conocer e idealizar los aspectos culturales, sociales y ambientales más relevantes de San Juan, su contribución en el marco geosférico raya en lo inocuo; la cartografía es una copia de la de Ingeominas (1999).

De lo anterior es claro que los réditos de la recopilación y el análisis de la información son insustanciales para nutrir el Estudio de Riesgos. Las fuentes secundarias o son generales e inciertas o están destinadas a objetivos muy distintos al que le implica a GIA C. L.

3.3 GEOLOGÍA GENERAL

San Juan de Sumapaz se emplaza en las laderas orientales del cerro Loma Alta, accidente geográfico que hace parte del Páramo de Sumapaz, sobreyace en niveles de areniscas y lodolitas correlacionables con la Formación Fusagasugá, parcialmente cubiertos por mantos de suelo residual y depósitos coluviales. El

conjunto hace parte del flanco oriental del sinclinal de San Juan, matizado por la tectónica, inicialmente de compresión –que originó una serie de replegamientos–, seguidamente de cizalla, gobernada por fallamiento de tipo inverso (en el que sus sectores mas distales le sirven de límites), y finalmente de descompresión, en el que se abre paso el colapso gravitacional de grandes bloques, tal vez determinados por la fracturación precedente.

3.3.1 ESTRATIGRAFÍA

El Centro urbano de San Juan de Sumapaz está inmerso en la vertiente occidental de la cuenca del Río San Juan, definida parcialmente por el cuadrángulo remarcado en la *Tabla 3.1*. Es un ejemplo a escala de la compleja evolución del Páramo de Sumapaz subrayada por la concurrencia de las formaciones Fusagasugá, Seca, Guadalupe y Chipaque, de depósitos coluviales, de las fallas Tasajares, El Chochal y El Pilar, de sinclinales y anticlinales, y de un vasto número de lineamientos fotogeológicos.

La representación cartográfica expuesta en el *Plano 3* toma como referencia la cartografía de Ingeominas (1999), contrastada con la fotointerpretación 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. Simbolismo representado en el *Plano 3*.

TABLA 3.1 POLÍGONO DEL ÁREA DE ESTUDIO

NORTE (M)	ESTE (M)
937404.2	973829.8
937485.1	973804.5
937538.0	973733.5
937539.4	973710.5
937526.2	973672.2
937437.5	973541.7
937400.7	973506.9
937344.5	973499.7
937170.2	973553.4
937084.0	973640.4
937091.8	973688.0
937193.9	973747.1
937214.0	973767.1
937284.6	973792.3
937362.1	973825.0
937404.2	973829.8

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 3.2 VUELOS FOTOINTERPRETADOS

VUELO	FOTOGRAFÍAS	AÑO	ESCALA
C-2341	243, 244, 245, 246	1951	1:25000
C-606	288, 289, 290, 291	1988	1:20000

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

3.3.1.1 CRETÁCICO

Formación Chipaque (Ksch)

Se denomina de esta manera a la parte superior del Grupo Villeta; su nombre fue propuesto por Hubach (1931 y 1957) para referirse a la unidad litológica conformada por "esquistos piritosos, entre los que se intercalan bancos de cal, arenisca calosa y arenisca lajosa (dividida en bancos planos paralelos)". Es de carácter blando, armada por Lodolitas de color negro, dispuestas en capas delgadas, con estratificación plano paralela y ocasionalmente ondulosa y en algunos transectos con impresiones de amonitas; intercaladas con delgadas capas de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, micáceas, blancas y negras, con cemento silíceo, arreglo en capas medias a gruesas y estratificación interna ondulosa; y niveles de calizas fosiliferas. Suprayace a la Formación Une e infrayace al Grupo Guadalupe en el área de Cundinamarca y Boyacá; su espesor es difícil de estimar debido a su constitución blanda, a su fuerte replegamiento y a que está en su mayor parte cubierta por otras unidades, por depósitos cuaternarios o por masas vegetales; empero de sectores en los que ha sido posible su medición parcial, se cree que puede oscilar entre 105 m y 200 m.

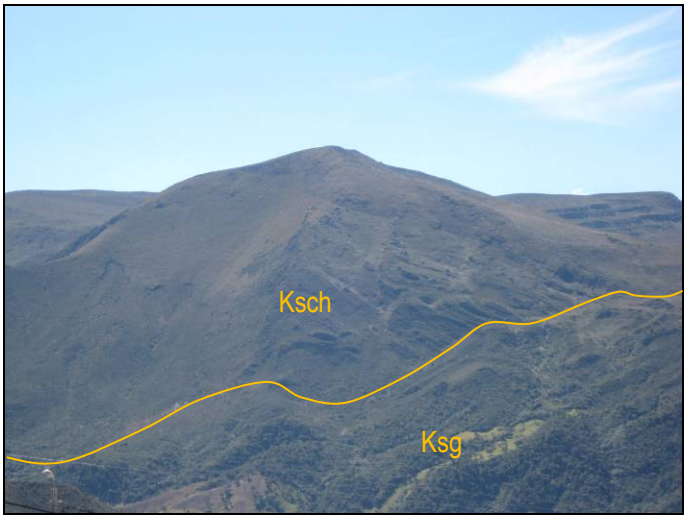


FOTO 3.1 LADERA DIBUJADA SOBRE SEDIMENTOS DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE, AL ESTE DE SAN JUAN DE SUMAPAZ.

Aflora en el extremo suroriental y esculpe el Alto San Mateo, la cuchilla Los Frailes y la loma Senda del Diablo, pertenecientes a la franja superior de la vertiente oriental – bloque yacente – de la Falla Tasajera, tal como se diagrama en el *Plano 3* y en la *Foto 3.1*. Su relieve es de tipo estructural enmarcado por anticlinales, sinclinales; las laderas y las contrapendientes estructurales son de poca extensión, replegadas y con orientaciones preferentes NE-SW, y están afectadas por fallas de cabalgamiento con el mismo rumbo.

Su drenaje es dendrítico y gesta valles estrechos y cañones en forma de V. En la base de los escarpes entre el Grupo Guadalupe y la Formación Chipaque se forman coluviones que se deslizan en función de la pendiente topográfica y de la inclinación de los estratos.

Los principales fenómenos de remoción en masa son: deslizamientos rotacionales simples y múltiples, y flujos lentos y rápidos, en mayor número adosados a los ríos y a las quebradas. Los agentes detonantes y contribuyentes recaen en las aguas de escorrentía y subsuperficial, la influencia estructural, i.e. fallas y lineamientos que demarcan sectores de debilidad, la consonancia de la superficie libre y del plano de estratificación, los cortes a lo largo de los corredores viales y la socavación de los cursos de agua.

Grupo Guadalupe (Ksg)

Con este nombre, propuesto por Hettner (1892) y redefinido por Hubach (1957) y Renzoni (1968), se reseña a un grupo de rocas sedimentarias de Edad Cretácico superior (Campaniano - Maastrichtiano Superior), representado por estratos y bancos de areniscas de grano fino a medio, con diferente grado de dureza, e intercalaciones de lutitas siliceas y láminas de arcillolitas. Debido a la marcada diferencia litológica al interior de la unidad, fue elevada a la categoría de Grupo y subdividida en 3 formaciones: la Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp) y Labor y Tierna (Ksglt). La primera dibuja relieves de tipo montañoso escarpado, está conformada por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, de color gris a crema, compactas, y en capas gruesas (hasta de 5m); hacia la franja superior las areniscas se tornan más finas, la estratificación es gruesa y plano paralela, y su grado de litificación es variable; el espesor de la unidad se estima entre 150 m y 200 m. (Julivert, 1961) y se le propone edad Maestrichtiano inferior; su ambiente de formación está ligado a una línea de costa o frente de playa, en la que por acción de las olas sólo es posible encontrar cuarzo, único mineral capaz de soportar el embate de alta energía de las olas al chocar contra la playa.

La segunda, Plaeners (Ksgp), delinea un relieve montañoso y escarpado; se define por areniscas cuarzosas de grano fino y compactas; de color gris a blanco, conformadas en capas gruesas (de hasta 5m), interestratificadas con niveles arcillosos de 0.10m a 0.15m de espesor, de coloración habana a amarilla y plasticidad media; hacia el tope las areniscas se tornan más arcillosas, la estratificación es gruesa y plano paralela, el grado de litificación es variable, la coloración oscila de blanca a pardo amarillento y el tamaño del grano es medio a grueso. El espesor de la unidad se estima entre 150 m. y 200 m. (Julivert, 1961) y se cree data del Maestrichtiano inferior, su ambiente de formación está ligado a una línea de fuera de costa, en la que la acción de las olas selecciona muy bien el tamaño del grano y sólo permanece el cuarzo.

Y la tercera de estas unidades: Labor y Tierna (Ksglt) difiere de las otras al estar constituida hacia la base por intercalaciones de bancos gruesos de areniscas con bancos menos gruesos de lodolitas finamente interestratificadas, que desaparecen hacia el techo y se reducen a delgadas capas de arcillolitas. Las areniscas son arcillosas, esporádicamente sin matriz; su color cambia de pardo amarillento a blanco, el grano es grueso a muy grueso, con porciones conglomeráticas y esporádicas apariciones de grano medio a fino. La selección es regular a mala; es frecuente la alternancia de bancos de arenisca con estratificación inclinada en cuñas y estratificación ondulosa lenticular en el tope de la formación. Las lodolitas reposan como interlaminaciones paralelas ondulosas o lenticulares de limo o arena muy fina o arcilla; su rasgo destacable la presencia de icnofósiles que entallan, principalmente, de los planos de estratificación y las capas de arcillolita que separan los bancos de arenisca. El espesor de esta unidad es de entre 50 m. y 100 m. (datos expuestos en el Léxico Estratigráfico Internacional, Julivert, 1968, para el sector de Usaquén) o de 40 metros acorde con las secciones levantadas por Pérez y Salazar (op. cit.) en los afloramientos de la carretera a Choachí; por la

proximidad de este último a la localidad se asume el reporte de Pérez y Salazar como el de mayor confiabilidad.

Se expone al sureste del centro poblado de San Juan, en la base del bloque yacente de la falla Tasajera, en el que mantiene contacto normal con la formación Chipaque, y disonante con la formación Fusagasugá. En este grupo esculpen el Alto Redondo y La Loma El Espejo (véase el *Plano 3*). Su relieve en líneas generales es de tipo estructural: las laderas y las contrapendientes estructurales son de gradientes moderados a altos, de poca extensión, angostas y bastante replegadas y con orientaciones preferentes NE-SW, si bien se encuentran algunos sinclinales y anticlinales, son escasos y poco continuos tanto longitudinal como lateralmente. La influencia tectónica está regida por algunos lineamientos y fallas inversas que mantienen la misma orientación de la unidad.

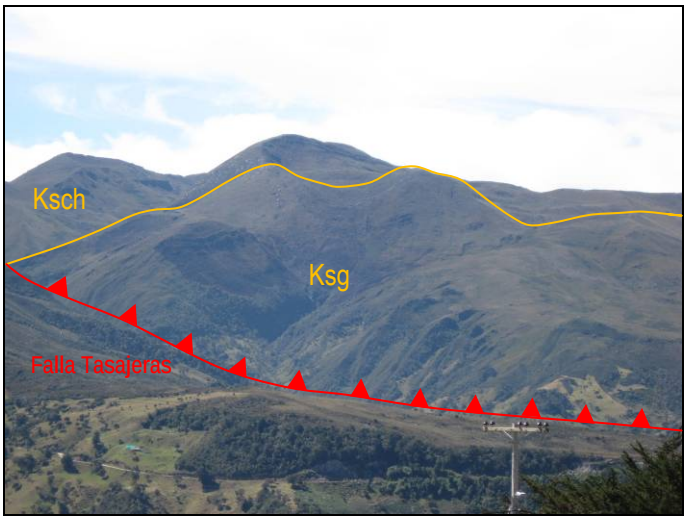


FOTO 3.2 CONTACTO ENTRE FORMACIÓN CHIPAQUE Y GRUPO GUADALUPE EN EL BLOQUE YACENTE DE LA FALLA TASAJERA, AL ESTE DE SAN JUAN DE SUMAPAZ .

3.3.1.2 TERCIARIO

Formación Fusagasugá (Pglf)

Sirve de gran recinto a San Juan de Sumapaz y a gran parte de la cuenca alta del Río Sumapaz, (véase el *Plano 3*). Su secuencia alterna lodolitas y areniscas feldespáticas y líticas, enfrentadas de forma discordante con la rocas de la Formación Guaduas. Se diferencia de la Formación Bogotá por ser más arenosa y por tener mayor espesor.

La parte inferior de la formación Fusagasugá está compuesta por una sucesión de arcillolitas grises y rojizas, en capas delgadas, ondulosas paralelas, intercaladas con areniscas cuarzo-feldespáticas, de grano fino a grueso, de color pardo rojizas, con cemento silíceo, en capas delgadas a gruesas, convergentes y ocasionalmente plano paralelas. La proporción de arcillolitas - areniscas es de 3:1. La parte media se encuentra cubierta pero por su morfología, se asume que está constituida por lodolitas y arcillolitas rojas, con esporádicas intercalaciones de areniscas de cuarzo, finas a medias, con cemento silíceo, en capas delgadas, plano paralelas y ocasionalmente medias a gruesas, convergentes. Y la parte superior, consta de una alternancia de arcillolitas rojas y grises y areniscas cuarzosas, de grano medio a grueso, pardas a rojizas, en

capas delgadas a gruesas, convergentes. El contacto inferior de las Lodolitas de Fusagasugá es erosivo y discordante: la base de la unidad descansa sobre diferentes niveles de la Formación Guaduas; el contacto superior es fallado y pone en contacto esta unidad con el Grupo Guadalupe, patente en la *Foto 3.1* y en la *Foto 3.2*.

El relieve que evoluciona sobre esta unidad es de dos tipos, uno es estructural; está representado por extensas laderas estructurales con inclinaciones leves a moderadas que en ningún caso sobrepasan los 30°, y por pequeñas contrapendientes con gradientes próximos a los 45° esculpidas principalmente en los niveles rocosos superior e inferior; y el otro es denudativo, está matizado por colinas onduladas de poca altura, dominantes en la parte media de la formación. El drenaje delinea un arreglo dendrítico en los cauces menores y al desembocar en cuerpos mayores cambia a formas subangulares, la distribución de los mismos es cuasiparalela.

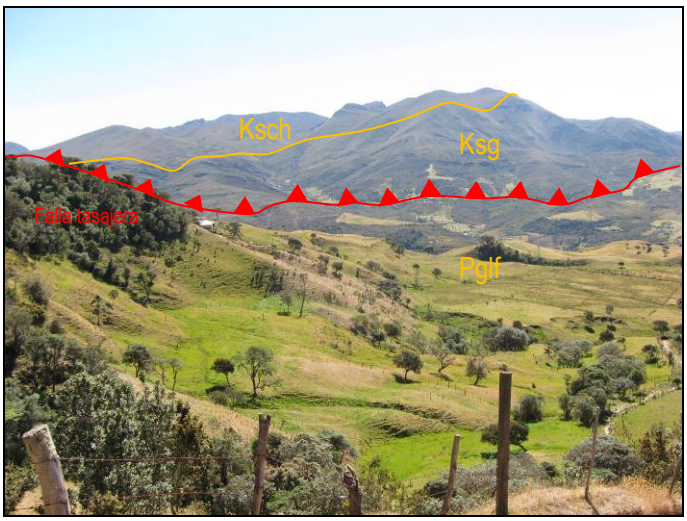


FOTO 3.3 CONTACTO FALLADO ENTRE FORMACIÓN FUSAGASUGÁ Y GRUPO GUADALUPE (AL FONDO PUEDE OBSERVARSE LA FORMACIÓN CHIPAQUE), AL ESTE DE SAN JUAN DE SUMAPAZ .

El marco tectónico está controlado por el trazo del sinclinal de San Juan, del que la formación es su parte central, fractura con orientación dominante N-S; y una falla de tipo inverso que discurre al Este de San Juan y pone en contacto a la formación Fusagasugá con el Grupo Guadalupe.

3.3.1.3 CUATERNARIO

Coluviones (Qco)

Son el 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 franjas 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 arcillas, limos y arcillas-arenosas de consistencia media a blanda (véase la *Foto 3.4*)



FOTO 3.4 DEPÓSITO COLUVIAL EN CERCANÍAS DE SAN JUAN DE SUMAPAZ .

3.3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

San Juan de Sumapaz, está inmerso en la vertiente oriental del Sinclinal de San Juan, fractura limitada por fallas de tipo inverso, al este la Tasajera y al oeste El Pilar y Paquillo. Su eje discurre a unos 4 km al occidente del centro poblado, su rumbo es N-S aunque exhibe al norte de San Juan un corto cabeceo al NE; su extensión longitudinal es cercana a los 30 Km (Ingeominas, 1999), y su flanco oriental alcanza los 12 Km, forjado en la formación Fusagasugá, mientras que el occidental no sobrepasa los 5 Km, lo que indica que el pliegue es asimétrico y su eje yace recostado hacia el oeste, y agrupa litologías relacionadas a las Formaciones Fusagasugá, Guaduas, Guadalupe y Chipaque pertenecientes a la Formación Fusagasugá; este es disonante en comparación al flanco occidental.

La falla Tasajera es quizá la fractura más importante tanto por su extensión como por su salto estratigráfico, que desaparece la Formación Guaduas y parte del Grupo Guadalupe. Su traza se marca a 3 km al sureste de San Juan de Sumapaz; su orientación es dominantemente NNE-SSW con algunas variaciones N-S. Es de tipo inverso, su longitud es cercana a los 43 Km (Ingeominas, 1999) y su componente cinemático es destral.

Las fallas El Pilar y Paquillo, dibujan rumbos semejantes a los del pliegue y la Falla Tasajera. La primera discurre a 10 Km al noroeste de la población, y su longitud aproximada es de 18 Km; la segunda se entalla a 9.5 Km de San Juan en la misma dirección, y su dilación no supera los 15 km (Ingeominas, 1999). Ambos sistemas ven interrumpido su transecto por algunos lineamientos de falla de poca extensión, que evolucionaron en dirección perpendicular (véase el *Plano 3*).

3.4 GEOLOGÍA LOCAL

Este numeral contiene la descripción de la geología, en el espacio exclusivo del Centro Poblado de San Juan de Sumapaz con énfasis en la estratigrafía y en el patrón estructural, forjados bajo los principios, directrices y preceptos 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 la más antigua, pero con la salvedad de que las unidades de roca de una misma formación pueden aparecer intercaladas en ciertas porciones del mapa Para dar cumplimiento a este cometido, se emplea la base cartográfica obtenida en el levantamiento topográfico, a escala 1:500, y se aúnan los trabajos de la exploración del subsuelo, que conjugan nueve (9) sondeos, diez (10) apiques, dos (2) trincheras, cinco (5) estaciones de control litológico y estructural, que implicaron la toma y análisis de ochenta y cuatro (84) 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 D.1*.

3.4.1 ESTRATIGRAFÍA

3.4.1.1 UNIDADES DE SUELO

Rellenos Antrópicos Mixtos ($Qarm_1$ y $Qram_2$)

Son cuerpos de moderada selección, arenosos o areno-gravosos empleados para la reconformación de los predios destinados al emplazamiento de las obras civiles, i.e el Centro de Convenciones, el hospital Nazareth, la Escuela y las canchas deportivas. Alberga guijos y gravas de areniscas líticas y cuarzosas de grano medio a fino, arcillolitas y arenas de grano fino a medio. La fracción gruesa oscila entre el 10% y el 20%en volumen de la masa de suelo. Son matriz soportados, su compacidad varía de media a densa; su humedad oscila de baja a media y su color es amarillo con trazas rojizas. Su espesor alcanza los dos (2) metros –en la explanación adyacente al polideportivo–; modelan espacios planos con áreas inferiores a 1500 m^2 (véase el *Plano 4* y la *Foto 3.5*). Esta unidad agrupa dos tipos de depósitos, diferenciados en su grado de compacidad; el primero ($Qram_1$), el más denso, integra el horizonte subyacente en el centro comunal, la escuela y la UPA, y el segundo ($Qram_2$) reconforma el espacio aledaño al muro de gaviones, yacente a la entrada del casco urbano (véase el *Plano 4*).

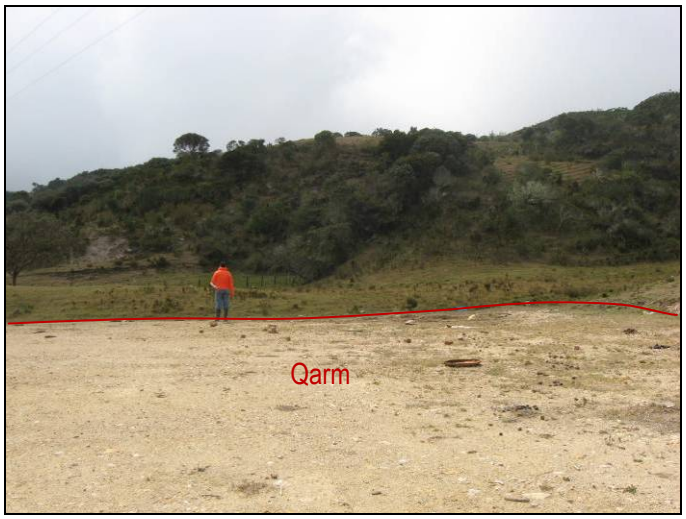


FOTO 3.5 RELLENO ANTRÓPICO MIXTO (QARM), CONTIGUO AL POLIDEPORTIVO.

Depósitos Coluviales (Qco)

Se acotan así a las acumulaciones traslocados de residuos sólidos, suelos residuales y fragmentos decimétricos de areniscas, lodolitas y limolitas. Son mal gradados y matriz soportados. Su humedad es baja, su compresibilidad y su plasticidad son medias, y su consistencia recorre los dominios de baja y media. Su geometría es alargada, con longitudes cercanas a los 50 metros, y sus espesores no superan los dos (2) metros (tal como lo confirman el sondeo S-6, el apique Ap-8 y las trincheras T-1 y T-2). Su origen obedece a la acción combinada de la gravedad y el agua sobre las pendientes conformadas por los horizontes de suelo residual, por delgados cuerpos de residuos sólidos y por rocas fracturadas; combinación que da lugar a fuertes torrentes y arrastre de los materiales desde las partes más altas. Reposan aguas abajo del casco urbano de San Juan, en el lote ocupado por el Botadero de Basuras y en el predio que colinda con la parte trasera (véase el *Plano 4*, la *Foto 3.6*, la *Foto 3.7* y la *Foto 3.8*).



FOTO 3.6 DEPÓSITO COLUVIAL (QCO1) EN LA MÁRGEN IZQUIERDA DE LA QUEBRADA SAN JUAN 1



FOTO 3.7 DEPÓSITO COLUVIAL EN LA ZONA DEL BOTADERO DE BASURAS (QCO2)



FOTO 3.8 DEPÓSITO COLUVIAL EN PREDIO COLINDANTE A LA ESCUELA(QCO3)

Suelos Residuales de las Limolitas de la Formación Fusagasuga (Qpglf – Lm-sr)

Son de composición limo-arenosa. Su color es habano con manchas amarillas a rojizas a marrón. Su humedad es media y su consistencia muta de media a firme, y su plasticidad es media. Su espesor varía desde los 5.0m. hasta los 7.0m. (confirmación otorgada por los sondeos S-7 y S-2, y en el apique Ap-3, véase el *Anexo D.1*); parcialmente están cubiertos por suelos orgánicos delgados (inferiores a los 0.70m.) no cartografiables a la escala de trabajo. Reposan al norte de la carretera Bogotá – La Unión en dos cuerpos amorfos, por receptores de sendos cuerpos de agua (véase el *Plano 4* y la *Foto 3.9*).



FOTO 3.9 SUELO RESIDUAL ARENOSO OBSERVADO EN EL APIQUE 8

Suelos Residuales de las Lodolitas de la Formación Fusagasuga (Pglf – Ld-sr)

Agrupa arcillas, arcillas-arenosas y limos-arenosos, pero con predominio de las dos primeras. Son de color amarrillo oscuro, matizados con manchas grises y violetas. Poseen baja plasticidad, su consistencia es media y eventualmente firme, y su humedad es dominantemente media. Albergan micas (muscovita), y algunos minerales ferrígenos asociados a la degradación de los feldespatos, las plagioclasas y los líticos. Su espesor es irregular y varía desde los cinco metros hasta los once metros, tal y como lo sugieren los sondeos S-1, S-6, S-4 y S-10, y las líneas de refracción sísmica LRS-1 y LRS-4 (véase el *Anexo D.1*). Es el recinto en el que se cimienta la casi totalidad del centro poblado. Albergan micas (véase el *Plano 4*, la *Foto 3.10*, la *Foto 3.11*, la *Foto 3.12* y la *Foto 3.13*).



FOTO 3.10 PREDIO SEMIPLANO MOLDEADO EN EL SUELO RESIDUAL ARCILLOSO



FOTO 3.11 PERFORACIÓN (S-3) REALIZADA SOBRE EL SUELO RESIDUAL ARCILLOSO, SE APRECIA QUE LAS VIVIENDAS ESTÁN CIMENTADAS EN ESTE MATERIAL



FOTO 3.12 REGISTRO ESTRATIGRÁFICO EN EL APIQUE 1 DOMINADO POR LOS HORIZONTES RESIDUALES ARCILLOSOS. OBSÉRVESE LA COLORACIÓN, HUMEDAD, Y FRACTURA DEL MATERIAL.

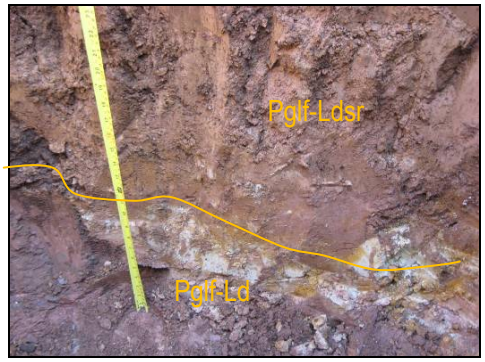


FOTO 3.13 CONTACTO ENTRE EL RESIDUAL Y LA LODOLITA EN EL APIQUE 6

3.4.1.2 UNIDADES DE ROCA

La secuencia rocosa está armada por alternancias de bancos de arcillolitas, limolitas y areniscas, parcialmente cubiertos por suelos residuales y rellenos antrópicos.

Formación Fusagasugá – Niveles Arcillosos (Pglf-Ld)

Son las unidades más representativas de la porción de la vertiente, aunque su exposición a tres (3) pequeñas franjas. Una se expone contigua al corredor vial San Juan - La Unión, al norte del predio 31 (véase el *Plano 4*

y las columnas C-1 y C-4 del *Anexo D.1*) en un tramo no mayor a 150 metros; y las otras dos labran parte del camino que conduce al cementerio (en el borde sur de San Juan de Sumapaz); tienen cerce de ocho (8) metros de espesor y están separados por un banco de limolita (Pglf-Lm). Son abigarradas, de color violeta con trazas habanas y ocres con algunas tonalidades verdosas; su resistencia es blanda (ISRM, 1981). Subyacen las espesas masas de suelo residual.

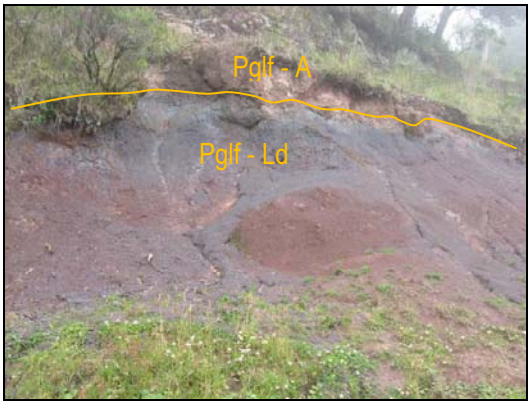


FOTO 3.14 CONTACTO ENTRE LA LODOLITA Y LA ARENISCA JUNTO A LA CARRETERA A LA UNIÓN Y A LA ENTRADA DE SAN JUAN.

Formación Fusagasugá – Niveles Limolitas (Pglf-Lm)

Entrelaza secuencias de limolitas grises con trazas rojizas, friables. Son de resistencia blanda a moderadamente dura (ISRM, 1981, citado por González de Vallejo y Otros, 2004); y yacen intercaladas con paquetes de lodolitas y areniscas. Las capas son continuas, sus espesores van desde los 4 metros hasta los 6 metros.

Son las unidades de menor extensión; afloran en dos franjas del polígono de estudio: el primero se extiende paralelo a la vía, entre éste y la divisoria de aguas, en la parte superior del casco urbano, sirve de basamento al corredor vial que conduce a la población de la Unión, y está delimitado tanto en su parte inferior como superior por paquetes de Areniscas (Pglf–A). El segundo, esculpe una ladera con pendiente cercana a los 40° que discurre en dirección W-E, 80 metros al sur de la población (véase el *Plano 4*). Sus contactos están regidos por sendos estratos de Lodolitas (Pglf–Ld).



FOTO 3.15 EXPRESIÓN MORFOLÓGICA DE LAS LIMOLITAS EN LA LADERA SUPERIOR DE LA VÍA A LA UNIÓN Y EN LA VECINDAD AL APIQUE 3



FOTO 3.16 VISTA DE LAS LADERAS AL SUR DE SAN JUAN, DESARROLLADAS EN LAS LIMOLITAS

Formación Fusagasugá – Niveles Arenosos (Pglf-A)

Son de color gris claro a oscuro; su tamaño de grano oscila entre fino y medio. Están compuestas por Cuarzo (40%), líticos (30%), y feldespatos (30%); su grado de litificación es alto, su resistencia es blanda (ISRM, 1981), son friables y su humedad es baja. Son granosoportadas y sus espesores superan los 5 metros. Integran dos grandes unidades: la Pglf-A1 y la Pglf-A2, solo diferenciadas por su posición estratigráfica. Se exponen al norte de San Juan y a lo largo de la carretera a la Unión (véase el *Plano 4*) unos pequeños escarpes a lo largo de la Qda San Juan 2, estos últimos pueden representar un cambio lateral de facies en los niveles de limolitas al sureste de San Juan.

El conjunto superior Pglf-Al suprayace un nivel de limolitas, y su contacto superior se da con las lodolitas y entalla el relieve inferior en proximidad a la divisoria de aguas (cinturón fuera del límite norte del área de interés). El conjunto inferior está inmerso entre las limolitas en las que descansa el nivel superior (Pglf-Al) y un estrato de lodolitas; las columnas C-1 y C-5 así lo justifican.

3.4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La información estructural, acopiada en el formato de levantamiento estructural, se condensa en figuras y anexos. Se aunaron en los afloramientos 84 registros estructurales, entre estratificaciones: 43, y diaclasas: 41 (véase el *Anexo C.2*). Con el universo muestral, se generaron diagramas de frecuencia, de rosa y estereogramas con la red equiangular, 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.

San Juan de Sumapaz reposa sobre pequeños pliegues que modelan alternancias de contrapendientes y laderas estructurales. La secuencia estratigráfica descansa con tres direcciones preferenciales: la primera, está ligada con la pendiente estructural, su azimut de buzamiento medio es de 139 y su inclinación de 10 grados, pero con variaciones locales que discurren desde los 05 grados hasta los 22 grados; la segunda y más relevante, remarca las contrapendientes estructurales, esculpidas al norte y sur de San Juan, su dominio es [170/05 – 320/17], y la tercera diagrama la transición entre los escenarios morfoestructurales anteriores, en este sentido su orientación no puede ser distinta ala horizontal, y se revela en el cinturón rocoso fincado entre la carretera a la Unión y el Hospital Nazareth (véase el *Plano 4*). Lo anterior remarca que San Juan de Sumapaz entrelaza tres dominios estructurales. Indistinto de la región que se trate, la estratificación es plana-rugosa a plana-suave, continua y cerrada. Los macizos están transgredidos por cuatro familias de diaclasas la D_1:[150/74 – 180/90], la D_2:[186/81 – 230/79], la D_3:[108/84 – 160/78] y la D_4:[08/85 -45/80]; ellas son planas-rugosas y planas-suaves cerradas o ligeramente abiertas, y de persistencia poco continua. El *Anexo C.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, sus expresiones son manifiestas a nivel regional y poco se aprecian en el contexto local. Son de dos tipos distintos, unos los más importantes asociados con los sistemas de fallas inverso o de cabalgamiento, exponen azimuts de rumbo NE-SW y ejercen un inherente control a las laderas de todo el sector (véase el *Plano 4*). Y los otros diagraman los rumbos NW-SE a W-E, sin (aparente) control estructural en las vertientes que rodean el centro poblado; si bien para ninguno de los dos arquetipos se encontraron evidencias cinemáticas para definirlos y catalogarlos como fallas dentro del contexto local, si fue posible encuadrarlos a una mayor escala con base en las expresiones morfológicas.

3.5 GEOMORFOLOGIA LOCAL

La estructuración y consolidación de San Juan de Sumapaz data de finales de los 40 o inicio de los 50, pero su vida como centro poblado sólo adquiere protagonismo con el despunte de los 70, desde ese momento ha crecido lentamente, al punto que los cambios son casi imperceptibles en los últimos veinte años hasta albergar hoy en día algo más de una veintena de viviendas, un centro educativo, un puesto de salud y un centro comunal. El sitio escogido por los colonos para erguir las construcciones hace parte de una extensión de terreno a media ladera ligeramente inclinada en una de las faldas que conforman la vertiente oriental de la cuchilla de Paquito. El paisaje ha sido delineado a partir a una forma de modelado, al estructural, este en conjunto y coadyuvado por agentes erosivos y meteorizantes – físicos y químicos, i.e: viento y agua – han dibujado y moldeado el relieve hasta la forma en que se aprecia hoy en día; A continuación se pormenoriza cada una de las unidades agrupadas dentro de la forma de modelado referida.

3.5.1 MORFOESTRUCTURAL (FORMAS)

Es sin lugar a dudas el principal y más relevante tipo de relieve. Su evolución está ligada a la dinámica estructural y tectónica, la que configura y rasga pliegues, fractura macizos, iza y hunde bloques, y bascula monolitos. El resultado de todos estos eventos queda representado por extensas contrapendientes estructurales (CE), por cortas laderas estructurales (LE), y en menor proporción por conspicuos escarpes (E).

En este orden de ideas y sin dejar de lado el contexto geomorfológico de relieve estructural original, según lo confirman las aerofotos de 1951, las formas pueden agruparse en dos unidades de ladera diferenciadas a partir de actividades antrópicas en: la no intervenida (NI) y la afectada por actividades antrópicas (I). Esta última sometida a procesos morfodinámicos que involucran, principalmente, algunos materiales de relleno, y los suelos residuales; 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 LADERA ESTRUCTURAL INTERVENIDA (LEI)

Se define así al conjunto de franjas en las que la estratificación va en el mismo sentido de la ladera. Su desarrollo se hace manifiesta sobre areniscas y lodolitas de la Formación Fusagasugá. Su exposición se da en forma de pequeños afloramientos circunscritos y coincidentes con los cortes a lo largo de la vía San Juan – La Unión. Sus pendientes oscilan entre los 30° y los 45°, i.e. muy empinadas (Van Zuidam, 1986). Su drenaje es modificado, y sus superficies expuestas favorecen la erosión en surcos y la aparición de perfiles de meteorización como se puede apreciar en el *Plano 5* y en la *Foto 3.17*. Los deslaves y los desprendimientos de roca son los procesos de inestabilidad dominantes, lo que los hace proclives a la acumulación de detritos en las franjas media y baja de los cortes (véase la *Foto 3.17*).



FOTO 3.17 CONTRAPENDIENTE ESTRUCTURAL EN LA QUE SE APRECIA EL CONTACTO CASI HORIZONTAL ENTRE EL NIVEL ARENOSO (SUPERIOR) Y EL ARCILLOSO (INFERIOR).

3.5.1.2 UNIDAD DE CONTRAPENDIENTE ESTRUCTURAL (CE)

3.5.1.2.1 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida (CENI)

Enmarca los escenarios circunscritos a algunas cuestas que labran las franjas altas de las laderas, al norte de San Juan (véase el *Plano 5* y la *Foto 3.18*). Su desarrollo se da en mayor medida sobre capas de lodolitas, limolitas y areniscas, en las que se dibujan cuestas moderadamente empinadas a muy empinadas Van Zuidam (1986). La actividad antrópica es escasa o está ausente, los estratos aún conservan su cobertura estratigráfica original, fincada en suelos orgánicos limosos a arcillosos y en un delgado nivel de suelos residuales; su drenaje es natural y es la cuna del nacimiento de la Qda San Juan 1. La erosión es difusa, y el

desarrollo del perfil de meteorización es más lento por la protección otorgada por el manto vegetal. Los procesos de remoción en masa relevantes son los deslaves, favorecidos por la inclinación de las unidades de roca.

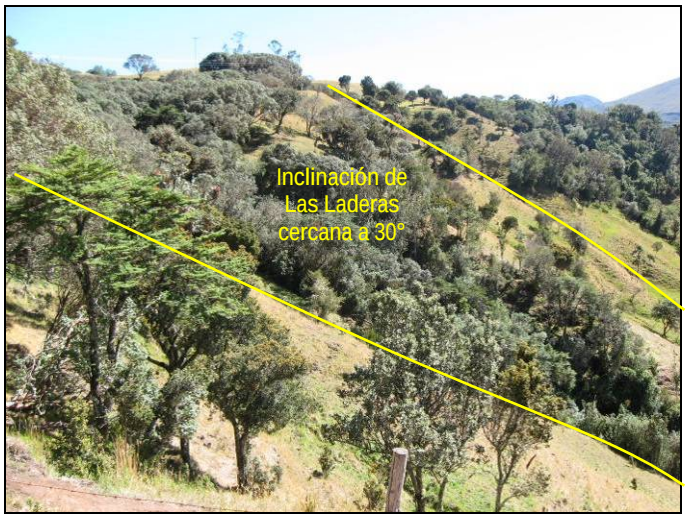


FOTO 3.18 CONTRAPENDIENTE ESTRUCTURAL NO INTERVENIDA EN CERCANÍAS A LA POBLACIÓN DE SAN JUAN DE SUMAPAZ.

3.5.1.2.2 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Escarpe en Roca(CENI – er)

Bajo esta denominación se agrupan las superficies naturales (laderas) en las que las unidades líticas duras se exponen; sus gradientes son mayores a 55° (Van Zuiden, 1986) y alcanzan la casi verticalidad (*Foto 3.19* y *Foto 3.20*), y las alturas son superiores a los dos (2) metros. Se erigen en la franja norte, en el extremo más distal del área de estudio –en cercanías a la divisoria de aguas-. Su génesis está asociada con actividad tectónica: fallamientos, y disección forjada por los cursos de agua, una y otra representada en saltos topográficos (véase el *Plano 5*). En líneas gruesas la cobertura vegetal es poca a nula en la cara frontal, lo que facilita y acelera tanto la erosión como la meteorización de la roca (degradación), y el drenaje es natural: el retrabajamiento antrópico es imperceptible, y los desprendimientos de bloques son el proceso de inestabilidad dominante.

3.5.1.2.3 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Terrazas en Suelo Residual(CENI – tsr)

Aglutina predios morfométricamente planos a ligeramente inclinados, en los que las pendientes van desde 5º hasta 7° (Van Zuidam, 1986); su principal exposición se da al norte del centro poblado, en una pequeña franja entre las unidades CENI y LEI, tal como se esquematiza en el *Plano 5*. Los drenajes conservan mantienen sus cursos naturales; la meteorización a dado lugar a suelos residuales arcillosos y limo-arenosos de más de 5m de espesor; la actividad antrópica es muy poca o aún no ha sido manifiesta; los procesos erosivos son difusos; y la cobertura vegetal es abundante, simbolizada por pastos, rastrojos, arbustos y árboles. Los procesos de inestabilidad brillan por su ausencia (véase la *Foto 3.21* y la *Foto 3.22*).

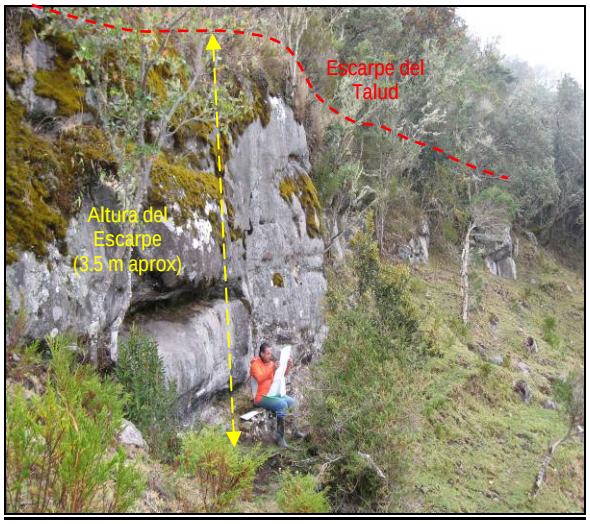


FOTO 3.19 ESCARPE EN ARENISCAS AL NORTE DE SAN JUAN DE SUMAPAZ



FOTO 3.20 ESCARPE EN EL CAUCE DE LA QUEBRADA SAN JUAN 2.





FOTO 3.21 - FOTO 3.22 TERRAZAS SOBRE SUELO RESIDUAL AL NORTE DEL CENTRO POBLADO

3.5.1.2.4 Subunidad Contrapendiente Estructural No Intervenida – Laderas en Suelo Residual(CENI – Isr)

Dibuja un pequeño sector contiguo al sendero que conduce al cementerio (actualmente abandonado por la construcción del carreteable vecino). Dibuja laderas muy empinadas con buzamientos cercanos a los 30º, talladas en suelos residuales arcillo-arenosos y limo-arenosos de no más de 2.0 metros de espesor, que han evolucionado a partir de estratos de lodolitas de la Formación Fusagasugá (véase el *Plano 5*). El drenaje no han sido modificado; los pastos, los arbustos y los árboles sirven de manto vegetal, la erosión es difusa y no hay evidencias de movimientos de remoción en masa (como se precisa en la *Foto 3.23*), aunque pueden tener cabida a futuro los flujos de tierra y los deslizamientos.



FOTO 3.23 LADERAS EN SUELO RESIDUAL

3.5.1.2.5 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Laderas en Suelo Residual(CEI – lsr)

Agrupa las cuestas al este y sur del casco urbano, gestadas en suelos residuales arcillo-arenosos y limo-arenosos, con inclinaciones entre 8.5° y 31°, que las clasifica como empinadas a muy empinadas (Van Zuidam, 1986). La acción antrópica está patente en el cambio de la cobertura vegetal original por cultivos y pastos, pero aún no recae en los drenajes. El perfil de meteorización alcanza los 9 metros de espesor; los surcos y el desgaste laminar reflejan la acción de la erosión y los procesos potenciales pueden involucrar los deslizamientos y flujos de tierra. La ubicación e imágenes de esta unidad son palpables en el *Plano 5*, en la *Foto 3.24* y en la *Foto 3.25*.



FOTO 3.24 LADERA EN SU ELO RESIDUAL AL SURESTE DE SAN JUAN



FOTO 3.25 MANIFESTACIONES DE LA SUBUNIDAD CEI-LSR AL SUROESTE DE SAN JUAN

3.5.1.2.6 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Taludes en Suelo Residual Traslocado (CEI – Isrt)

Representan los cuerpos de deslizamiento de actividad y desarrollo: dormidos (estabilizados) o potenciales incipientes (el FT-001EC y el DT-003PI; *Anexo C.4*) por aumento en las presiones de poros o por reblandecimiento; las masas tocan los dos (2) metros de espesor, y comprometen el perfil de suelo residual que suprayacen las lodolitas de la Formación Fusagasugá (véase el *Plano 5*). Su pendiente es cercana a los 30° y se clasifican como muy empinadas (Van Zuidam, 1986). El drenaje es modificado, los surcos son la principal muestra de erosión y la cobertura vegetal, a manera de parches, está conformada exclusivamente por pastos y rastrojos, como se plasma en la *Foto 3.26*.



FOTO 3.26 EJEMPLIFICACIÓN DE SUBUNIDAD: CEI-LRST. DESLIZAMIENTO AL SUR DE LA ESCUELA DE SAN JUAN (FT-001EC)

3.5.1.2.7 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Taludes de Relleno Antrópico Traslocado (CEI – trat)

Cobija el deslizamiento al sur del centro poblado en la vertiente oriental de la Qda San Juan1, la masa movida aglutina tanto suelos residuales como residuos sólidos (codificado como DT-002A, véase el *Anexo C.4*); la inclinación de la ladera oscila entre los 23º y los 32°, valores que la definen según Van Zuidam (1986) como empinada a muy empinada. Su drenaje ha sido modificado y el cuerpo es labrado (en superficie) por erosión en surcos, y flujos locales de tierra. Es en esencia la unidad más dinámica (expresión ligada a la temporalidad): su apariencia es función inequívoca de la actividad del movimiento, explícitamente activo-avanzado (*Plano 6*, *Foto 3.27* y *Foto 3.28*).

3.5.1.2.8 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Escarpe Antrópico en Roca (CEI – ear)

Envuelve el talud de corte contiguo al carreteable (abierto recientemente), que conduce hacia el cementerio y las veredas al sur de San Juan. Está tallada en esculpe areniscas, limolitas y lodolitas de la Formación Fusagasugá (*Plano 6*), materiales en los que se recrean taludes de más de sesenta grados (clasificadas como muy empinadas: Van Zuidam, 1986). Su drenaje es modificado; su cobertura vegetal ha desaparecido y ha

dado paso a la erosión diferencial y difusa, que puede evolucionar a surcos y cárcavas, y los desprendimientos de roca son los procesos morfodinámicos dominantes (véase la *Foto 3.29* y la *Foto 3.30*).

De igual manera dentro de esta unidad puede incorporarse un pequeño terraplén adosado al extremo sur del Polideportivo y que difiere con los otros escarpes, en que ha evolucionado en un relleno antrópico, así las cosas su clasificación será CEl-ea.



FOTO 3.27 DT-002A. DESLIZAMIENTO ACTIVO



FOTO 3.28 TOPE ALTA DEL CUERPO TRASLOCADO DT-002A.





FOTO 3.29 - FOTO 3.30 ESCARPE EN UNO DE LOS MÁRGENES DE LA VÍA QUE CONDUCEN AL CEMENTERIO

3.5.1.2.9 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Relleno Antrópico para Desarrollo Urbanístico (CEl – eradu)

Es el resultado de la reconformación de los predios, mediante cortes y rellenos antrópicos, con el propósito de la construcción de las edificaciones destinadas al servicio común como lo son la Escuela, la UPA, el Polideportivo y el Centro de Convenciones (véase el *Plano 5*). Envuelve rellenos antrópicos conformados, exclusivamente areno-gravosos. Su morfometría es plana a ligeramente inclinada (Van Zuidam, 1986): las

pendientes en ningún caso superan los cinco grados (*Foto 3.31*). El drenaje natural ha sido reemplazado por cunetas en tierra; la erosión diferencial es el único proceso denudativo con participación.



FOTO 3.31 PREDIO RECONFORMADO EN EL QUE SE YERGUE EL CENTRO DE CONVENCIONES Y EL POLIDEPORTIVO

3.5.1.2.10 Subunidades Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Suelo Residual para Desarrollo Urbanístico (CEI – esrdu)

Son los escenarios en los que se retiró la capa orgánica y se nivela el suelo residual para permitir la construcción o ampliación de las edificaciones y del amoblamiento urbano; es en sensu stricto el casco urbano de San Juan – véase el *Plano 5*, la *Foto 3.32* y la *Foto 3.33*). Su topografía ha sido modificada y en la actualidad sectores ligeramente inclinados a inclinados (Van Zuidam, 1986) en los que el buzamiento oscila entre los 3º y los 6.5º. Los cursos de agua han sido alterados y canalizados, o encausados con obras de arte: cunetas y alcantarillas. Al igual que en la unidad previa los fenómenos de remoción en masa están ausentes.





FOTO 3.32 - FOTO 3.33 DIVERSOS SECTORES EN LOS QUE EL SUELO RESIDUAL HA SIDO RECONFORMADO PARA SERVIR DE CIMENTACIÓN DE LAS UNIDADES RESIDENCIALES

3.5.1.2.11 Subunidad Contrapendiente Estructural Intervenida – Explanación en Relleno Antrópico para Desarrollo Urbanístico (CEI – eradu)

Delimita un pequeño terraplén adosado al extremo sur del Polideportivo, su pendiente es superior a los 60°; está esculpido en un relleno antrópico conformado y debido a su poca extensión tanto longitudinal como vertical los procesos erosivos y de remoción en masa son irrelevantes.

3.5.2 PROCESOS MORFODINÁMICOS

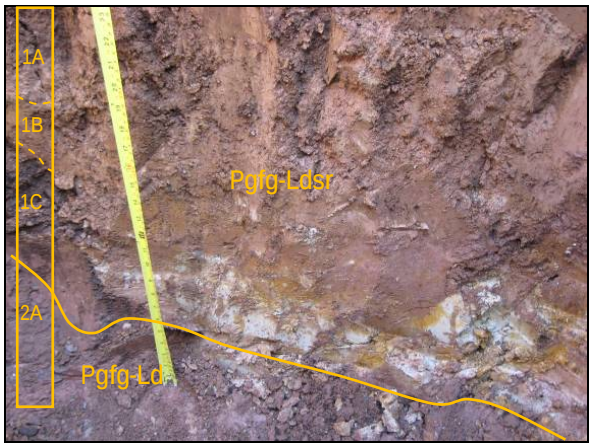
La identificación de las unidades geomorfológicas contribuye en gran medida al entendimiento de los procesos de degradación del terreno. Cada unidad posee rasgos morfológicos particulares que dependen, entre otros, de los procesos denudativos que en ella se desarrollan. Tales rasgos permiten dilucidar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

Las laderas naturales no sólo se transfiguraron en su morfometría, por la disposición de cortes y rellenos y por la adecuación de la plataforma urbanística, 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, reptamientos, 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 las fracturas de las rocas y de la superficie del terreno, desde los sitios de mayor a menor gradiente hidráulico. En el macizo rocoso se lleva a cabo el lavado constante de ciertos minerales, 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, limo-arenosa o arcillo-arenosa, según sea la unidad de roca dominante, estos niveles alcanzan espesores diversos: desde los pocos centímetros (*Foto 3.34*) hasta la decena de metros tal como se revela bajo el centro poblado. Los suelos residuales son escenario preferencial para la formación de deslizamientos traslacionales, y flujos de tierra gestados toda vez que se saturaren o se reblandezcan, en especial durante las temporadas de lluvia.



Perfil de Meteorización de Deer & Patton	
1A	Suelo Orgánico
1B	Suelo Residual Maduro
1C	Suelo Saprolítico
2A	Saprolito
2B	Roca Meteorizada
2C	Roca Sana

FOTO 3.34 PERFIL DE METEORIZACIÓN EN ARCILLOLITAS – EN LA BASE ROCA FRESCA (LODOLITA) AL TOPE SUELO ARCILLOSO –

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 bajo 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 acontece cuando la precipitación rebasa la capacidad de infiltración, suscitándose un excedente de agua en la superficie del terreno que fluye ladera abajo a lo largo de la máxima pendiente. Los surcos bosquejan tajos hasta de 0.10 m, son el resultado combinado de la acción del impacto de la lluvia sobre el suelo, y del flujo de agua generado en la dirección principal de la pendiente, estos moldean inicialmente microsurcos de erosión que paulatinamente se transforman en surcos de erosión, dentro de los que se transporta el material. Al profundizarse y ampliarse los surcos se transfiguran en canales de arrastre, (microcanales) esto se conoce como erosión en cárcavas.

De este amplio abanico de expresiones son dominantes el flujo superficial, los surcos y las cárcavas, (sólo concentrados en la vía al cementerio) sus huellas reposan a lo largo y ancho de todas las subunidades geomorfológicas, como resultado del retrabajamiento de las lluvias (véase el *Plano 5*). De este conjunto los de mayor trascendencia son el flujo superficial (o erosión difusa): dominante indistintamente en el centro poblado y el carcavamiento en el camino que comunica San Juan con el cementerio, su expresión es propia del reforjamiento incontrolado del drenaje en el sendero (*Plano 5*); el zanjón alcanza profundidades hasta de 0.3 m y anchos que alcanzan los pocos centímetros, la forma es en V y las paredes alcanzan gradientes cercanos a los 70° y están talladas en los paquetes de arenisca, limolitas y lodolitas.

3.5.2.3 PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM)

Aunque poseen poca representativa en la evolución geomorfológica local, sus expresiones hoy por hoy son de amplia trascendencia puesto que ponen de manifiesto la susceptibilidad de las laderas: el DT-002A (véase la *Foto 3.35*) y el DT-003PI, y flujo de tierras: el FT-001EC (véase la *Foto 3.36*). El DT-002A posee actividad y desarrollo avanzado, su profundidad alcanza los 2m, su ancho en la parte media es de 16m y su longitud es de 50 metros; el DT-003PI es potencial incipiente, su espesor es 1.7 m aproximadamente, su ancho medio no es mayor a los 7.5 metros y su perfil longitudinal alcanza los 15 metros. Los escarpes principales tocan los dos metros (en el DT-002A) y los 0.2 metros (DT-003PI) respectivamente; las masas movidas cubren 0.04 Ha, en lo que atañe al primero, y 0.005 Ha si responde al segundo. Su movilización es facilitada por la pendiente de las laderas (superior o cercana a los ángulos de fricción básico de los suelos y del lleno), la erosión hídrica, la alta precipitación, los vertimientos y la sobrecarga de llenos.

De los dos movimientos el de mayor envergadura (o trascendencia) es el DT-002A, su superficie de deslizamiento reposa en el contacto suelo residual-roca, su distancia de viaje es de unos pocos metros. El movimiento se produjo hace 2 años aproximadamente, momento en el que se hicieron manifiestas las grietas en la parte alta de la ladera; su evolución aunque paulatina tuvo su momento álgido en la época invernal de ese año, cuando finalmente se produce el movimiento. La morfología y la morfometría del escarpe, ha permanecido casi invariable en los dos últimos años pero el cuerpo de deslizamiento ha sido retrabajado por la erosión en surcos y por flujos locales de tierra. Sin embargo se hace imprescindible su monitoreo puesto que la apertura del carreteable al cementerio y el vertimiento incontrolado del material de corte en él, han dado lugar a su reactivación.

El proceso (FT-001EC), es estabilizado colapsado, gestado en los suelos residuales arcilloso, y detonado por la alta precipitación. Su profundidad alcanza los dos metros, su longitud supera los 50m, su ancho medio es de 15 metros, la altura del escarpe principal es cercana a los dos metros y su carácter es retrogresivo. Si bien hoy día sus efectos son inocuos a futuro puede comprometer la permanencia del centro educativo, máxime si llega a movilizarse el espesor completo del suelo residual, cercano a los 9.0 metros.



FOTO 3.35 DESLIZAMIENTO EN LA ZONA DE BOTADERO DE BASURAS



FOTO 3.36 DESLIZAMIENTO AL SUR DE LA ESCUELA

El *Plano 5* integra la ubicación espacial de los tres procesos y el *Anexo C.4* resalta detalles adicionales de sus 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 LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

La morfodinámica en el centro urbano de San Juan de Sumapaz está representada por procesos erosivos en surcos y algunos eventos de remoción en masa contiguos al casco urbano, estos últimos relacionados con la saturación por aguas de escorrentía y subsuperficial de estratos permeables del suelo y macizo los cuales al alcanzar su mayor grado de humedad se movilizan. Las fotografías aéreas consultadas exponen laderas estables, con algunas evidencias de problemas de remoción en masa que no involucran las construcciones existentes (véase fotografías C606 288-291 y C2341 243-246).

A fe de realizar la descripción de los antecedentes históricos de los procesos denudativos en la región se recurrió a la consulta e interpretación de aerofotos de los años 1951, 1988 y 2007 registro condensado en la *Tabla 3.2* y en el *Anexo C.3*. La tarea se centró en la ubicación y diagramación de los procesos erosivos y de remoción en masa, y en la esquematización de la acción humana en las laderas y a través de los cultivos, el uso pecuario, la extracción de materiales, los cortes de taludes para construcción de viviendas, etc (véase el *Anexo C.3*).

3.6.1 AÑO 1951 (VUELO IGAC C-606 FOTOGRAFIAS 288-291)

San Juan de Sumapaz, está emplazado en la vertiente oriental de la cuenca del río Sumapaz, matizada y retrabajada por dos sistemas de lineamientos; el primero es esencialmente NNE-SSW, controla buena parte de la red de drenaje; y el segundo discurre en dirección SW-NE, y paralelo al eje del sinclinal de San Juan y a las fallas inversas Tasajera, Taquillo y El Pilar, controla el contacto tanto de las formaciones cretácicas como terciarias (véase la *Figura 3.1*) y en manera alguna parecen tener inferencia en las las expresiones morfodinámicas.

La expansión de la frontera urbana es incipiente: la mayor concentración de edificaciones delinean la huella oriental del centro poblado aunque despuntan esporádicas viviendas asentadas en derredor, pero distanciadas entre si. La red vial está diagramada por dos carreteables, uno con punto terminal en la perfiferia de San Juan, y otro bordea la divisoria de aguas al norte del centro poblado; es (posiblemente) el corredor Bogotá – La Unión. Su geometría es limitada y su estructura de pavimento es en afirmado. Las redes de servicios son intrascendentes: las líneas de conducción de aguas o de energía eléctrica carecen de participación.

La morfología es suave y ondulada, forjada en secuencias de rocas blandas (i.e. limolitas y arcillolitas) intercaladas con algunos bancos arenosos; unas y otras cubiertas por suelos residuales y cuerpos coluviales de formas elongadas. Las mayores alturas se remarcan (al sureste de la toma fotográfica) al interior de la vertiente izquierda del Río Sumapaz: los escarpes rocosos y los chevrones, que en conjunto diagraman una sucesión de laderas estructurales, dan vida allí al paisaje. Las unidades blandas entallan los relieves central y occidental, espacios en los que tienen asiento las pocas edificaciones, y que servirán de recinto a San Juan.

Los cuerpos inestables de mayor envergadura recorren la vertiente sur del rio Sumapaz (por lo menos para la foto 290); dentro de ellos los flujos de tierra y los deslizamientos traslacionales son los procesos dominantes; se circunscriben unos y otros incubados por la influencia tectónica, por el tipo de material (i.e. suelos residuales y macizos blandos fracturados), por las fuertes pendientes, y por la alta pluviosidad (reflejada en la saturación de las masas). Este abanico, remarca el potencial inherente de la cuenca del Sumapaz a movilizarse.

El patrón de drenaje en las partes altas de la cuenca es dendrítico y en las desembocaduras se transforma en paralelo y subparalelo (rasgo último dominante a lo largo de la cuenca del Río Sumapaz). Las corrientes de agua son de tipo antecedente, ligadas a las líneas de mayor pendiente y a los lineamientos de falla. En la *Figura 3.1* se esquematizan las apreciaciones reseñadas en los párrafos anteriores.

3.6.2 AÑO 1988 (VUELO IGAC C-2341 FOTOGRAFIAS 243-246)

La afectación antrópica continúa su avance, manifiesta en el asentamiento de algunas edificaciones aisladas diseminadas en las vertientes, de los signos del centro poblado: la escuela, el hospital Nazareth, el salón comunal y la mayor parte de viviendas; de la red vial, representada por el corredor Usme – La Unión y algunas vías locales aisladas, de la práctica de actividades agrícolas y ganaderas. Los procesos de inestabilidad conservan su diagramación morfológica (i.e. su forma exterior) pero no así su actividad; el mayor número, aún los más próximos a San Juan, es o inactivo o dormido; los cuerpos inestables exhiben un aumento en las manchas arbustivas y arbóreas; los escarpes, antaño sometidos a erosión pluvial, descubren tapizados vegetales; y las patas de deslizamiento, contario a la influencia de algunos cuerpos de agua,

reposan inmutables. Tampoco hay aparición de nuevos fenómenos, ni facilitados o provocados por la consolidación del poblado, i.e. San Juan, (véase la *Figura 3.2*).

Las componentes estructurales (lineamientos, planos de estratificación y diaclasas) conservan sus rasgos, y por espacios adquieren realce, gracias al imperturbable estado del paisaje, reflejo del inocuo papel transformador del hombre, sólo circunscrito en el casco poblado y en su inmediata vecindad. El drenaje delinea los primeros signos de intervención, acentuados (en tres cursos de agua) al oriente y al occidente de San Juan, y en el mismo centro poblado; los cauces o han perdido parte de su recorrido o se han redireccionado (con o sin estructuras: canales en tierra, alcantarillas, etc.) particularidades patentes en las quebradas San Juan 1 y San Juan 2, mutación parcialmente provocada por la implantación del corredor vial: Bogotá – La Unión.

La morfología tanto regional como local no presenta mayores cambios, lo que indica que la región no es afectada por fenómenos de Remoción en Masa, no se evidencian movimientos que afecten el corregimiento o las vías: Las Geoformas son de tipo colinado con suaves pendientes y disectadas por cursos de agua que forman pequeños valles en forma de "V".

3.6.3 (FOTO SATELITAL GOOGLE EARTH - 2007)

Ilustra la conformación morfológica y el ensanchamiento de la frontera urbana. La actividad antrópica concentra en la consolidación de San Juan y en las actividades agrícolas. Se revelan los primeros indicios de incubación del deslizamiento en la vertiente izquierda de la quebrada San Juan 1 (así lo ratifica el cambio de coloración allí). Las superficies libres (laderas) se erigen en materiales duros y blandos (arcillosos), y algunos materiales antropogénicos; hipótesis fijada en cambios tonales en la imagen; su forma en planta y sus perfiles son rectilíneos, y su orientación es NE/NW, pero con buzamiento fuerte (superior a priori a los treinta grados). La cubierta superficial es escasa, sólo tienen asiento algunos parches de pasto y rastrojo bajo, y están enmarcadas las planicies en la que descansa el centro poblado y la que servirá de albergue a la futura alcaldía, las zonas urbanizadas, taludes y vías.

La morfología del área que circunda el centro poblado es irregular, matizada entre taludes de altura diversa, un pequeño circuito vial, y manchas vegetales. Los procesos de inestabilidad carecen de expresión en superficie, si subsisten yacen en mascarados, al igual que los procesos de erosión. La red de drenaje exhibe trazos permanentes y algunos estacionales, todo sintetizado en la *Figura 3.3*.

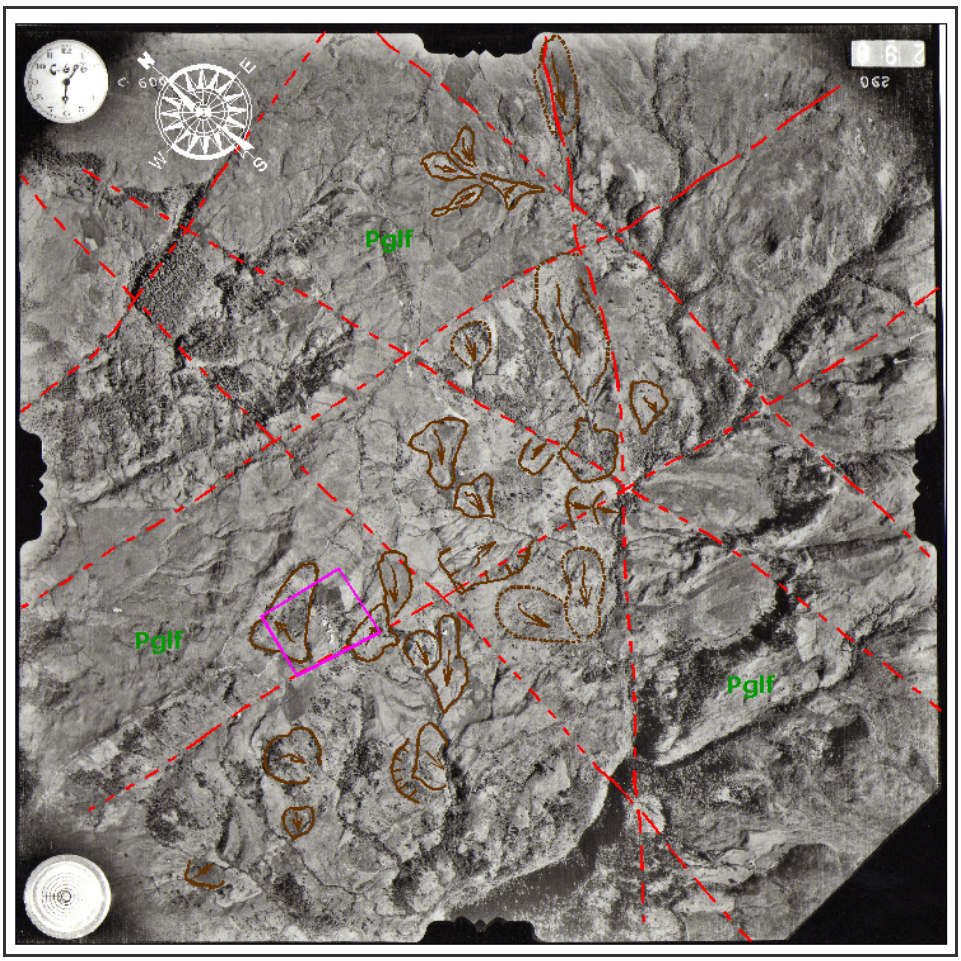
3.7 HIDROGEOLOGÍA

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. Las unidades cuaternarias se comportan como acuíferos puesto que los paquetes sedimentarios que las componen tienen las características petrofísicas pertinentes para poder no sólo almacenar sino también trasmitir agua con facilidad. El agua almacenada 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,

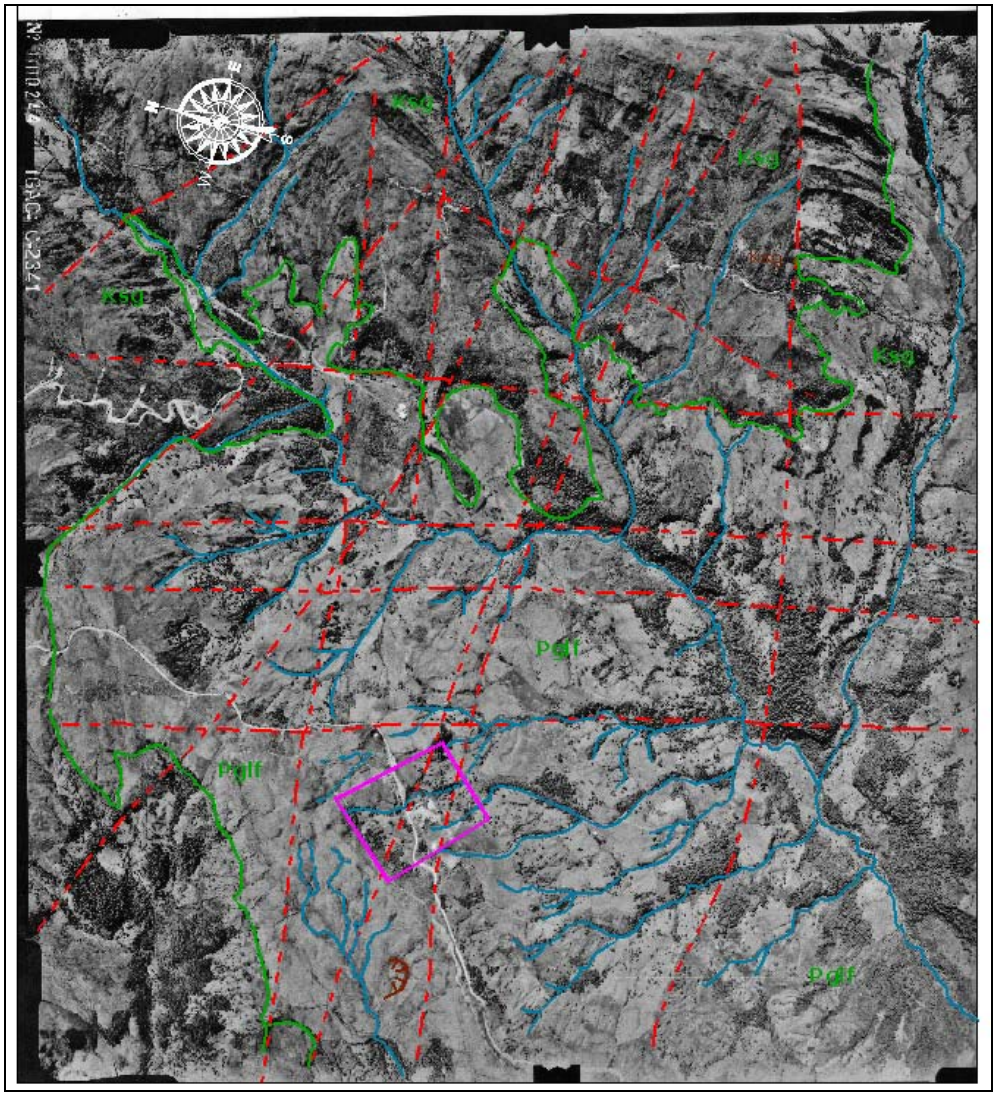
estos tipos de acuíferos son denominados freáticos. La facilidad de flujo de agua en estos depósitos está condicionada al tipo de matriz, así las cosas, la de mejor respuesta es la de conformación arenosa mientras que la de tipo arcilloso impide el transito normal del liquido.

FIGURA 3.1 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-606_290 (AÑO 1951)



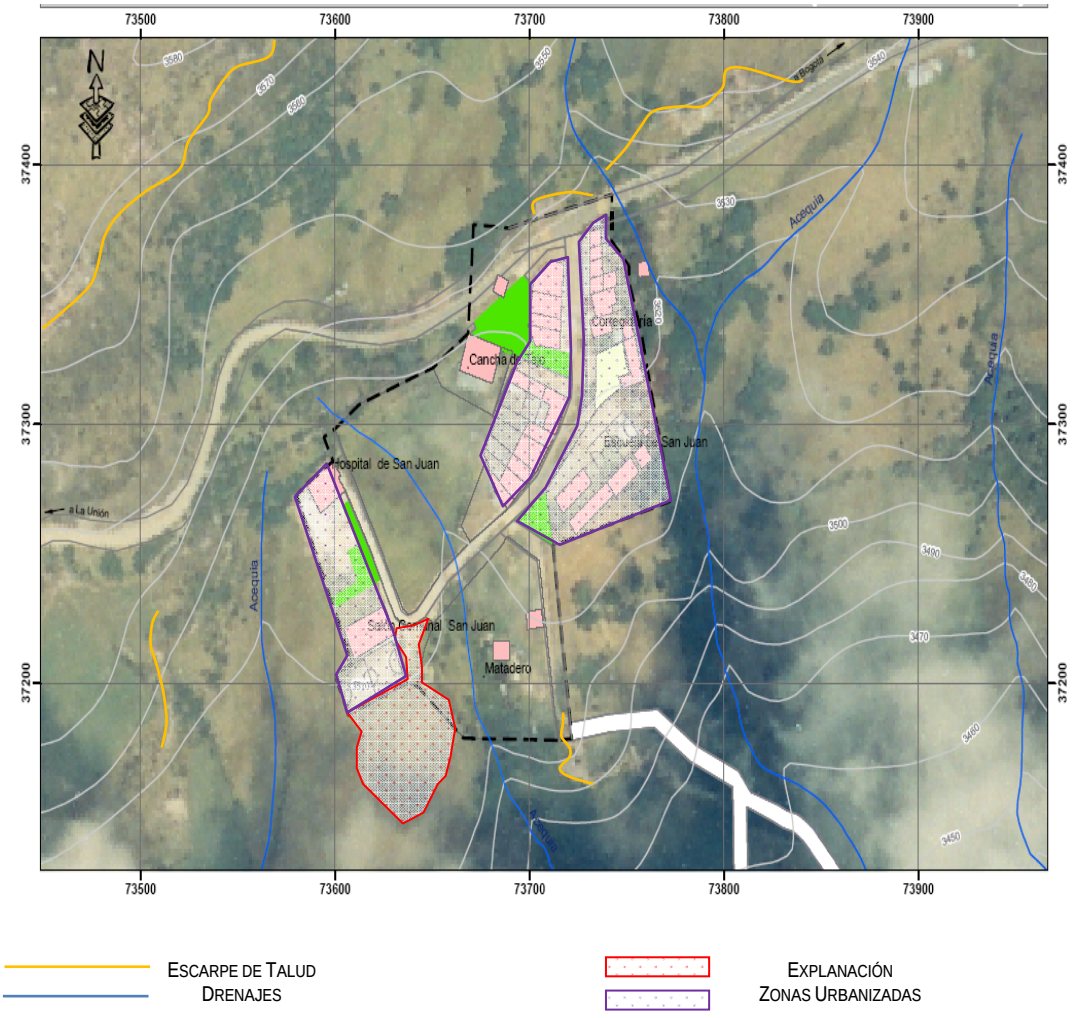
CONVENCIONES					
UNIDADES GEOLÓGICAS		GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLOGÍA		CONVENCIONES GENERALES	
	CONTACTO LITOLÓGICO	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL			ÁREA DE ESTUDIO
Pglf	FORMACIÓN FUSAGASUGÁ		LINEAMIENTO FOTOGEOLÓGICO		DRENAJES
Ksg	GRUPO GUADALUPE		BUZAMIENTO FOTOGEOLÓGICO		
		GEOMORFOLOGÍA			
			ESCARPES DE DESLIZAMIENTO		
			CUERPO DEL DESLIZAMIENTO		
			CUERPO DEL DESLIZAMIENTO INFERIDO		
			DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO		

FIGURA 3.2 FOTOINTERPRETACIÓN DEL VUELO C-2341-244 (AÑO 1988)



CONVENCIONES					
UNIDADES GEOLÓGICAS		GEOLOGÍA ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLOGÍA		CONVENCIONES GENERALES	
	CONTACTO LITOLÓGICO	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL			ÁREA DE ESTUDIO
Pglf	FORMACIÓN FUSAGASUGÁ		LINEAMIENTO FOTOGEOLÓGICO		DRENAJES
Ksg	GRUPO GUADALUPE		BUZAMIENTO FOTOGEOLÓGICO		
		GEOMORFOLOGÍA			
			ESCARPES DE DESLIZAMIENTO		
			CUERPO DEL DESLIZAMIENTO		
			CUERPO DEL DESLIZAMIENTO INFERIDO		
			DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO		

FIGURA 3.3 IMAGEN GOOGLE EARTH (TOMADO DE SARACHE, 2007)



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 o de la tabla de agua. 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 Fusagasugá 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 el área de estudio se expresa en la *Tabla 3.3*.

TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

NOMBRE		DESCRIPCIÓN	COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO
DEPÓSITO COLUVIAL (QCO),		ES MATRIZ SOPORTADO, SU MATRIZ ES ARCILLOSA Y VARÍA A ARCILLO-ARENOSA Y ARCILLO LIMOSA, ES DE CONSISTENCIA MEDIA Y CONSOLIDACIÓN ALTA. LA PERMEABILIDAD ES BAJA. SU ESPESOR ALCANZA LOS 2.0 METROS.	ACUÍFERO FREÁTICO.
RELLENOS ANTRÓPICOS MIXTOS QARM		INVOLUCRAN PARTÍCULAS HASTA TAMAÑO BLOQUES DE ARENISCAS Y LODOLITAS, ESCOMBROS Y RESIDUOS SÓLIDOS EMBEBIDOS EN MATRIZ ARCILLOSA, ARCILLO-ARENOSA Y LIMO-ARENOSA DE CONSISTENCIA MEDIA. SUS ESPESORES OSCILAN ENTRE EL METRO Y LOS 11 METROS.	ACUITARDOS
FORMACIÓN FUSAGASUGÁ	PGLF-LM Y PGLF-LD	ESTÁ CONSTITUIDO POR UNA SERIE DE ARCILLOSITAS Y LODOLITAS ABIGARRADAS DE APARIENCIA BIOTURBADA QUE ALTERNAN CON ARENISCAS DE CEMENTO ARCILLOSO. SU ESPESOR PUEDE ALCANZAR LOS 20 METROS.	ACUITARDOS
	PGLF-A	ARENISCAS DE COLOR BLANCO, BLANCO AMARILLENTO Y AMARILLO, CEMENTO SILÍCEO, OCASIONALMENTE MATRIZ ARCILLOSA DE HASTA 10 METROS DE ESPESOR, ENTRE ESTOS SUBNIVELES YACEN LODOLITAS DE COLOR VIOLETA.	ACUÍFEROS CONFINADOS O SEMICONFINADOS

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 hallan dos cauces en formación el primero al este del casco urbano y el segundo en la franja central de San Juan, de igual manera existe evidencias de un tercero en la franja trasera del centro de convenciones y del polideportivo 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 en los dos piezómetros instalados en el sondeo P-1 y P-4, que fungen como freatímetros. 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) en el norte descarga en la vía, mientras que en la zona llana o central vierte al sur del centro poblado y estos a su vez al río Sumapaz. El movimiento del agua, se hace a favor de la pendiente topográfica en sentido N y S para todo el sector parcialmente condicionado por la memoria hidrogeológica de los antiguos cursos de agua extintos en la década de los 80 (véase el numeral 3.6.1). Los nichos de recarga del acuífero involucran las fracciones más altas de las vertientes y los de descarga los más bajos y planos o donde se presente un cambio notorio en la disminución del gradiente del terreno. Prueba de ello es la recurrente infiltración en los apiques A-1, A-5, A-7.

Todo lo anterior permite suponer que los estados de trabajo extremos máximos de los depósitos cuaternarios: involucran su saturación, es decir, el nivel freático en superficie, en especial en las masas coluviales y en los horizontes residuales, en los que se cimienta la totalidad de las viviendas, en especial los de los corredores sur y norte, y los receptores del paleodrenaje; y los mínimos bien a 2 metros bajo la línea actual del terreno (véanse las perforaciones P-1, P-2 y P-3, *Anexo D.1*) o bien secos. Este último escenario deducido de la respuesta en las trincheras T-1, T-2, las columnas estratigráficas C-1 a C-5, y en los apiques A-2, A-3, A-4, A-6, A-8 A-9 y A-10, en los que la tabla de agua está ausente.

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 el análisis y recopilación de información secundaria, es decir en estudios regionales y locales que involucran el distrito capital. La Información consolidada y consultada para el desarrollo de este apartado es presentada 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. Sin embargo es perentorio recalcar que si bien San Juan de Sumapaz hace parte de la localidad de Sumapaz, la que a su vez es parte integral del Distrito Capital, la catalogaría como zona de Amenaza Media, no se debe desestimar su cercanía a poblaciones como Une, Quetame, Cabrera, Cáqueza, Fómeque y Junín, las cuales han sido reseñadas como zona de amenaza sísmica Alta – Región 6 – con Aa 0.25g para el mismo periodo de recurrencia

TABLA 3.4 FUENTES SISMOGÉNICAS PARA AMENAZA SÍSMICA EN BOGOTÁ Y SU ZONA RURAL

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)

Este estudio aunque fue realizado para el Distrito Capital solo se restringe a la zona urbana y no allega información alguna de la fracción rural, bajo este panorama, no fue considerado para definir parámetros sísmicos y espectros de respuesta, es decir aceleraciones pico efectiva Ag y la mínima Ad, períodos de retorno y de recurrencia.

3.8.2 CUALIFICACIÓN DE AMENAZA LOCAL

Con base en los estudios mencionados para San Juan de Sumapaz 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 tanto al noroeste como al suroriente del poblado como son las Fallas de: Sumapaz, Pilar, Paquillo, Florida, Tasajeras, Chochal, y Nazareth, circunscritas en un radio de acción hasta de 15 Km alrededor de la población, 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 0.20g. 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 San Juan de Sumapaz 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*.

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:

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

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 coluviales (Qco): 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 residuos sólidos (plásticos, zapatos, etc) en una matriz limosa a arcillosa. Los espesores típicos trasiegan desde los 6 metros hasta los 10 metros.

- Suelos residuales (Pglf-Lsr y Pglf-Ldsr): 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 Fusagasuga: está marcada por secuencias de areniscas, limolitas y arcillolitas spuestas en capas gruesas a 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
QCO QRAM PGLF-LSR Y PGLF-LDSR	D	1.20 A 1.60 (SE ADOPTA 1.40)	1.2	1.8	0.349 G	0.518 G	0.22 G
PGLF	B	0.7 - 1.10 (SE ADOPTA 1.0)	1.1	1.6	0.24 G	0.460 G	0.16 G

REFERENCIAS

- CONSORCIO SUMAPAZ (2008), "CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO PARA LA VEREDA DE MOCHUELO ALTO SECTOR LAGUNITAS DE LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR, Y EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA EL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE LA VEREDA DE SAN JUAN Y EL DISEÑO

Y CONSTRUCCIÓN DE LA CAPTACIÓN NUEVA PARA EL SISTEMA DE ACUEDUCTO PARA LAS VEREDAS DE ANIMAS ALTAS, AURAS Y NAZARETH, SOBRE LA QUEBRADA TAQUE GRANDE EN LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ". ACUEDUCTO, AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ. BOGOTÁ D.C.

- DAPD (2009) "PROYECTO BORRADOR DE DECRETO UPR SUMAPAZ". DAPD, UNIDAD DE PLANEAMIENTO RURAL, BOGOTÁ D.C.
- GEOCING (2005), "ESTUDIOS Y ELABORACIÓN DE MAPAS DE RIESGO FÍSICO Y RED DE COMUNICACIONES PARA LOS ASENTAMIENTOS DE BETANIA, NAZARETH Y LA UNIÓN DE LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ". SECRETARÍA DE GOBIERNO. BOGOTÁ D.C.
- HOYOS E.O. (2007), "DISEÑOS DETALLADOS, PRESUPUESTOS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS OBRAS DE MITIGACIÓN DE RIESGO EN LOS ASENTAMIENTOS BETANIA 1, BETANIA 2, LA UNIÓN 1 Y LA UNIÓN 2 DE LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ EN BOGOTÁ D.C.". FOPAE, BOGOTÁ D.C.
- INGEOMINAS (1999), "PLANCHA 265 ICONONZO - ESC 1:100.000". BOGOTÁ D.C.
- LESMES M. C. (2009), "DIAGNÓSTICO TÉCNICO DI-4183, FINCA LA ESPERANZA, EN LA VEREDA TUNAL BAJO - CORREGIMIENTO DE SAN JUAN". FOPAE – DPAE. BOGOTÁ D.C.
- MONTENEGRO L.F. (1997), "USME, CIUDAD BOLÍVAR, SUMAPAZ. INSTRUMENTOS DE MANEJO ADMINISTRATIVO Y URBANÍSTICO DE LAS ÁREAS RURALES". DAPD, SANTAFÉ DE BOGOTÁ.
- SARACHE E. (2007), "ASESORAR, AJUSTAR Y ARTICULAR LA PROPUESTA DE LOS PLANES DE MEJORAMIENTO INTEGRAL DE LOS CENTROS POBLADOS RURALES SAN JUAN Y LA UNIÓN Y LOS ASENTAMIENTOS MENORES SANTO DOMINGO, CONCEPCIÓN, CAPITOLIO Y GRANADA DE LA UNIDAD DE PLANEAMIENTO RURAL DEL RÍO SUMAPAZ QUE VIABILICE LA FORMULACIÓN DEL PROYECTO DE DECRETO DE REGLAMENTACIÓN". DAPD, BOGOTÁ D.C.
- DE PORTA J.(1974) "LÉXICO ESTRATIGRÁFICO". CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE. PARÍS.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO LUIS I Y OTROS (2004). "INGENIERÍA GEOLÓGICA". PEARSON PRENTICE HALL. MADRID.
- 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.
- SECRETARÍA DISTRITAL DE PLANEACIÓN. (2009), "DOCUMENTO TÉCNICO DE SOPORTE, UNIDAD DE PLANEAMIENTO RURAL – UPR DEL RÍO SUMAPAZ DEL DISTRITO CAPITAL".
- 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.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO GEOTÉCNICO

CAPÍTULO 4

ESTUDIO GEOTÉCNICO

En este capítulo se develan los resultados de las actividades de campo, laboratorio y oficina conducentes a la caracterización geomecánica de los materiales térreos, naturales y antrópicos, circunscritos en el centro Poblado de San Juan de Sumapaz. 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 MÉTODO DE TRABAJO

Tan compleja, soterrada y amplia como la imagen hoy día revelada por las laderas circunscritas en el corregimiento, 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 en la respuesta actual y futura de las unidades de ladera y de las edificaciones (i.e de las viviendas); b) dilucidar el papel del macizo rocoso y de los planos de discontinuidad, específicamente de la estratificación, en la gestación de las masas inestables; c) validar o replantear el patrón estructural y su función en la porción de la vertiente (receptora del núcleo urbano), es decir en el comportamiento de los materiales y en la estabilidad de las superficies libres; las fuentes secundarias, específicamente Ingeominas (1999), dejan entrever que San Juan descansa en una sucesión de laderas estructurales, premisa que para GIA se antoja incompleta o errática más aún por la marcada tectónica, artífice del replegamiento que se encumbra en la vertiente norte de la cuenca del río Sumapaz (espacio en el que se funda la población de San Juan); d) deducir la posición probable 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 retrogresión del movimiento de la microcuenca de la quebrada San Juan 1; y e) 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 San Juan de Sumapaz descansa en una ladera estructural, sin traslocaciones pero de bajo ángulo de buzamiento (inferior a los quince grados) y con algunos cambios en el azimut de buzamiento.

Premisa desprendida de los registros estructurales en los cortes viales, posteriormente redireccionada al de secuencias replegadas.

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 tanto métodos directos como indirectos, silogismo ligado a la generosa extensión del poblado (unidad en estudio) y a su irregular morfología (de viso escalonado), 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, v.g la refracción sísmica o los sondeos geoeléctricos, en principio subvalorados puesto que las expresiones morfométricas son escarpadas y, las variaciones estructurales se idealizaban inocuas, poco a poco ganaron espacio como la mejor herramienta técnica (y económica) para descifrar la geometría del cuaternario, específicamente de los suelos residuales: las masas dominantes en San Juan. 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.

4.1.2 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

4.1.2.1 MÉTODOS DIRECTOS

La exploración se abordó 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 prospección de las exposiciones del macizo rocoso (afloramientos); el levantamiento de datos estructurales y la ejecución de ocho (8) apiques, diseminados a lo largo y ancho del poblado.

La segunda fase está basada en cinco (5) sondeos mecánicos, apodados como S-1, S-3, S-5, S-6 y S-10, bien con avances de percusión y lavado o bien con rotación, dispuestos a lo largo de los ejes de las masas de mayor potencial de movilización y en el cuerpo del deslizamiento principal, dos (2) apiques, designados como AP-9 y AP-10, dos (2) trincheras (la T-1 y la T-2) y cuatro (4) columnas estratigráficas: la C-1, la C-2, la C-3 y la C-4. Sus intenciones: relacionar las capas guías (las de arenisca), 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 participación de planos o sistemas de falla - en especial las de rumbo-, hipótesis fincada en los cambios morfológicos, 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 piezómetros abiertos (uno en el sondeo S-1 y otro en la perforación S-6). 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 los cortes viales, específicamente los paquetes de arenisca, y de la primera perforación (entendidos éstos como condiciones y elementos de borde).

Aunque este análisis, en principio, desprecia los saltos, probables pero jamás comprobados, provenientes de las fracturas, v.g las fallas de rumbo, tiene sus mayores réditos en la interpretación final, puesto que se desestima cualquier corrección estratigráfica importante. Beneficio recibido indirectamente, gracias a las

tenues variaciones en el buzamiento del plano de estratificación: los traslapos en los extremos de las perforaciones y la consistencia estadística de los registros estructurales así lo confirman.

Las columnas se destinan y entrelazan 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 efectúan perpendicular al rumbo de los estratos y en arreglo de oriente a occidente (condicionamiento fijado por el escenario de trabajo), de manera que se tuviera la mayor cobertura del orden litológico y el mejor barrido del patrón estructural.

Las trincheras se circunscriben en dos de los cuerpos de deslizamiento, una (1) en el de la margen oriental de la quebrada San Juan 1, el DT-001A (véase el *Plano 4*) y una (1) en el del enfrentado de la otra vertiente del mismo cuerpo de agua. Y los apiques recorren el espacio baldío al oriente y al occidente del polideportivo.

Los levantamientos estructurales, resumidos en 86 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 y oriente del centro poblado (pero contiguos a la carretera San Juan-La Unión) y en el curso de la quebrada San Juan 2 (*Plano 4*). 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 tercera etapa encierra la participación de tres sondeos mecánicos (bautizados como: S-2, S-4 y S-7) y cuatro líneas de refracción sísmica. Con estos elementos se pretendió completar los puntos ciegos dejados por los trabajos de las etapas previas, completar la secuencia estratigráfica alrededor de las edificaciones y en los amplios espacios entre las perforaciones , y redondear la investigación sobre el modelo estructural, i.e las fracturas. Se destinó casi exclusivamente a los cuerpos antrópicos que diagraman el relieve al sur y al norte del casco urbano, y al norte; uno y otro de trascendencia por su repercusión para los planes de expansión futura.

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 pero replegada; y con disposiciones multicapa, configuradas en bancos espesos de lodolitas (de hasta 20 m de talle, baste con señalar la Pglf-Ld) y niveles, poco más o menos, de 8 m de areniscas (v.g la Pglf-A1 y la Pglf-A2) de grano medio, y Limolitas (Pglf-Lm), irregularmente cubiertos por rellenos antrópicos delgados (inferiores a los dos metros), y suelos residuales arcillosos, arcillo-arenosos y limo-arenosos que alcanzan, medida cuenta, los 11 m de espesor, diseminados a lo largo y ancho del centro poblado (véase el *Plano 4*).

Los paquetes lodolíticos (o arcillolíticos) recorren la secuencia a profundidades variables, y carecen de responsabilidad en la generación de los deslizamientos, debido a la configuración geométrica del patrón estructural, en clara contraposición o indiferente con la de la ladera, al estado de esfuerzos presente, a la generosa protección vegetal, y a la nimia influencia antrópica, concentrada, por ahora, en la gestación de botaderos a lo largo de la quebrada San Juan 1.

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 a los reportes en las perforaciones, específicamente en los

piezómetros abiertos, S-1 y S-6, fijados entre los 1.20 metros y los 1.80 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 napa freática.

En el *Plano 4* se ilustra la distribución en planta de las trincheras, los sondeos, las columnas, los apiques, las estaciones de levantamiento estructural, los afloramientos y las líneas de refracción sísmica, superpuesta a la geología de superficie, y en el *Anexos D.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, los apiques y las trincheras 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	937314.145	973652.059	17.40	1.80
Sondeo 2	937408.848	973595.082	5.50	0.50
Sondeo 3	937368.842	973686.323	12.10	3.80
Sondeo 4	937294.031	973739.204	9.60	0.80
Sondeo 5	937240.215	973664.896	8.67	1.90
Sondeo 6	937215.073	973706.243	12.50	1.20
Sondeo 7	937450.480	973654.091	11.00	3.00
Sondeo 10	937152.619	973651.729	13.20	3.00
Apique 1	937335	973649	1.70	N.E.
Apique 2	937166	973632	1.60	N.E.
Apique 3	937399	973637	1.50	N.E.
Apique 4	937223	973721	0.90	N.E.
Apique 5	937264	973570	1.80	N.E.
Apique 6	937274	973703	2.00	N.E.
Apique 7	937360	973693	1.60	N.E.
Apique 8	937208	973710	1.83	N.E.
Apique 9	937173	973553	1.50	N.E.
Apique 10	937230	973661	1.60	N.E.
*Trinchera 1	937185.1	973704.5	5.70	N.E.
*Trinchera 2	937189	973689	5.20	N.E.

N.E: NO ENCONTRADO

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

TABLA 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES ESTRATIGRÁFICOS

NIVEL	SÍMBOLO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	Qso	Suelo Orgánico	Limo de color gris oscuro a negro: encierra gravas de limolitas y lodolitas, su humedad discurre entre media y alta, su plasticidad ocupa los dominios desde baja hasta alta, y su consistencia divaga de baja a media. Son prolíficas las biortubaciones.
2	Qarm1 – Qarm2	Rellenos Antrópicos Mixtos	Son cuerpos arenosos o areno-gravosos, mal gradados; albergan cantos, guijos y gravas de areniscas líticas y cuarzosas de grano medio a fino, arcillolitas y arenas de grano medio a fino. La fracción gruesa oscila entre el 10% y el 20% en volumen de la masa. Son matriz soportados, y su color es amarillo con trazas rojizas.
3	Qco	Depósitos Coluviales	Acumulaciones traslocadas de residuos sólidos (basuras), arcillas y fragmentos decimétricos de areniscas y limolitas. Son mal gradados, y matriz soportados; su humedad es baja, su compresibilidad y su plasticidad son medias, y su consistencia es baja a media.
4	Qpglf-Lm-Sr	Suelos Residuales de las Limolitas de la Formación Fusagasugá	Son suelos limo-arenosos, arcillo-arenosos o arcillosos de color habano con manchas amarillas, rojizas o cafés. Su humedad es media, su consistencia es media a firme, y su plasticidad es baja. Están parcialmente cubiertos por horizontes orgánicos delgados (inferiores a 0.7 m). Su espesor varía entre los 5 m y los 7.5 m.
5	Qpglf-Ld-Sr	Suelos Residuales de las Lodolitas de la Formación Fusagasuga	Agrupan arcillas, arcillas-arenosas y limos-arenosos, pero con predominio de los dos primeros grupos. Son de color amarillo oscuro, matizadas con manchas grisáceas y violáceas. Poseen baja plasticidad, consistencia media y eventualmente firme, y humedad entre media y alta. Albergan micas (muscovita), y minerales terrígenos propios de la degradación de feldespatos, plagioclasas y líticos
6	Pglf-A1 – Pglf-A2	Formación Fusagasuga – Niveles de Areniscas	Son de color gris claro a oscuro; su tamaño de grano oscila entre fino y medio. Están compuesta por cuarzo (40%), líticos (30%), y feldespatos (30%); su grado de litificación es alto, su resistencia es blanda (ISRM, 1981), son friables y su humedad es baja. Son grano soportadas y sus espesores superan los 5 metros. Integran dos grandes unidades: la Pglf-A1 y la Pglf-A2, solo diferenciadas por su posición estratigráfica.
7	Pglf-Lm	Formación Fusagasuga – Niveles de Limolitas	Agrupa secuencias de limolitas de color gris con trazas rojizas, que encierran algunos lentes de arenisca que reflejan cambios laterales de facies. Son friables, su resistencia fluctúa de blanda a moderadamente dura, y yacen intercaladas con paquetes de arcillolitas y areniscas. Las capas son continuas y sus espesores varían desde los 4 metros hasta los 6 metros.
8	Pglf-Ld	Formación Fusagasuga – Niveles de Lodolitas	Integran lodolitas abigarradas, de colores violeta con trazas habanas, ocres y verdes, de alto grado de litificación. Su fractura es concoidea; su textura es laminar; su resistencia es blanda (ISRM, 1981) y su espesor supera los 8 metros.

4.1.2.2 MÉTODOS INDIRECTOS: REFRACCIÓN SÍSMICA

Esta herramienta fue utilizada para estimar la profundidad del contacto suelo-roca y entre unidades litológicas diferentes; su continuidad y su disposición; y los parámetros sísmicos básicos de los materiales rocosos como son las velocidades compresionales y de corte. Abarcó la ejecución de 4 líneas de refracción sísmica, dos con longitudes de 138m y dos de 55 metros; trazadas perpendiculares (tres) o paralelas (una) al rumbo de los estratos, y ligadas o muy cerca de un sondeo mecánico, bastión para contrastarlas y afinarlas.

Las líneas de mayor longitud se emplazan al centro y sur, y al norte de San Juan. La primera: LRS1, atraviesa el cuerpo del deslizamiento FT-001EC, bordea el costado occidental de la escuela y finaliza en la

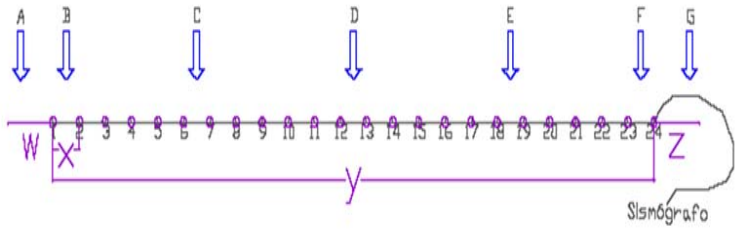
vecindad a la perforación S-1. La segunda LRS2 se circunscribe en el predio que circunda el talud interno de la vía San Juan - La Unión, encierra como controles estratigráficos los sondeos S-2 y S-7.

Las líneas sísmicas más cortas recorren las laderas con menor exploración directa, y sus trazos surcan el sur del centro poblado. La primera, la LRS3, en la parte baja del predio donde se planea construir la alcaldía municipal, y la segunda, la LRS4, en la vertiente occidental de la quebrada San Juan2, al sur de la Escuela; ambas paralelas al trazado de la LRS1 y destinadas a determinar la continuidad lateral y los espesores de las capas definidas en ella.

La tarea de adquisición de datos se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: a) la longitud de la línea es 2 a 3 veces la profundidad de investigación, por lo que las profundidades de investigación aquí son del orden de 60 metros y 30 metros; b) el espaciamiento entre los geófonos es de 6 metros para las líneas de 138 metros y de 5m para las de 55m, y c) la generación de ondas tuvo lugar mediante el sistema de percusión tradicional con "sledge Hammer" que no es más que la pesa empleada para la realización del SPT. La *Figura 4.1* y la *Figura 4.2* esquematizan la configuración y el arreglo de cada uno de los dos tipos línea ejecutado.

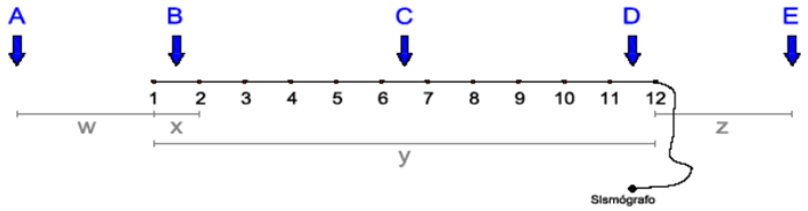
Los resultados se develan en primera instancia como modelos simples de refracción con sus correspondientes hojas de cálculo, en las que se incluyen las velocidades de corte, las densidades, la deformación volumétrica (k), la relación de poisson (γ) y los módulos elásticos, E, y de corte, Go; y en segundo lugar como tomografías.

FIGURA 4.1 ESQUEMA OPERATIVO DE UNA LÍNEA SÍSMICA DE 60 M DE PROFUNDIDAD (L=138 M)



- Puntos de disparo (Shotpoints, SP): A,B,C,D,E,F,G
- Geófonos: 1,2,3, ... 24 .
- Geófono 1: abscisa 0
- Geófono 24: abscisa y=138 metros.
- W: Distancia entre el disparo lejano y el geófono 1.
- X: Distancia de separación entre geófonos. Para la línea de 138 metros es 6 metros.
- Y: Distancia total de la línea. De acuerdo a la separación entre los geófonos, igual a 138 metros.
- Z: Distancia entre el disparo lejano y el geófono 24.

FIGURA 4.2 ESQUEMA OPERATIVO DE UNA LÍNEA SÍSMICA DE 30 M DE PROFUNDIDAD (L=55 M)



- Puntos de disparo (Shotpoints, SP): A,B,C,D,E
- Geófonos: 1,2,3, ……. 12 .
- Geófono 1: abscisa 0
- Geófono 12: abscisa y=55 metros.
- W: Distancia entre el disparo lejano y el geófono 1.
- X: Distancia de separación entre geófonos. Para la línea de 55 metros es 5 metros.
- Y: Distancia total de la línea. De acuerdo a la separación entre los geófonos, igual a 55 metros.
- Z: Distancia entre el disparo lejano y el geófono 12.

De lo anterior se diferencian en el centro poblado tres estratos, a saber:

El Nivel A: define unidades con velocidades compresionales inferiores a 235 m/s (i.e. velocidades de corte de 112 m/s) que pueden correlacionarse con los suelos residuales de las lodolitas.

El Nivel B: integra dos unidades; la primera, con velocidades compresionales de hasta 1242 m/s (o velocidades de corte 591 m/s) describe el conjunto de limolitas; y la segunda con velocidades comprendidas entre 1242 m/s y 1638 m/s (o velocidades de corte máximas de 780 m/s) ligadas con los paquetes de arenisca; y

El Nivel C: responde a los bancos de lodolitas, o bien fracturados, si la velocidad compresional no supera los 971 m/s – velocidad de corte 939 m/s o bien sanos, si las velocidades compresionales están entre los 1971 m/s y los 4236 m/s (o velocidad de corte es superior a los 900 m/s), la roca se considera dura.

Los arreglos, los modelos simples de refracción y las tomografías para las cuatro líneas reposan en el *Anexo D.1.1*.

4.1.3 ENSAYOS DE CAMPO

El avance en los sondeos, en los horizontes dominantes de suelo, se llevó parcialmente a cabo mediante el ensayo de penetración estándar, SPT, éste se consideró adecuado dado el carácter heterogéneo de los suelos encontrados, dominantemente arcillosos, arcilloso-arenosos y limo-arenosos, y la premisa de que el muestreo inalterado por lo menos en los dos últimos grupos 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 perfiles de resistencia para cada uno de los sondeos se transcriben gráficamente 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 confinamiento del material y la relación de energía promedio aplicada, de acuerdo con la siguiente expresión:

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

En donde:

- N'_i : NÚMERO DE GOLPES CORREGIDO PARA UN DETERMINADO NIVEL DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA
- 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 TOMA 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 EL DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN. LOS DIÁMETROS DE LAS PERFORACIONES FUERON INFERIORES A 12 CM, POR LO QUE 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 la *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 suelo orgánico (Qso) se caracteriza por consistencias desde muy blandas hasta medias; el suelo residual de la formación Fusagasugá posee consistencia blanda a firme, y la limolita se posiciona en firme o 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.

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

Así la ecuación de la envolvente de cada material se expone en la *Figura 4.1*, en la *Figura 4.2*, en la *Figura 4.3*, en la *Figura 4.4*, 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* 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	QSO	SUELO ORGÁNICO	1.780	0.00	26.5
2	QPGLF-LM-SR	SUELOS RESIDUALES DE LAS LIMOLITAS DE LA FM. FUSAGASUGÁ	2.017	0.00	28.5
3	QPGLF-LD-SR	SUELOS RESIDUALES DE LAS LODOLITAS DE LA FM. FUSAGASUGÁ	1.901	0.00	27.7
4	PGLF-LM PGLF-LD	FORMACIÓN FUSAGASUGÁ – LODOLITAS Y LIMOLITAS	2.193 – 2.295	0.00	43.5

FIGURA 4.3 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QSO

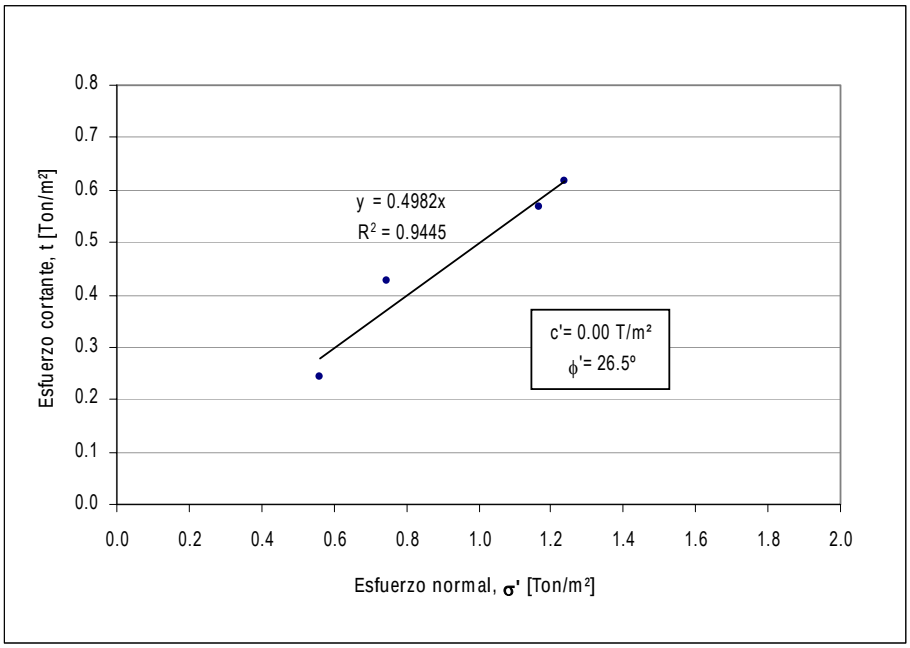


FIGURA 4.4 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QPGLF-LM-SR

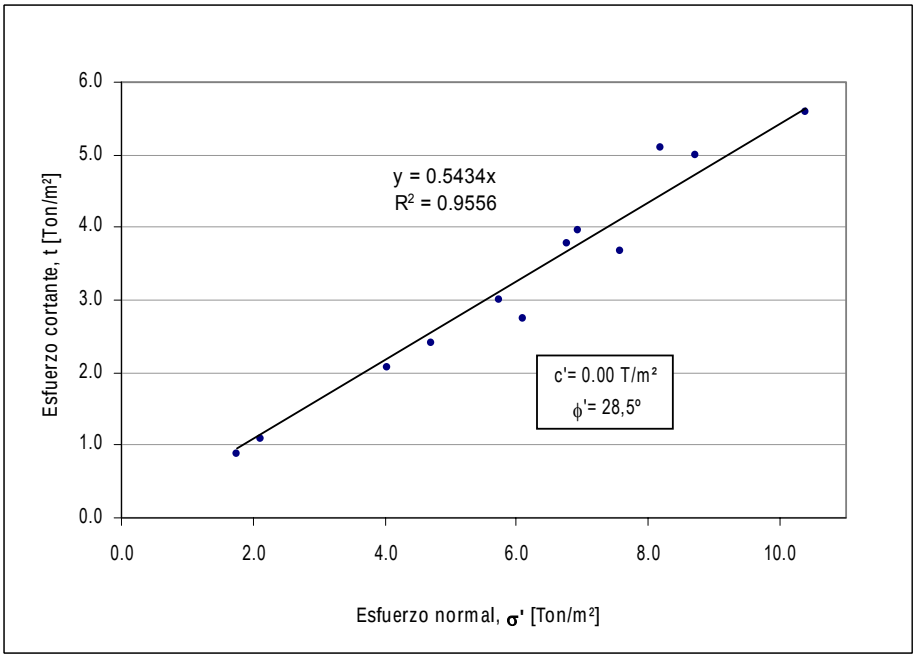


FIGURA 4.5 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA EL MATERIAL QPGLF-LD-SR

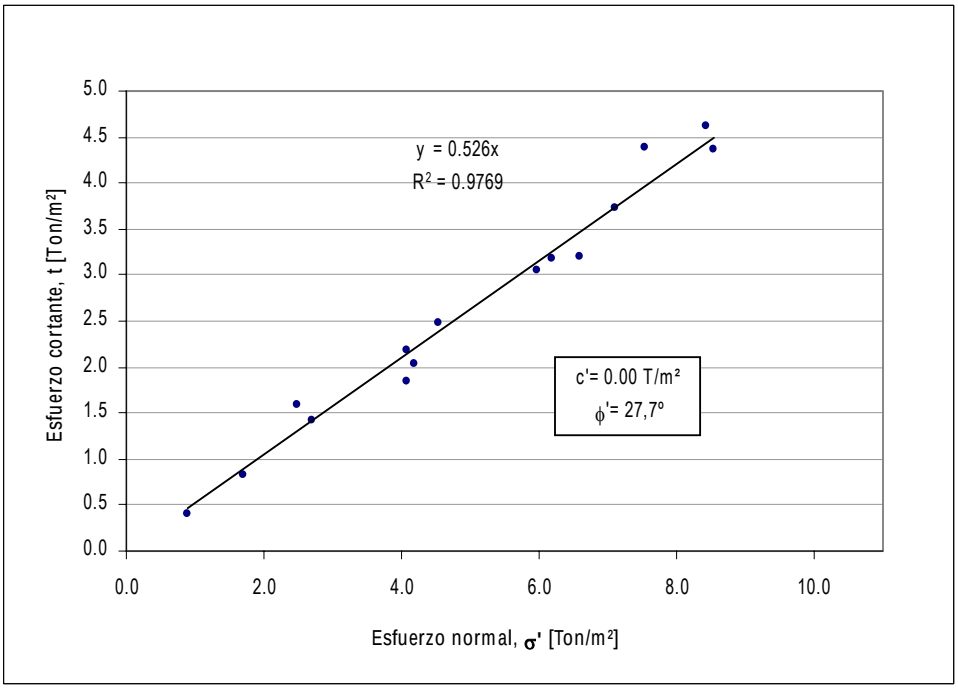


FIGURA 4.6 ENVOLVENTE Y PARÁMETROS DE RESISTENCIA PROMEDIO PARA LOS MATERIALES PGLF-LM Y PGLF-LD

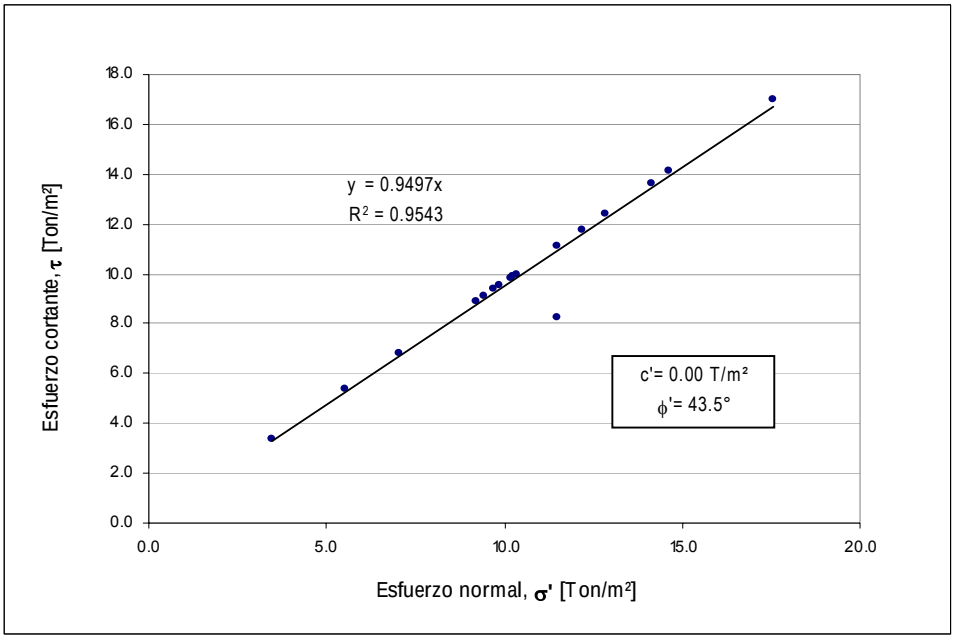


TABLA 4.7 NORMALIZACIÓN DEL SPT

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
1												**10,07**	**6,02**	
	8	5,85	6,30	6,075	2	4	4	8	1,8	3	1,80	10,47	6,20	0,62
	9	6,35	6,80	6,575	3	3	6	6	1,8	3	1,80	11,37	6,60	0,66
	12	8,25	8,70	8,475	3	4	6	10	1,8	3	2,05	15,21	8,54	0,85
	14	9,55	10,00	9,775	11	15	18	33	1,8	3	1,98	17,80	9,83	0,98
	15	11,05	11,50	11,275	21	21	23	44	1,8	5	2,15	20,99	11,52	1,15
	16	12,40	12,50	12,450			>50	>50	1,8	5	2,15	23,52	12,87	1,29
	18	13,70	13,77	13,735			>50	>50	1,8	5	2,40	26,59	14,65	1,47
	20	15,80	15,85	15,825			>50	>50	1,8	5	2,40	31,60	17,58	1,76
2												**0,65**	**0,65**	
	1	0,40	0,85	0,625	1	1	2	3	0,5	3	1,62	1,01	0,89	0,09
	3	2,15	2,60	2,375	11	10	12	22	0,5	3	1,95	4,35	2,48	0,25
	4	3,30	3,42	3,360			>50	>50	0,5	3	2,06	6,36	3,50	0,35
3												**0,88**	**0,88**	
	1	0,55	1,00	0,775	2	3	3	6	3,8	1	1,60	1,24	1,24	0,12
	2	1,05	1,50	1,275	3	4	4	8	3,8	2	1,92	2,13	2,13	0,21
	3	2,55	2,00	2,275	4	4	5	9	3,8	2	1,92	4,05	4,05	0,40
	5	2,35	2,80	2,575	4	5	5	10	3,8	2	2,07	4,71	4,71	0,47
	6	2,85	3,30	3,075	5	6	7	13	3,8	2	2,04	5,74	5,74	0,57
	7	3,35	3,80	3,575	9	9	9	18	3,8	2	2,04	6,76	6,76	0,68
	8	3,85	4,30	4,075	4	3	4	7	3,8	2	2,28	7,84	7,57	0,76
	12	5,75	5,90	5,825			>50	>50	3,8	5	2,33	11,91	9,88	0,99
	14	7,00	7,07	7,035			>50	>50	3,8	5	2,33	14,73	11,49	1,15
	16	9,00	9,05	9,025			>50	>50	3,8	5	2,33	19,37	14,14	1,41
4												**0,17**	**0,17**	
	1	0,10	0,55	0,325	1	1	1	2	0,8	1	1,73	0,56	0,56	0,06
	4	2,05	2,50	2,275	3	4	5	9	0,8	3	1,85	4,17	2,69	0,27
	5	3,55	4,00	3,775	4	5	7	12	0,8	3	1,93	7,05	4,07	0,41
	6	4,05	4,50	4,275	5	6	7	13	0,8	3	1,93	8,01	4,54	0,45
	10	8,15	8,60	8,375	6	9	14	23	0,8	3	2,09	16,54	8,97	0,90
	11	8,65	8,97	8,810			>50	>50	0,8	5	2,11	17,46	9,45	0,94
	12	9,50	9,60	9,550			>50	>50	0,8	5	2,11	19,02	10,27	1,03
5												**1,27**	**1,27**	
	1	0,65	1,10	0,875	3	2	3	5	1,9	3	1,96	1,72	1,72	0,17
	6	3,85	4,30	4,075	3	4	6	10	1,9	3	2,01	8,14	5,96	0,60
	9	6,15	6,60	6,375	6	8	10	18	1,9	3	1,65	12,01	7,54	0,75
	11	8,05	8,47	8,260	7	10	>50	>50	1,9	5	2,23	16,08	9,72	0,97
	12	8,60	8,67	8,635			>50	>50	1,9	5	2,23	16,92	10,19	1,02
6												**0,83**	**0,83**	
	1	0,55	1,00	0,775	2	2	3	5	1,2	1	1,51	1,17	1,17	0,12
	4	3,25	3,70	3,475	2	2	2	4	1,2	3	1,96	6,36	4,09	0,41
	6	4,70	5,00	4,850			>50	>50	1,2	5	2,07	9,18	5,53	0,55
	8	6,00	6,15	6,075			>50	>50	1,2	4	2,25	11,91	7,04	0,70
7												**0,30**	**0,30**	
	1	0,15	0,60	0,375	3	5	7	12	3	1	1,99	0,75	0,75	0,07
	2	0,65	1,10	0,875	6	5	2	7	3	2	1,99	1,74	1,74	0,17
	4	2,85	3,30	3,075	1	2	3	5	3	2	2,02	6,18	6,10	0,61
	6	3,85	4,30	4,075	6	8	10	18	3	2	1,76	8,00	6,92	0,69
	7	5,05	5,50	5,275	9	12	16	28	3	2	2,11	10,45	8,18	0,82
	8	5,55	6,00	5,775	11	9	11	20	3	2	2,11	11,51	8,73	0,87
	9	7,05	7,50	7,275	9	7	8	15	3	2	2,11	14,67	10,40	1,04
	10	7,55	8,00	7,775	9	12	15	27	3	2	2,11	15,73	10,95	1,10
	11	8,55	8,97	8,760	20	27	>50	>50	3	2	2,30	17,95	12,19	1,22
10												**3,77**	**3,77**	
	3	2,05	2,50	2,275	3	3	4	7	3	3	1,84	4,19	4,19	0,42
	5	4,55	5,00	4,775	3	4	8	12	3	3	1,88	8,88	7,10	0,71
	6	6,05	6,50	6,275	4	5	9	14	3	3	1,89	11,71	8,43	0,84
	7	7,10	7,20	7,150			>50	>50	3	3	1,89	13,36	9,21	0,92
	9	8,70	9,80	9,750			>50	>50	3	4	1,71	16,11	10,36	1,04

Perf.	Muestra	C_N Peck	Seed	Meyerhoff-Ishihara	Liao-Whitman	Skempton	Seed-Idriss	Schmertmann	González	C_N promedio
1	8	1,160	1,260	1,288	1,270	1,235	1,293	1,426	1,208	1,267
	9	1,139	1,226	1,250	1,231	1,205	1,254	1,377	1,180	1,233
	12	1,053	1,086	1,094	1,082	1,079	1,097	1,180	1,069	1,092
	14	1,006	1,009	1,010	1,009	1,009	1,011	1,078	1,008	1,017
	15	0,953	0,923	0,918	0,932	0,930	0,944	0,968	0,939	0,938
	16	0,916	0,863	0,856	0,882	0,875	0,899	0,895	0,891	0,884
	18	0,872	0,793	0,785	0,826	0,811	0,847	0,814	0,834	0,823
	20	0,812	0,694	0,692	0,754	0,725	0,775	0,708	0,755	0,739
2	1	1,808	2,000	2,000	2,000	1,837	2,000	2,000	2,000	1,956
	3	1,466	1,758	1,794	2,000	1,603	1,855	2,000	1,606	1,760
	4	1,351	1,571	1,620	1,691	1,482	1,644	1,879	1,457	1,587
3	1	1,697	2,000	2,000	2,000	1,779	2,000	2,000	1,907	1,923
	2	1,517	1,840	1,862	2,000	1,649	1,948	2,000	1,672	1,811
	3	1,302	1,491	1,539	1,572	1,424	1,554	1,765	1,393	1,505
	5	1,251	1,409	1,452	1,457	1,360	1,461	1,645	1,327	1,420
	6	1,185	1,302	1,335	1,320	1,271	1,340	1,488	1,241	1,310
	7	1,131	1,213	1,236	1,217	1,194	1,240	1,359	1,170	1,220
	8	1,093	1,151	1,167	1,150	1,138	1,171	1,271	1,121	1,158
	12	1,004	1,006	1,007	1,006	1,006	1,007	1,074	1,005	1,014
	14	0,954	0,924	0,919	0,933	0,931	0,944	0,969	0,940	0,939
	16	0,884	0,812	0,804	0,841	0,828	0,862	0,835	0,850	0,840
4	1	1,961	2,000	2,000	2,000	1,894	2,000	2,000	2,000	1,982
	4	1,438	1,712	1,754	1,926	1,575	1,803	2,000	1,569	1,722
	5	1,300	1,488	1,535	1,567	1,421	1,550	1,760	1,390	1,502
	6	1,264	1,429	1,474	1,485	1,376	1,484	1,674	1,343	1,441
	10	1,036	1,059	1,065	1,056	1,054	1,067	1,144	1,047	1,066
	11	1,019	1,031	1,034	1,029	1,028	1,035	1,106	1,025	1,038
	12	0,991	0,986	0,984	0,987	0,987	0,989	1,047	0,988	0,995
5	1	1,589	1,957	1,951	2,000	1,707	2,000	2,000	1,766	1,871
	6	1,173	1,281	1,312	1,295	1,253	1,317	1,457	1,225	1,289
	9	1,094	1,154	1,169	1,152	1,140	1,173	1,275	1,123	1,160
	11	1,009	1,015	1,016	1,014	1,014	1,017	1,085	1,012	1,023
	12	0,994	0,990	0,989	0,991	0,991	0,993	1,053	0,992	0,999
6	1	1,716	2,000	2,000	2,000	1,790	2,000	2,000	1,932	1,930
	4	1,299	1,486	1,533	1,564	1,420	1,548	1,757	1,389	1,500
	6	1,198	1,321	1,356	1,344	1,288	1,362	1,516	1,257	1,330
	8	1,117	1,191	1,211	1,192	1,174	1,215	1,327	1,153	1,198
7	1	1,866	2,000	2,000	2,000	1,861	2,000	2,000	2,000	1,966
	2	1,583	1,949	1,945	2,000	1,703	2,000	2,000	1,759	1,867
	4	1,165	1,268	1,297	1,280	1,242	1,302	1,439	1,214	1,276
	6	1,123	1,200	1,221	1,202	1,182	1,225	1,340	1,160	1,207
	7	1,067	1,109	1,120	1,106	1,100	1,123	1,213	1,087	1,116
	8	1,045	1,074	1,081	1,070	1,068	1,083	1,164	1,059	1,080
	9	0,987	0,979	0,977	0,981	0,981	0,985	1,038	0,983	0,989
	10	0,970	0,951	0,947	0,956	0,955	0,964	1,002	0,961	0,963
	11	0,934	0,893	0,886	0,906	0,901	0,921	0,930	0,914	0,911
10	3	1,291	1,473	1,520	1,546	1,410	1,533	1,738	1,378	1,486
	5	1,114	1,186	1,206	1,187	1,169	1,210	1,320	1,149	1,192
	6	1,057	1,092	1,101	1,089	1,085	1,104	1,189	1,074	1,099
	7	1,027	1,044	1,049	1,042	1,041	1,050	1,124	1,036	1,052
	9	0,988	0,981	0,979	0,983	0,982	0,986	1,041	0,985	0,999

Perf.	Muestra	η_1 U.S.A.	Japón	η_2	η_3	η_4	$N_{normalizado}$ U.S.A.	Japón	$\phi'_{equivalente}$ Kishida	Schmertmann	JRB	Shiou & Fukui	JNR	ϕ'_{prom} (°)
1	8	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	7	6	25,95	30,68	24,49	29,16	28,80	27
	9	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	5	4	23,94	27,89	22,75	28,44	28,20	26
	12	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	7	6	25,95	30,68	24,49	29,16	28,80	27
	14	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	23	19	34,49	41,64	31,88	33,84	32,70	33
	15	0,75	0,63	1,00	1,00	1,00	30	25	37,36	44,22	34,36	36,00	34,50	36
	16	0,75	0,63	1,00	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	18	0,75	0,63	1,00	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	20	0,75	0,63	1,00	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	3	2	21,32	23,98	20,48	27,72	27,60	24
	3	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	21	18	33,97	40,76	31,43	33,48	32,40	33
	4	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
3	1	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	6	5	25,00	29,38	23,66	28,80	28,50	26
	2	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	8	6	25,95	31,84	24,49	29,16	28,80	27
	3	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	7	6	25,95	30,68	24,49	29,16	28,80	27
	6	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	9	7	26,83	32,87	25,25	29,52	29,10	28
	7	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	12	10	29,14	35,48	27,25	30,60	30,00	29
	8	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	5	4	23,94	27,89	22,75	28,44	28,20	26
	12	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	14	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	16	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	2	1	19,47	21,18	18,87	27,36	27,30	23
	4	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	8	7	26,83	31,84	25,25	29,52	29,10	28
	5	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	10	8	27,65	33,82	25,95	29,88	29,40	28
	6	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	11	9	28,42	34,68	26,62	30,24	29,70	29
	10	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	17	14	31,73	38,74	29,49	32,04	31,20	31
	11	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	12	0,75	0,63	0,95	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	5	4	23,94	27,89	22,75	28,44	28,20	26
	6	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	8	6	25,95	31,84	24,49	29,16	28,80	27
	9	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	14	12	30,49	36,91	28,42	31,32	30,60	30
	11	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	12	0,75	0,63	0,95	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
	4	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	3	2	21,32	23,98	20,48	27,72	27,60	24
	6	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	8	0,75	0,63	0,95	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	13	11	29,83	36,22	27,85	30,96	30,30	30
	2	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	7	6	25,95	30,68	24,49	29,16	28,80	27
	4	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	3	2	21,32	23,98	20,48	27,72	27,60	24
	6	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	13	11	29,83	36,22	27,85	30,96	30,30	30
	7	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	19	16	32,89	39,80	30,49	32,76	31,80	32
	8	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	13	11	29,83	36,22	27,85	30,96	30,30	30
	9	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	10	8	27,65	33,82	25,95	29,88	29,40	28
	10	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	18	15	32,32	39,28	30,00	32,40	31,50	32
	11	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
10	3	0,75	0,63	0,75	1,00	1,00	5	4	23,94	27,89	22,75	28,44	28,20	26
	5	0,75	0,63	0,85	1,00	1,00	9	7	26,83	32,87	25,25	29,52	29,10	28
	6	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	10	8	28,42	33,82	26,62	30,24	29,70	29
	7	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44
	9	0,75	0,63	0,95	1,00	1,00	50	50	46,62	49,18	42,39	45,00	42,00	44

Perf.	Muestra	Consistencia o Compacidad
1	8	Media
	9	Blanda
	12	Media
	14	Firme
	15	Firme
	16	Firme
	18	Firme
	20	Firme
2	1	Blanda
	3	Firme
	4	Firme
3	1	Media
	2	Media
	3	Media
	5	Media
	6	Media
	7	Firme
	8	Blanda
	12	Firme
	14	Firme
	16	Firme
4	1	Muy blanda
	4	Media
	5	Media
	6	Firme
	10	Firme
	11	Firme
	12	Firme
5	1	Blanda
	6	Media
	9	Firme
	11	Firme
	12	Firme
6	1	Blanda
	4	Blanda
	6	Firme
	8	Firme
7	1	Firme
	2	Media
	4	Blanda
	6	Firme
	7	Firme
	8	Firme
	9	Media
	10	Firme
	11	Firme
10	3	Blanda
	5	Media
	6	Firme
	7	Firme
	9	Firme

Sondeo-Muestra	Consecutivo	σ_v' (Ton/m²)	τ (Ton/m²)
S-1 M-8	3	6,20	3,17
S-1 M-9	3	6,60	3,20
S-1 M-12	3	8,54	4,37
S-1 M-14	3	9,83	6,44
S-1 M-15	5	11,52	8,23
S-1 M-16	5	12,87	12,43
S-1 M-18	5	14,65	14,15
S-1 M-20	5	17,58	16,98
S-2 M-1	3	0,89	0,40
S-2 M-3	3	2,48	1,60
S-2 M-4	3	3,50	3,38
S-3 M-1	1	1,24	0,62
S-3 M-2	2	2,13	1,09
S-3 M-3	2	4,05	2,07
S-3 M-5	2	4,71	2,41
S-3 M-6	2	5,74	3,01
S-3 M-7	2	6,76	3,78
S-3 M-8	2	7,57	3,66
S-3 M-12	5	9,88	9,55
S-3 M-14	5	11,49	11,10
S-3 M-16	5	14,14	13,66
S-4 M-1	1	0,56	0,24
S-4 M-4	3	2,69	1,41
S-4 M-5	3	4,07	2,19
S-4 M-6	3	4,54	2,49
S-4 M-10	3	8,97	5,41
S-4 M-11	5	9,45	9,12
S-4 M-12	5	10,27	9,92
S-5 M-1	3	1,72	0,83
S-5 M-6	3	5,96	3,05
S-5 M-9	3	7,54	4,39
S-5 M-11	5	9,72	9,39
S-5 M-12	5	10,19	9,84
S-6 M-1	1	1,17	0,57
S-6 M-4	3	4,09	1,84
S-6 M-6	5	5,53	5,34
S-6 M-8	4	7,04	6,80
S-7 M-1	1	0,75	0,43
S-7 M-2	2	1,74	0,89
S-7 M-4	2	6,10	2,75
S-7 M-6	2	6,92	3,95
S-7 M-7	2	8,18	5,11
S-7 M-8	2	8,73	4,99
S-7 M-9	2	10,40	5,58
S-7 M-10	2	10,95	6,72
S-7 M-11	2	12,19	11,77
S-10 M-3	3	4,19	2,03
S-10 M-5	3	7,10	3,72
S-10 M-6	3	8,43	4,63
S-10 M-7	3	9,21	8,90
S-10 M-9	4	10,36	10,00

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		
Qso	Suelo orgánico	1
Qsg/Lm	Suelo residual de la Limolita	2
Qsg/Ld	Suelo residual de la Lodolita	3
Pg/Lm	Limolita	4
Pg/Ld	Lodolita	5

4.1.4 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de las unidades de roca, 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 especímenes extraídos: inalterados, tipo shelby (con diámetros entre 3 y 4 pulgadas y longitudes de hasta 0.35 m) y bloque (prismáticos e irregulares con aristas medias de 0.20 m y 0.40 m) y alterados split spoon. En la *Tabla 4.8* se discrimina la cantidad y el tipo de ensayos de clasificación y resistencia ejecutados.

TABLA 4.8 RELACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO			CANTIDAD (UN)
WN	:	CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	83
LL Y LP.	:	LÍMITES DE CONSISTENCIA	54
GRANULOMETRÍA	:	GRANULOMETRÍA	19
PT200	:	PASA TAMIZ NO. 200	19
GS	:	GRAVEDAD ESPECÍFICA	18
γ_T	:	PESO UNITARIO TOTAL	69
γ_D	:	PESO UNITARIO SECO	67
	:	EXPANSIÓN LAMBE	3
	:	EXPANSIÓN LIBRE EN EDÓMETRO	2
CD	:	CORTE DIRECTO	15
q_u	:	PENETRÓMETRO DE BOLSILLO	33
$q_u(S)$	:	COMPRESIÓN INCONFINADA EN SUELO	14
$q_u(R)$	:	COMPRESIÓN INCONFINADA EN ROCA	4
CP	:	CARGA PUNTUAL	7

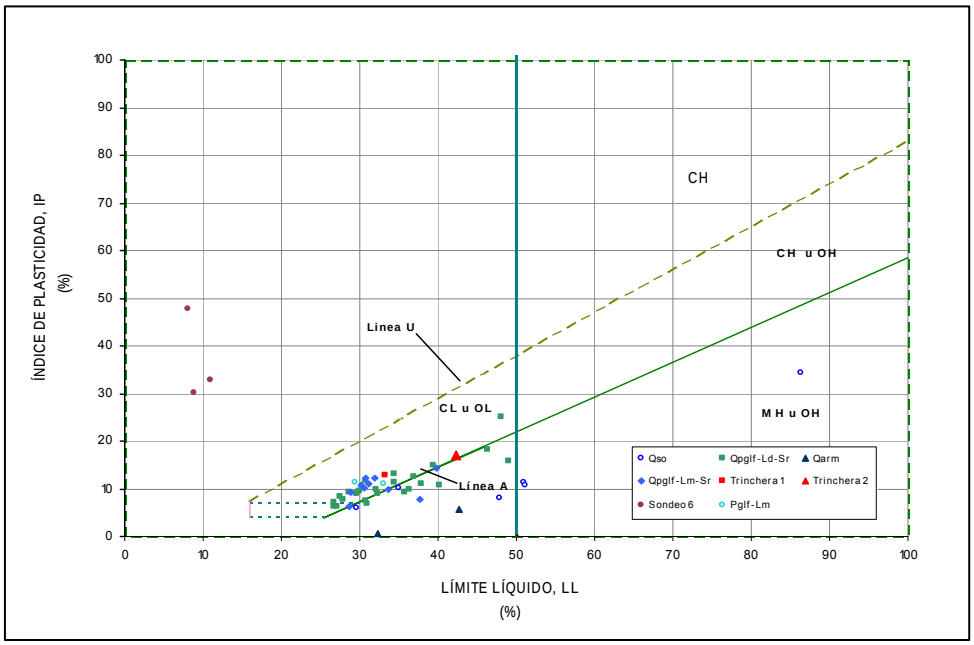
Se hizo especial hincapié en la toma de muestras en los paquetes de arenisca y lodolita de la Formación Fusagasuga, con el propósito de establecer tanto las propiedades físicas como mecánicas del material, y de los planos de discontinuidad (básicamente el de la estratificación), máxime si se consideraba que estos últimos podían gobernar la estabilidad de la mayor parte de laderas (premisa desvirtuada). En cuanto al cuaternario reciente se le dio mayor importancia a los residuales de las lodolitas, Pglf-Ld-sr, puesto que presiden gran parte de las superficies libres y son los escenarios a priori móviles, y por consiguiente los de mayor susceptibilidad a los procesos de inestabilidad. La selección de los testigos buscó cotejar (o corroborar) la premisa sustancial de la prevalencia de un único escenario de residuales, en el entendido que su respuesta geomecánica es homogénea e indiferente de su expresión geomorfológica hoy día (véase la *Figura 4.7*). Supuesto validado por los parámetros efectivos: c', ø', obtenidos.

Los cortes directos se llevaron a cabo en condición inundada, drenada y no-drenada, y a los niveles de esfuerzo a los que estaban sometidas las unidades de suelo o roca en campo; los ensayos no-drenados se acometieron, además, a muy baja velocidad 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 del residual y en las exposiciones del macizo rocoso (i.e de las columnas).

Las muestras de roca, por excelencia de bloque: la C-1 M-1, C-1 M-3, C-1 M-4, C-1 M-5, C-2 M-1, C-2 M-5, C-2 M-7 y C-3 M-2, fueron precortadas de manera tal que el ensayo simulará el papel del plano de estratificación (datado en el sitio como E_1=300/10). Respondían a los dos horizontes expuestos de arenisca y al más relevante banco de lodolita.

Las expansiones se destinaron casi exclusivamente a la deducción de los parámetros operativos del suelo de fundación en el poblado (i.e. el residual); no obstante, la fisuración de la masa repercutió en la repetición de los ensayos. A pesar del impasse, los esfuerzos de expansión sugieren desde ya para las condiciones de carga de las viviendas (carga viva más carga muerta), y en especial de la escuela (edificación con los mayores daños), inocua incidencia de las deformaciones por expansión en el deterioro (actual y futuro) de las construcciones (aún cuando la humedad es, en algunas muestras, inferior al límite plástico).

FIGURA 4.7 CARTA DE PLASTICIDAD



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 otros consultores, gracias a que los materiales constitutivos son coincidentes con los de este estudio (se recuerda que tales proyectos tienen asiento en San Juan de Sumapaz). Su importancia recae en mejorar la información estadística. En este sentido se recurre a los trabajos del Consorcio Sumapaz (2007) y del Consorcio Sumapaz (2008). 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 D.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 4.9*, en la *Tabla 4.10* y en la *Tabla 4.11*. Y los ensayos de laboratorio ordenados bajo el amparo de otros consultores pero que involucran a la Formación Fusagasugá se compilan en el *Anexo D.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 se detectaron en los sondeos, en las trincheras, en los apiques y en las columnas. En resumen se tienen los siguientes tipos (u órdenes) de materiales:

Material 1: Suelo Orgánico (Qso)
Material 2: Rellenos Antrópicos Mixtos ($Qarm_1$ y $Qarm_2$)
Material 3: Depósitos Coluviales (Qco)
Material 4: Suelos Residuales de la Formación Fusagasuga (Qpglf-Lm-sr y Qpglf-Ld-sr)

4.2.1.1 MATERIAL 1: SUELO ORGÁNICO, QSO

Aboceta horizontes delgados, inferiores al metro cincuenta de profundidad (registro capturado sólo en la perforación S-6, *Anexo D.1.1*) y modalmente de 0.50 metros, irregulares y discontinuos, principalmente limosos, limo-arenosos y eventualmente arcillosos, diseminados fortuitamente en las márgenes de las quebradas San Juan 1 y 2, y en los predios menos intervenidos (al sur, al norte y al centro de San Juan). Su humedad muta de media a alta; su compresibilidad dominante es baja o intermedia; su plasticidad es, dominantemente, baja, pero puede llegar a estadios excepcionales de alto (como lo revela la muestra A6M2 de la *Tabla 4.9*), su consistencia diverge de media a firme y se clasifica como CL, ML o MH. Poca o ninguna injerencia encierra en la gestación de los procesos de inestabilidad. La *Tabla 4.12* devela las más relevantes propiedades índice y mecánicas.

4.2.1.2 MATERIAL 2: RELLENOS ANTRÓPICOS MIXTOS, Q_{ARM1} Y Q_{ARM2}

Integra horizontes arenosos o areno-gravosos, mal gradados, adosados bajo las obras civiles y las edificaciones institucionales, diferenciados sólo en su posición geográfica y en su compacidad. Entrelaza cantos, guijos y gravas, subangulares, de areniscas líticas, cuarzosas, de grano fino a medio, arcillolitas y arenas de grano medio a fino. La fracción gruesa configura entre el 10% y el 20% del volumen de la masa. Son matriz soportados; su compacidad divaga de media a densa; su humedad muta de baja a media; y su color es amarillo con trazas rojizas.

TABLA 4.9 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 Veleta Laboratorio (Kg/cm²)	$q_{u\ ROCA}$ (Kg/cm²)	$q_{u\ suelo}$ (Kg/cm²)	c' (Kg/cm²)	ϕ' (°)	c'residual (Kg/cm²)	ϕ residual (°)	EXPANSIÓN LIBRE EN ENDÓMETRO		EXPANSIÓN LAMBE	
				de	a	media																							Expansión (%)	Estado	Esfuerzo (Kg/cm²)	Estado
A1	M1	BL	Qpglf-Ld-Sr	1,70	1,70	1,70	CL	37,50	48,10	22,90	25,20	0,58				1,71	1,24	2,63						0,10	26,1					0,28	No crítico
A2	M1	B	Qpglf-Ld-Sr	1,50	1,60	1,55	ML	25,47	49,12	33,30	15,82	-0,49				2,08	1,66	2,41					0,62								
A4	M1	B	Pglf-Ld	0,85	0,90	0,88										1,71															
A5	M1	B	Qram	0,00	0,50	0,25	ML	58,67	42,62	36,99	5,63	3,85																			
	M2	B	Qso	0,50	1,00	0,75	MH	192,51	51,00	39,61	11,39	13,42																			
	M3	B	Qpglf-Lm-Sr	1,30	1,60	1,45		36,58					0,00	23,40	76,60				76,60													
	M4	BL	Qpglf-Lm-Sr	1,60	1,60	1,60	ML	28,25	39,77	25,46	14,31	0,19				1,99	1,55						0,37								
A6	M1	BL	Qpglf-Lm-Sr	1,65	1,87	1,76		23,28								2,04	1,65	2,46					0,83								
	M2	B	Qso	0,00	0,50	0,25	MH	71,84	86,40	52,11	34,29	0,58	0,00	21,20	78,80				78,80												
	M3	B	Qpglf-Lm-Sr	0,50	1,18	0,84	ML	24,17	37,65	29,82	7,83	-0,72																			
A7	M1	B	Qarm	0,00	0,70	0,35	ML	20,16	32,22	31,55	0,67	-17,00																			
	M3	B	Qpglf-Ld-Sr	1,20	1,60	1,40	ML	50,33	46,27	28,15	18,12	1,22																			
A8	M1	B	Qso	0,00	0,45	0,23	MH	42,98	51,07	40,30	10,77	0,25						2,27													
A9	M1	BL	Qpglf-Ld-Sr	0,25	1,50	0,88		26,49 29,30					0,00	28,90	71,10	1,74 1,85	1,38 1,43	2,48	71,10				0,42	0,18	30,1							
A10	M1	BL	Qpglf-Ld-Sr	1,15	1,60	1,38	ML	23,33	30,81	23,32	7,49	0,00				1,86	1,51	2,46					1,16								
T1	M1	BL	Qpglf-Lm-Sr	0,40	1,90	1,15	CL	16,60	33,20	20,50	12,70	-0,31				1,99	1,71	2,66						0,14	33,4	0,05	34,91				
T2	M1	BL	Qpglf-Lm-Sr	0,20	1,70	0,95	CL	19,60	42,40	25,30	17,10	-0,33	5,30	34,20	60,50	2,00	1,67		60,50					0,27	31,3	0,17	26,00				
C1	M1	BL	Pglf-A	0,00	0,45	0,23		0,72					60,30	28,20	11,50	2,19	2,17		11,50												
	M3 / M4	BL	Pglf-A	4,80	6,30	5,55		7,60								2,21	2,06					90,00		0,71	38,9	0,14	43,94				
	M5 / M6	BL	Pglf-Ld	6,30	9,10	7,70		8,30								2,32	2,14							0,32	28,3						
C2	M1	BL	Pglf-A	0,00	0,85	0,43		0,62								1,84	1,83														
	M5	BL	Pglf-Lm	2,97	3,75	3,36		13,40								1,76	1,55							0,06	39,9						
	M7	BL	Pglf-A	3,75	8,13	5,94		1,26					0,50	55,10	44,40	1,75	1,73		44,40												
C3	M1	B	Qpglf-Ld-Sr	0,00	0,82	0,41	ML	1,70	30,96	24,18	6,80	-3,32	0,00	36,70	63,30	1,75	1,72		63,30												
	M2	BL	Pglf-A	0,82	4,77	2,80		9,20					0,00	54,90	45,10	1,93	1,77		45,10			4,34		0,26	38,6						
S-1	1	SH	Qso	0,60	1,30	0,95	CL	61,25	34,93	24,92	10,01	3,63				1,67	1,04			0,25	0,24										
	3	SH	Qpglf-Ld-Sr	2,50	3,10	2,80	CL	28,58	26,72	20,52	6,20	1,30				1,93	1,50	2,50		0,70	0,56										
	5	SH	Qpglf-Ld-Sr	4,00	4,50	4,25	ML	60,17 60,80	40,23	29,51	10,72	2,86				1,59	0,99			0,45	0,44			0,20 0,23	27,5 23,0						
	6	SH	Qpglf-Ld-Sr	4,70	5,20	4,95		68,40								1,58	0,94			0,75										0,69	No crítico
	7	SH	Qpglf-Ld-Sr	5,30	5,80	5,55	ML	60,48	37,92	26,77	11,15	3,02				1,68	1,05			0,80	0,70		0,91								
	10	SH	Qpglf-Ld-Sr	7,00	7,50	7,25	CL	34,03	34,49	23,01	11,48	0,96				1,80	1,34			1,00	0,80										
	13	SH	Qpglf-Ld-Sr	9,10	9,50	9,30	CL	25,25	27,53	19,10	8,43	0,73	0,00	40,20	59,80	2,05	1,64	2,50	59,80	0,70	0,60		0,90								
	14	SPT	Qpglf-Ld-Sr	9,50	10,00	9,75		27,90								1,98	1,55														
	15	SPT	Pglf-Ld	11,05	11,50	11,28	CL	18,79	26,65	17,77	8,88	0,11	6,80	37,50	55,70			2,45	55,70												
	16	SPT	Pglf-Ld	12,40	12,50	12,45	CL	13,00	33,70	20,10	13,60	-0,52				2,15	1,90														
	19	NQ	Pglf-Ld	13,77	15,80	14,79										2,40						65,00									
S-2	1	SPT	Qpglf-Ld-Sr	0,40	0,85	0,63	CL	36,28	39,49	24,42	15,07	0,79				1,62	1,19			0,90											
	2	SH	Qpglf-Ld-Sr	1,50	2,10	1,80	CL	18,12	34,38	21,19	13,19	-0,23	0,00	23,80	76,20	1,95	1,65		76,20	3,70											
	4	SPT	Pglf-Ld	3,30	3,42	3,36		7,77								2,06	1,91			>4,5											

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.10 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 Veleta Laboratorio (Kg/cm²)	$q_{u\ ROCA}$ (Kg/cm²)	$q_{u\ suelo}$ (Kg/cm²)	c' (Kg/cm²)	ϕ' (°)	c'residual (Kg/cm²)	ϕ'residual (°)	EXPANSIÓN LIBRE EN ENDÓMETRO		EXPANSIÓN LAMBE	
				de	a	media																							Expansión (%)	Estado	Esfuerzo (Kg/cm²)	Estado
S-3	1	SPT	Qso	0,55	1,00	0,78	ML	25,95	29,63	23,52	6,11	0,40				2,01	1,60			1,50												
	3	SPT	Qpglf-Lm-Sr	1,55	2,00	1,78		26,07								1,92	1,52			1,90												
	4	SH	Qpglf-Lm-Sr	2,00	2,30	2,15	CL	24,93	31,95	19,62	12,33	0,43				2,07	1,66	2,47		1,70			1,70									
	7	SPT	Qpglf-Lm-Sr	3,35	3,80	3,58	CL	23,81	30,56	20,49	10,07	0,33				2,04	1,65			1,85												
	9	SH	Qpglf-Lm-Sr	4,50	4,90	4,70		23,98					2,40	34,10	63,50	2,28	1,84	2,47	63,50	1,00			0,35									
	10	SH	Qpglf-Lm-Sr	5,05	5,40	5,23	CL	23,73	30,80	18,61	12,19	0,42				2,00	1,62			1,25												
	11	SH	Qpglf-Lm-Sr	5,50	5,75	5,63	CL	32,28 18,63	30,18	19,38	10,80	1,20				1,98	1,67			2,00				0,29	29,3			1,29	No Crítico		
	17	NQ	Pglf-Ld	9,05	10,20	9,63		5,91								2,33	2,20			>4.5												
S-4	2	SH	Qpglf-Ld-Sr	0,80	1,50	1,15	ML	28,39	35,72	26,54	9,18	0,20				1,85	1,44			1,20												
	5	SPT	Qpglf-Ld-Sr	3,55	4,00	3,78	CL	22,60	27,86	20,04	7,82	0,33	0,00	43,50	56,50	1,93	1,57		56,50	0,90	0,66											
	7	SH	Qpglf-Ld-Sr	5,50	6,20	5,85	CL	26,62	29,99	20,52	9,47	0,64	0,00	29,50	70,50	2,02	1,60	2,46	70,50	1,10	0,80		0,57									
	9	SH	Qpglf-Ld-Sr	7,70	8,10	7,90	CL	20,81	27,14	20,85	6,29	-0,01				2,09	1,73	2,46		1,75			0,85									
	11	SPT	Pglf-Ld	8,65	8,97	8,81		13,33								2,11	1,86			>4,5												
S-5	1	SPT	Qpglf-Ld-Sr	0,65	1,10	0,88	ML	27,24	36,36	26,44	9,92	0,08				1,96	1,54			2,50												
	3	SH	Qpglf-Ld-Sr	2,00	2,60	2,30	CL	24,27	30,35	20,14	10,21	0,40				2,01	1,62			0,90	0,74											
	4	SH	Qpglf-Ld-Sr	2,60	3,40	3,00	CL	19,54	26,66	19,43	7,23	0,02				2,08	1,74			1,10	0,90											
	5	SH	Qpglf-Ld-Sr	3,50	3,80	3,65	CL	24,77	30,75	19,19	11,56	0,48				2,01	1,61	2,46		1,40			0,77									
	7	SH	Qpglf-Ld-Sr	5,00	5,50	5,25	CL	24,18	29,78	20,60	9,18	0,39				1,94	1,56			2,50												
	8	SH	Qpglf-Ld-Sr	5,70	6,10	5,90	ML	29,10	32,35	23,45	8,90	0,63				1,65	1,28	2,51		1,50			1,28									
	10	SH	Qpglf-Ld-Sr	7,50	8,00	7,75	CL	22,43	28,74	19,35	9,39	0,33				2,22	1,81			2,50												
	11	SPT	Pglf-Ld	8,05	8,47	8,26	CL	18,51	29,81	19,13	10,68	-0,06	0,00	25,90	74,10	2,23	1,88		74,10	>4.5												
S-6	1	SPT	Qso	0,55	1,00	0,78	ML	79,52	47,80	39,81	7,99	4,97				1,51	0,84			0,75												
	2	SH	Qco	1,50	2,20	1,85	CL	28,37	30,23	21,33	8,90	0,79						2,53		0,55	0,54											
	3	SH	Qpglf-Ld-Sr	2,50	3,20	2,85	CL	26,07 21,74	32,95	22,05	10,90	0,37				1,96 1,98	1,55 1,63			1,85				0,25	32,7	0,17 0,20	31,70 32,20	1,20	No Crítico		
	5	SH	Pglf-Ld	4,20	4,70	4,45	CL	16,01	35,28	22,74	12,54	-0,54	0,00	4,70	95,30	2,07	1,78		95,30	2,85												
	9	NQ	Pglf-Lm	6,15	7,85	7,00		1,01								2,25	2,23			>4.5												
	10	NQ	Pglf-Lm	7,80	9,30	8,55		3,50								2,51	2,42							0,48	36,5							
	11	NQ	Pglf-Lm	9,30	11,00	10,15																										
	12	NQ	Pglf-Lm	11,00	12,50	11,75		0,37								2,35	2,34															
S-7	2	SPT	Qpglf-Lm-Sr	0,65	1,10	0,88	CL	23,45	28,85	19,57	9,28	0,42				1,99	1,61			1,50												
	3	SH	Qpglf-Lm-Sr	2,20	2,80	2,50	ML	23,27	28,69	22,44	6,25	0,13	0,00	25,00	75,00	2,02	1,64		75,00	1,20	0,94		1,17									
	5	SH	Qpglf-Lm-Sr	3,50	3,80	3,65	ML	33,70	33,66	23,75	9,91	1,00				1,76	1,32			0,90	0,70											
	8	SPT	Qpglf-Lm-Sr	5,55	6,00	5,78	CL	14,26	31,20	20,07	11,13	-0,52	0,00	5,30	94,70	2,11	1,85		94,70	>4,5												
S-10	2	SH	Qpglf-Ld-Sr	1,40	2,00	1,70	CL	33,24	36,94	24,36	12,58	0,71				1,84	1,38													0,61	No crítico	
	4	SH	Qpglf-Ld-Sr	3,50	4,00	3,75	CL	30,97 27,00	32,18	22,21	9,97	0,88				1,88 1,93	1,44 1,52							0,25	28,2							
	6	SPT	Qpglf-Ld-Sr	6,05	6,50	6,28	CL	25,13	29,63	20,79	8,84	0,49																				
	7	SPT	Qpglf-Ld-Sr	7,10	7,20	7,15		17,63					0,00	12,90	87,10			2,49	87,10														
	9	SPT	Pglf-Lm	8,70	8,80	8,75	CL	21,60	33,08	22,00	11,07	-0,04																				
	10	NQ	Pglf-Lm	8,80	10,30	9,55		1,64								1,71	1,68															
	11	NQ	Pglf-Lm	10,30	11,50	10,90	CL	5,01	29,44	18,03	11,41	-1,14				2,52	2,46							0,56	37,8							
	12	NQ	Pglf-Lm	11,50	13,20	12,35		2,54								2,43	2,37					177,00										

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 4.11 CARGAS PUNTUALES

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)
C1 - M4	Pglf - A2	1	10.21	3.72	8.36	6.29	39.60	121	8.74	1.11	9.69	7.96	191.02
		2	8.28	3.71	6.04	5.34	28.53	135	9.84	1.03	10.14		
		3	9.24	4.71	6.02	6.01	36.10	161	7.25	1.09	7.87		
		4	7.92	6.08	6.85	7.28	53.03	125	3.37	1.18	3.99		
		5	9.61	4.89	6.50	6.36	40.47	154	6.42	1.11	7.15		
		6	7.93	5.03	6.12	6.26	39.19	146	5.78	1.11	6.40		
		7	8.41	3.76	7.33	5.92	35.09	135	9.58	1.08	10.34		
		8	7.16	4.26	6.46	5.92	35.04	143	7.87	1.08	8.49		
		9	5.25	3.74	4.17	4.46	19.86	132	9.43	0.95	8.95		
		10	8.19	4.71	7.32	6.63	43.90	128	5.78	1.14	6.56		
C1 - M5	Pglf - Ld	1	4.21	3.50	3.93	4.18	17.51	103	8.40	0.92	7.75	7.10	170.36
		2	8.50	4.64	5.47	5.68	32.32	99	4.61	1.06	4.88		
		3	9.17	3.75	6.77	5.69	32.32	103	7.31	1.06	7.75		
		4	4.13	3.55	3.93	4.21	17.76	85	6.72	0.93	6.22		
		5	6.93	3.50	6.44	5.36	28.70	92	7.51	1.03	7.75		
		6	8.83	3.61	4.62	4.61	21.24	106	8.17	0.96	7.88		
		7	5.93	3.93	4.93	4.97	24.67	117	7.60	1.00	7.58		
		8	5.94	4.03	5.55	5.34	28.48	110	6.78	1.03	6.98		
		9	8.14	3.73	5.47	5.10	25.98	103	7.39	1.01	7.45		
		10	7.17	4.93	6.10	6.19	38.29	96	3.93	1.10	4.33		
C2 - M5	Pglf - A	1	4.42	4.50	4.46	5.06	25.55	17	0.85	1.00	0.85	3.24	77.65
		2	4.90	3.89	4.32	4.63	21.40	18	1.21	0.97	1.17		
		3	8.96	4.64	5.49	5.70	32.43	19	0.87	1.06	0.92		
		4	5.16	4.44	4.93	5.28	27.87	18	0.92	1.02	0.94		
		5	7.88	3.70	5.06	4.88	23.84	19	1.36	0.99	1.35		
		6	5.19	4.10	4.55	4.87	23.75	18	1.04	0.99	1.03		
		7	6.20	4.65	5.19	5.54	30.73	18	0.83	1.05	0.87		
C2 - M7	Pglf - A	1	76.40	61.00	59.50	67.98	4621.22	38.75	0.85	3.24	2.76	2.69	64.61
		2	69.00	62.50	64.80	71.81	5156.62	42.5	0.95	3.32	3.15		
		3	61.00	62.70	61.30	69.96	4893.71	32.78	0.88	3.28	2.87		
		4	62.00	59.50	62.00	68.53	4696.98	23.45	0.61	3.25	1.98		
C3 - M2	Pglf - A	1	6.26	4.28	5.74	5.59	31.28	22	1.20	1.05	1.26	1.39	33.39
		2	7.01	5.10	6.73	6.61	43.70	22	0.86	1.13	0.98		
		3	6.83	3.51	6.50	5.39	29.05	21	1.73	1.03	1.79		
		4	7.80	3.70	3.92	4.30	18.47	24	1.72	0.93	1.61		
		5	5.30	4.29	4.93	5.19	26.93	24	1.30	1.02	1.32		
		6	6.93	5.25	5.12	5.85	34.22	23	0.84	1.07	0.90		
		7	7.45	6.26	5.35	6.53	42.64	23	0.60	1.13	0.68		
		8	6.61	3.88	4.94	4.94	24.40	23	1.50	0.99	1.49		
		9	6.26	5.03	5.73	6.06	36.70	25	0.97	1.09	1.06		
		10	7.10	3.69	6.90	5.69	32.42	26	1.92	1.06	2.04		
Ap4 - M1	Pglf-Ld	1	64.60	66.70	49.20	64.64	4178.31	21.1	0.67	3.16	2.10	1.81	43.42
		2	84.60	83.70	63.20	82.07	6735.23	22.5	0.42	3.52	1.48		
		3	82.10	72.30	58.40	73.32	5376.02	30.4	0.63	3.35	2.12		
		4	85.80	81.40	61.60	79.90	6384.33	23.2	0.44	3.48	1.53		
S10 - M10	Pglf-Lm	1	45.00	43.00	43.00	48.52	2354.22	128.6	6.64	2.78	18.47	20.93	502.40
		2	44.00	45.00	45.00	50.78	2578.31	145.4	7.34	2.84	20.84		
		3	35.00	44.00	44.00	49.65	2464.99	128.8	8.36	2.81	23.49		
		4	37.00	43.00	43.00	48.52	2354.22	143.5	9.02	2.78	25.08		

Si bien son dos los depósitos: el Qarm1 y el Qarm2, el primero parte del armazón superior de la cimentación en el Centro de Convenciones, la escuela y la UPA, y el segundo forjador de las superficies libres aledañas al muro de gaviones, yacente al ingreso de San Juan, 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 Qarm1.

Su espesor varia entre las decenas de centímetros y los cuatro (4) metros (supuesto abstraído de los registros fotográficos de los informes de obra tanto del Centro de Convenciones como del Polideportivo, y de la prospección geológica). Carecen de trascendencia en la gestación de los procesos de inestabilidad, por menor que inhibió su investigación geotécnica. Su peso unitario es cercano a los 1.80 Ton/m^3 (supuesto), su humedad bordea el 59%, y sus coeficientes de resistencia pueden fijarse en: c'= 0.25 Ton/m^2 y ϕ'= 32º (datos asumidos).

TABLA 4.12 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 1: QSO

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		ML o MH y CL	
Contenido de Humedad, w (%)		25.95 – 192.51	Media a alta
Límite Líquido, LL (%)		29.63 – 86.40	Medio a alto*
Índice de Plasticidad, IP (%)		6.11 – 34.29	Bajo a alto**
Gravedad Específica, Gs		2.27 (Dudoso)	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m3)		1.51 – 2.01	
Peso Unitario Seco (Ton/m3)		0.84 - 1.60	
Granulometría	G (%)	0	
	A (%)	21.20	
	F (%)	76.60	
Resistencia a la Compresión Simple, q_u (Kg/cm^2)		0.25 – 1.50 (Penetrómetro)	Media a firme**
Cohesión, c (Kg/cm2)		0.00 (SPT)	
Ángulo de Fricción, ϕ (°)		26.50 (SPT)	

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

4.2.1.3 MATERIAL 3: DEPÓSITOS COLUVIALES, Q_{CO}

Congrega los cuerpos de los principales deslizamientos. Son, casi esencialmente, arcillosos, aunque tienen participación algunos cantos y bloques de areniscas y limolitas, y residuos sólidos, residentes sólo en el DT-002A (véase el *Anexo C.4*); matriz soportados; mal gradados, y de similar composición (por lo menos en la matriz) a los suelos residuales (i.e el Qpglf-Ld-sr y el Qpglf-Lm-sr), aunque difieren de ellos en los parámetros de resistencia, los que están más ligados a los residuales: el deterioro de las masas y las deformaciones acumuladas así lo ratifican. Su espesor toca los 2.00 metros; su color dominante es el café claro, aunque encierra manchas grises; su consistencia y su comprensibilidad son medias, su plasticidad se enmarca en el dominio bajo, y se clasifican como CL.

Junto con el Qpglf-Ld-sr y el Qpglf-Lm-sr, son el universo de materiales de mayor susceptibilidad, y los nichos de incubación de los procesos de inestabilidad. Residen en las márgenes de la quebrada San Juan 1, y pueden cobijar el cinturón sur de San Juan (abajo de la cota 3502 msnm en la vertiente derecha o de la 3512

msnm en su par de la izquierda), hoy cubierto por los paquetes residuales, pues son ellos su fuente creadora. En la *Tabla 4.13* se relacionan sus características más relevantes.

TABLA 4.13 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 3: QCO

PROPIEDAD	VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)	CL	
Contenido de Humedad, w (%)	16.60 – 28.37	Bajo a medio
Límite Líquido, LL (%)	30.23 – 33.10	Medio*
Índice de Plasticidad, IP (%)	8.90 – 12.70	Bajo**
Gravedad Específica, Gs	2.53 – 2.66	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m3)	1.99	
Peso Unitario Seco (Ton/m3)	1.71	
Resistencia a la Compresión Simple, q_u (Kg/cm^2)	0.54	Media*
Cohesión, c (Kg/cm2)	0.05 (CD, T1M1) – 0.14 (CD, T1M1)	
Ángulo de Fricción, ϕ (°)	33.40 (CD, T1M1)	

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

TABLA 4.14 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 4: QPGLF-LD-SR Y QPGLF-LM-SR

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		CL – ML	
Contenido de Humedad, w (%)		14.26 – 68.40	Medio a alto
Límite Líquido, LL (%)		26.65 – 49.12	Medio*
Índice de Plasticidad, IP (%)		6.25 – 15.07	Bajo a medio**
Gravedad Específica, Gs		2.41 – 2.63	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m3)		1.58 – 2.08	
Peso Unitario Seco (Ton/m3)		0.99 – 1.66	
Granulometría	G (%)	0.00 – 5.30	
	A (%)	5.30 – 43.50	
	F (%)	56.50 – 94.70	
Resistencia a la Compresión Simple, q_u (Kg/cm^2)		0.35 – 1.70	Blanda a Firme**
Esfuerzo de Expansión (Kg/cm^2)		0.28 – 0.69	Marginal***
Cohesión, c (Kg/cm2)		0.00 (SPT) – 0.29 (CD, S3M11)	
Ángulo de Fricción, ϕ (°)		23 (S1M5) - 32.70 (CD, S6M3)	

* FUENTE: GÓMEZ N. JOSÉ (2008). ** FUENTE: SOWERS G. F. (1979), CITADO POR KULHAWY AND MAYNE (1990). *** FUENTE: INVIAS (2007)

4.2.1.4 MATERIAL 4: SUELOS RESIDUALES DE LA FORMACIÓN FUSAGASUGA, $Q_{PGLF-LM-SR}$ Y $Q_{PGLF-LD-SR}$

Si bien genéticamente provienen de materiales parentales diferentes, la composición de la matriz -predominantemente arcillosa-, y la similar respuesta mecánica del esqueleto mineral permiten agruparlos como un solo material. Responden a suelos arcillosos o limosos, propios del horizonte IC del perfil de meteorización de Deer y Patton (1971), que contienen vestigios de roca del tamaño grava o superior, provenientes de la lodolita o de la limolita. Modelan el relieve en el que se levanta el centro urbano (lo que significa las casi dos terceras partes del espacio de estudio: San Juan), y reposan cubiertos por los rellenos antrópicos mixtos o por los depósitos coluviales, y en horizontes de hasta once (11) metros, según lo ratifican las perforaciones S-1, S-3, S-4, S-6 y S-10. Exhiben colores grises, cafés claro y naranjas con manchas verdes, rojas y grises. Tienen plasticidad entre baja y media, la humedad es modalmente media, empero su máximo bordea el 68%, la compresibilidad es media, y la consistencia recurrente trasiega de blanda a media, pero alcanza umbrales de firme (véanse las muestras S3M4, S5M8, S7M3 y A10M1, en la *Tabla 4.9* y en *Tabla 4.10*), que parecen estar aunados a remanentes (alterados) de la roca, y se clasifican como CL o ML (según la USCS). En la *Tabla 4.14* se definen sus parámetros relevantes.

4.2.2 MACIZO ROCOSO

Está integrado por las unidades líticas de la Formación Fusagasugá, principalmente por intercalaciones de lodolitas (paquete que incluye las limolitas) y areniscas diseminadas a lo largo y ancho de las superficies libres. Sus espesores variables en esencia, divagan desde los tres metros hasta los cincuenta (50) metros (expresión marcada por la unidad Pglf-Ld superior). 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 5: Lodolitas y Limolitas de la Formación Fusagasugá, P_{glf-Ld} y P_{glf-Lm}

En esta denominación se acopian tres grandes horizontes indiferenciados entre lodolitas y limolitas, discriminados por su litología y por su grado de litificación. Su color es gris violeta con manchas habanas y ocres o grises, rojo con trazas violetas, o gris con trazas y vetas rojas o violetas. Son de humedad baja a media y de resistencia muy blanda a moderadamente dura.

Configuran buena parte de la columna estratigráfica y la base de los sondeos S-1, S-3, S-4, S-5, S-6 y S-10. Atenuante que les otorga protagonismo y los revela como elementos constitutivos por excelencia (honor compartido con los suelos residuales) de la mayor parte de las laderas vertientes. Son los cuerpos rocosos de mayor resistencia (basta con observar la resistencia a la compresión simple en la muestra S10M10 en la *Tabla 4.11*) y de mayor potencial de degradación; su ángulo de fricción básico bordea los veintiocho grados y su respuesta mecánica está regida por los planos de discontinuidad, en especial por la estratificación. Son los receptores de los potenciales procesos de inestabilidad.

A pesar de las diferencias constitutivas, en sus propiedades mecánicas y en 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 4.15* condensa algunas de las más importantes.

TABLA 4.15 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 5: PGLF-LD Y PGLF-LM

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Clasificación (USCS)		CL	
Contenido de Humedad, w (%)		2.54 – 21.60	Bajo a medio
Límite Líquido, LL (%)		18.03 – 33.70	Bajo a medio
Índice de Plasticidad, IP (%)		8.88 – 13.60	Medio
Gravedad Específica, Gs		2.45 (dudoso)	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)		1.71 – 2.52 (2.17 promedio)	
Peso Unitario Seco (Ton/m^3)		1.68 – 2.46	
Granulometría	G (%)	0.00	
	A (%)	4.70 – 25.90	
	F (%)	74.10 – 95.30	
Resistencia a la Compresión Simple, σ_c (Kg/cm^2)		43.42 – 502.40	Muy Blanda a moderadamente dura*
Cohesión, c (Kg/cm^2)		0.06 (CD, C2M5) – 0.56 (CD, S10M11)	
Angulo de Fricción, ϕ (°)		28.30 (CD, C1M5) – 39.90 (CD, C2M5)	

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

TABLA 4.16 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL MATERIAL 6: PGLF-A_1 Y PGLF-A_2

PROPIEDAD		VALOR	CALIFICACIÓN
Contenido de Humedad, w (%)		0.72 – 9.20	Bajo
Gravedad Específica, Gs		-	
Peso Unitario Húmedo (Ton/m^3)		1.75 – 2.21 (1.98 promedio)	
Peso Unitario Seco (Ton/m^3)		1.73 – 2.17	
Granulometría	G (%)	0.00 – 60.30	
	A (%)	28.20 – 55.10	
	F (%)	11.50 – 45.10	
Resistencia a la Compresión Simple, σ_c (Kg/cm^2)		4.34 – 191.02	Muy Blanda a blanda*
Cohesión, c (Kg/cm^2)		0.26 (CD, C1M3) – 0.71 (CD, C3M2)	
Angulo de Fricción, ϕ (°)		38.60 (CD, C1M3) – 38.90 (CD, C3M2)	

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

4.2.2.1.2 Material 6: Areniscas de la Formación Fusagasugá, P_{GLF-A1} y $P_{PGLF-A2}$

Son friables, en algunos casos arcillosas (esto último más como respuesta de su composición mineralógica que de su naturaleza lítica), y de color gris claro a oscuro. Están compuestas por cuarzo (40%), líticos (30%) y feldespatos (30%). El tamaño del grano oscila entre medio y fino, la selección es mala, la humedad es baja, el grado de litificación es alto, y la resistencia trasiega los dominios de muy blanda a blanda (ISRM, 1981, citado por González Vallejo, 2004), aunque se acentúa en blanda. Debido a su posición estructural, gobernada por buzamientos inferiores a los doce grados; al contexto morfoestructural, estructural-denudacional por excelencia, representado en laderas residuales; y a las escasas exposiciones de los macizos rocosos, excepto tal vez por las del corredor vial San Juan–La Unión (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 4.16*).

4.2.2.2 DISCONTINUIDADES

Descripción Geométrica y Física

Las discontinuidades son descritas a partir de la información obtenida en los afloramientos, y de las columnas estratigráficas (ligadas 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 84 datos estructurales (orientación y buzamiento de estratificación y diaclasas) con una cobertura de diecisiete (17) 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 C.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 4.8*). De allí fue posible precisar la tendencia general de las familias de discontinuidad y concluir que las laderas vertientes pertenecen a cuatro regiones estructurales o subdominios, diferenciados sólo en la disposición del plano de estratificación constituidos por seis familias de discontinuidades, incluida la estratificación, y representadas por sus promedios así: E_1:300/10, D_2:171/78, D_3:160/73, D_4:275/90, D_5:120/66, D_6:220/87, y D_7:45/70, si se trata de las regiones I y IV; E_1:284/02, D_2:171/78, D_3:160/73, D_4:275/90, D_5:120/66, D_6:220/87, y D_7:45/70, en lo que atañe al subdominio II; y E_1:145/10, D_2:171/78, D_3:160/73, D_4:275/90, D_5:120/66, D_6:220/87, y D_7:45/70, si de la región III se trata. El resumen de las familias obtenidas se recopila en la *Figura 4.9*.

Los cambios de polaridad en la estratificación, significativos por demás, revelan el matizado replegamiento de la secuencia estratigráfica, regido por el flanco oriental del Sinclinal de San Juan y condicionado por la falla Tasajeras, empero moldeado por bajos ángulos de buzamiento (inferiores a los 12°) irradiados en los casi 360°. La densidad máxima supera el 40%, expresión que ratifica su confiabilidad, y alrededor del centro de la estereofalseta (recuérdese que es un diagrama polar) y el buzamiento en ningún caso supera los 25°, propio de registros aislados, aunque se enfatiza en la posición horizontal. Respuesta similar recae en las familias de diaclasas, la dispersión es tanto mayor al punto de tener una alta diseminación estereográfica, y bajos porcentajes de concentración: densidad (en parte explicados por los pocos registros), característica que da pie a suponer una clara influencia tectónica, hipótesis de ninguna manera demostrable, pero latente.

FIGURA 4.8 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

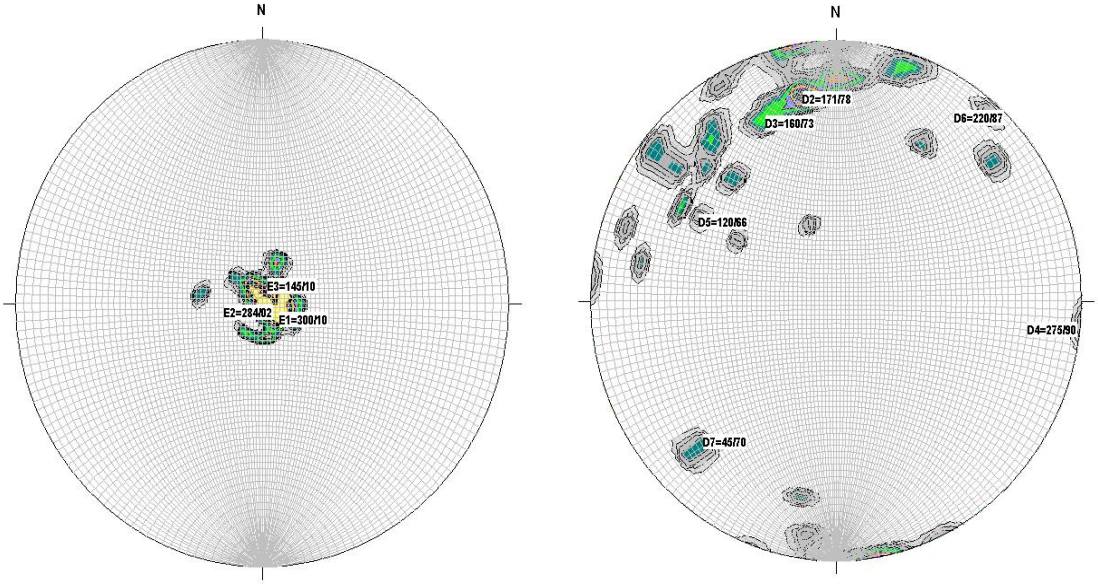
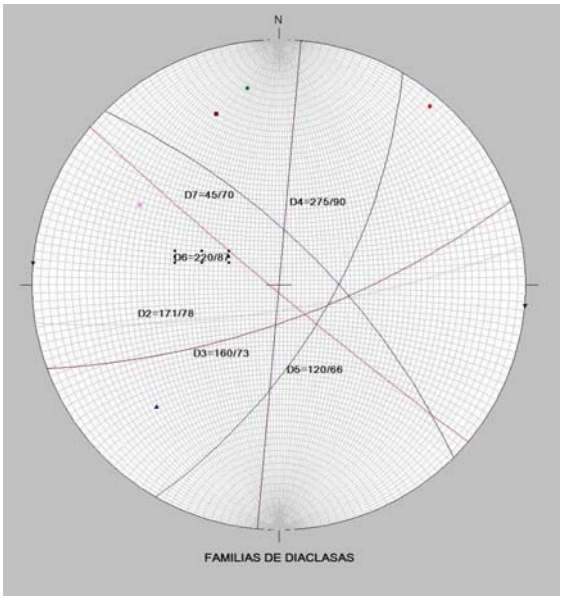


FIGURA 4.9 RESUMEN DE LAS FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES



Las familias de diaclasas exhiben espaciamientos (S) entre bastante próximas a separadas; persistencia (P) discontinua, 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, y ondulado rugoso (con JRCs entre 8 y 12) en lo que atañe a las diaclasas. Operan secas (expresión posiblemente ligada a la condición climática en la que se adelantó la investigación: verano rector del fenómeno del niño) ondulado-suave. El *Anexo C.2* contiene las características de las familias de discontinuidades abstraídas 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 los datos correspondientes a las propiedades geomecánicas se muestran en la *Tabla 4.17*.

TABLA 4.17 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL MACIZO ROCOSO

MATERIAL	INTERCEPTO DE COHESIÓN c (Ton/m²)	ANGULO DE FRICCIÓN ϕ (°)
Pglf-Ld	0.6 – 5.6	28.30 – 39.90
Pglf-A	2.6 – 7.5	38.60 – 38.90

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 4.9*, en la *Tabla 4.10* y en la *Tabla 4.11*, y el segundo ilustrado en el *Anexo C.2*. El RQD se estima bien de los registros de perforación (con valores entre el 40% y el 72%) 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: es el 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 4.18*, se compilan los extremos de la calificación y clasificación del macizo para ambos sistemas y en la *Tabla 4.21* 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 [35–50], lo que permite clasificarlo de pobre a regular.

TABLA 4.18 CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Región estructural / Criterio de evaluación		Dominio I, II		Dominio III y IV	
σ'_c (Kg/cm^2)	Valor	43,4	177,0	33,4	191,0
	Calificación/15	1	2	1	2
RQD (%)	Valor	40	72	40	90
	Calificación/20	8	13	8	20
S (m)	Valor	0,3	2	0,3	2
	Calificación/30	20	25	20	25
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	52	41	59
	Descripción	Macizo regular	Macizo regular	Macizo regular	Macizo regular
GSI		35	50	50	60

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 4.2.2.3 la resistencia a la compresión inconfinada (43.42 kg/cm^2 $\leq \sigma_c \leq$ 502.40 kg/cm^2), 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 4.19* y en la *Tabla 4.20*. 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 la de las discontinuidades y adoptar sus parámetros de resistencia. De esta manera, con miras a los

análisis de estabilidad, los parámetros empleados son los consignados para los ambientes citados en el numeral 4.2.2.2.

TABLA 4.19 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

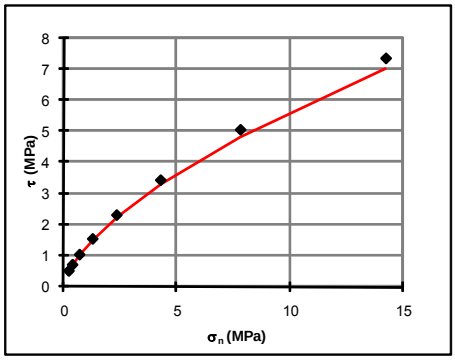
ENVOLVENTE DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Datos:

GSI = 50 σ_{ci} (MPa) = 17,7 mi= 9 Material: Areniscas y lodolitas

Resultados

m_b/m_i =	0,17
m_b =	1,509
s =	0,00387
a =	0,50
σ_t =	-0,045
A =	1,3
B =	0,63
E =	4207



Ángulo de fricción y cohesión para diferentes esfuerzos normales :

σ_n =	0,2	MPa
τ =	0,41	MPa
ϕ =	56,7	Grados
c =	0,11	MPa
σ_n =	0,5	MPa
τ =	0,81	MPa
ϕ =	47,3	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	$\tau_{calculado}$
0,07	1,82	8,64	0,25	0,21	0,53	-0,69	-0,27	0,19	0,47	0,56
0,14	2,35	7,03	0,41	0,37	0,73	-0,43	-0,14	0,06	0,19	0,77
0,28	3,21	5,55	0,72	0,68	1,05	-0,17	0,02	0,00	0,03	1,09
0,55	4,55	4,34	1,30	1,26	1,56	0,10	0,19	0,02	0,01	1,57
1,11	6,65	3,41	2,36	2,32	2,32	0,37	0,37	0,13	0,13	2,29
2,21	9,98	2,72	4,30	4,25	3,44	0,63	0,54	0,34	0,40	3,33
4,43	15,35	2,22	7,82	7,77	5,06	0,89	0,70	0,63	0,79	4,84
8,85	24,26	1,87	14,23	14,18	7,35	1,15	0,87	1,00	1,33	7,04
					Σ=	1,85	2,28	2,36	3,35	

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 establecen zonas de comportamiento geotécnico similar tanto en la conformación como en la dinámica de las laderas, lo que se logra 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 transcrito en la *Tabla 4.21*).

TABLA 4.20 PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO (CONTINUACIÓN)

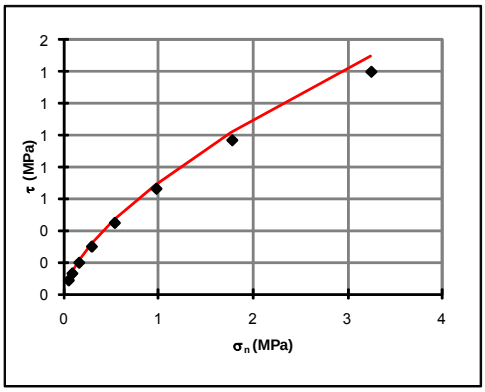
ENVOLVENTE DE RESISTENCIA DEL MACIZO ROCOSO

Datos:

GSI = 35 σ_{ci} (MPa) = 4,34 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 = 879



Ángulo de fricción y cohesión para diferentes esfuerzos normales :

σ_n = 0,2 MPa
τ = 0,24 MPa
ϕ = 38,5 Grados
c = 0,08 MPa

σ_n = 0,5 MPa
τ = 0,44 MPa
ϕ = 29,9 Grados
c = 0,15 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	0,30	7,83	0,05	0,05	0,09	-1,35	-1,05	1,41	1,81	0,10
0,03	0,41	6,06	0,09	0,08	0,13	-1,08	-0,88	0,95	1,16	0,14
0,07	0,59	4,66	0,16	0,16	0,20	-0,81	-0,70	0,56	0,65	0,21
0,14	0,87	3,62	0,29	0,29	0,30	-0,54	-0,52	0,28	0,29	0,31
0,27	1,30	2,87	0,54	0,53	0,45	-0,27	-0,35	0,09	0,07	0,47
0,54	1,99	2,32	0,98	0,97	0,66	-0,01	-0,18	0,00	0,00	0,69
1,09	3,13	1,94	1,78	1,78	0,97	0,25	-0,01	0,00	0,06	1,01
2,17	5,06	1,66	3,25	3,25	1,40	0,51	0,15	0,07	0,26	1,50
						Σ=	-3,29	-3,55	3,37	4,30

Adaptado de Hoek, 1994

Las cuatro primeras variables están contempladas en las zonas geomorfológicas, que condensan unidades de ladera con morfología, morfogenética, materiales y morfometría similares. La quinta variable (condición estructural) contrario al amplio número de regiones estructurales posee poca incidencia debido a que el comportamiento geométrico (restringida por el bajo buzamiento de la estratificación: inferior a los 15°) 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 callamiento (de ninguna manera comprobado pero latente), 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: Qarm, y en el suelo residual : Qpglf-Ld.sr). 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 uno arábigo: el primero (número romano o letras) reseña el subdominio estructural, y el segundo –arábigo ascendente- opera 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 "Ladera Estructural Intervenida": LEI se discretizó en LEI-III-1 y LEI-III-2, en la que cada una congrega unidades con mecanismos de falla similar, separadas espacialmente.

Mención particular merece la unidad: "Contrapendiente Estructural Intervenida en laderas de suelo residual CEI-Lsr que se subdividió en: CEI-Lsr-I-1, DEI-Lsr-I-2, CEI-Lsr-I-3, CEI-Lsr-I-4, CEI-Lsr-I-5 y CEI-Lsr-I-6, acorde con el material subyacente y el estado del macizo; los cuerpos potenciales de deslizamiento se forjan y desarrollan exclusivamente en la cubierta residual, indiferentemente del material subyacente, y el estado del macizo carece de repercusión en la gestación de las masas inestables. Es el ambiente, desde la óptica morfodinámica, crítico por excelencia.

La conjunción de los elementos anteriores dio como resultado la división de la porción de la vertiente en veintiocho (28) zonas homogéneas, que son estudiadas por lo menos con una sección de análisis, sí y sólo sí exista la posibilidad de gestación de procesos de inestabilidad. En este sentido las subunidades CEI-eradu-I-1, CEI-esrdu-I-3, CEI-esrdu-I-2 y CENI-sr-IV-2, por sus bondades geométricas, traducidas en planicies con buzamientos inferiores a los cinco grados, talladas en espesas cubiertas de suelo residual son abstraídas. La sinopsis del trabajo de zonificación se encuentra en la *Tabla 4.21* 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.

TABLA 4.21 ZONAS HOMOGÉNEAS

SÍMBOLO DE LA ZONA HOMOGÉNEA	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	MORFOLOGÍA	ORIGEN	SECUENCIA LITOLÓGICA	DISCONTINUIDADES*	REGIÓN ESTRUCTURAL	GSI	MECANISMO DE FALLA
CENI-IV-1	CENI	Casi plano a moderadamente inclinado (08° - 18°)	Estructural Denudativo	Qpglf-Lm-Sr Pglf-A Pglf-Lm	E1=300/10 D2=171/78 D3=160/73 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	IV	40-50	Falla planar y Falla en cuña
CENI-IV-2								
CENI-IV-3								
CENI-Sr-IV-1	CENI-Sr			Qpglf-Lm				
CENI-Sr-IV-2								
LEI-III-1	LEI	Moderada a ondulada (08° - 30°)	Estructural Denudativo	Pglf-A Pglf-Lm Pglf-Ld	E1=145/10 D2=171/078 D3=160/173 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	III		
LEI-III-2								
LEI-II-1	LEI	Moderada a ondulada (08° - 30°)	Estructural Denudativo	Pglf-A Pglf-Lm Pglf-Ld	E1=284/02 D2=171/078 D3=160/173 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	II	35-45	Falla planar y Falla en cuña
LEI-II-2								
CENI-Lsr-I-1	CENI-Lsr	Moderadamente inclinado a moderadamente ondulado (15° - 30°)	Estructural Denudativo	Pglf-Lm Qpglf-Ld-sr Pglf-Ld	E1=300/10 D2=171/078 D3=160/173 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	I	35-50	Deslizamientos Rotacionales y Traslacionales
CEI-Lsr-I-1	CEI-Lsr	Moderadamente inclinado a moderadamente ondulado (15° - 30°)	Estructural Antrópico	Qpglf-Ld-sr Pglf-Ld Pglf-A Pglf-Lm				
CEI-Lsr-I-2								
CEI-Lsr-I-3								
CEI-Lsr-I-4								
CEI-Lsr-I-5								
CEI-Lsr-I-6								
CEI-Lsrt-I-1	CEI-Lsrt	Moderadamente inclinado a moderadamente ondulado (15° - 30°)	Estructural Antrópico	Qco Pglf-Ld Pglf-Lm Qpglf-Ld-sr				
CEI-Lsrt-I-2								
CEI-trat-I-1	CEI-trat	Moderadamente ondulado a escarpado (30° - >45°)	Estructural Antrópico	Qco Qpglf-Ld-sr Pglf-Ld Pglf-Lm				
CEI-eradu-I-1	CEI-eradu	Plano a casi plano (0° - 5°)	Estructural Antrópico	Qarm Qpglf-Ld-sr Pglf-Ld Pglf-Lm				No hay posibilidad de gestación de movimiento pues su morfología es plana o con ángulos inferiores o iguales a 5°
CEI-esrdu-I-1	CEI-esrdu	Plano a casi plano (0° - 5°)	Estructural Antrópico	Qarm Qpglf-Ld-Sr Pglf-Ld Pglf-A Pglf-Lm				
CEI-esrdu-I-2								
CEI-esrdu-I-3								
CEI-esrdu-I-4								
CEI-esrdu-I-5								
* Planos reportados en Azimut de Buzamiento / Buzamiento								

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 PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

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 la plancha topográfica 265-IV-A del IGAC (1967).
- Consulta en el IDEAM de la información hidrológica de la microcuenca. Información recolectada en la estación pluviométrica San Juan, cuyas características se relacionan a continuación:

ESTACIÓN	COORDENADAS		CATEGORIA	ELEVACIÓN	CÓDIGO
	ESTE	NORTE			
SAN JUAN	973693.4	937365.1	PM	3524.4	2119027

- Análisis hidrológico e hidráulico

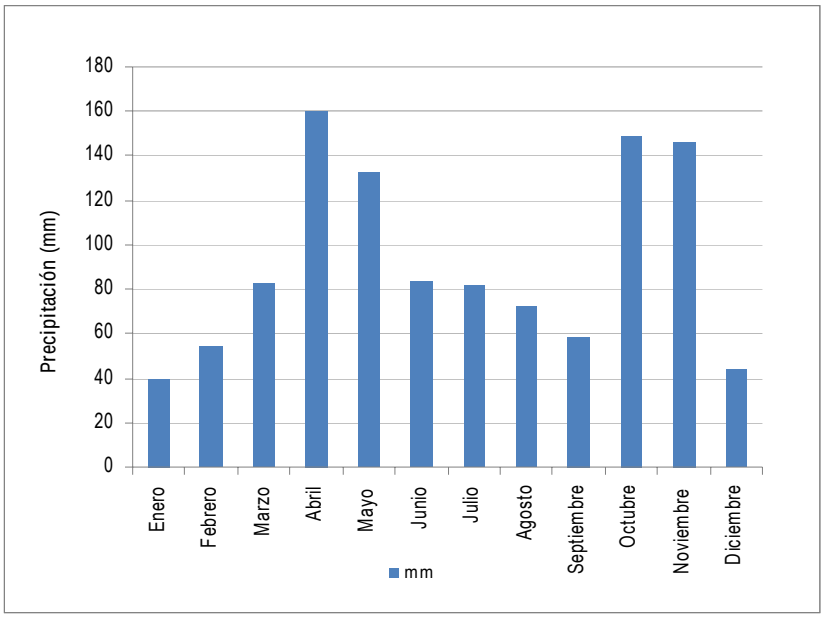
En el instituto Geográfico se obtuvo la plancha 265-IV-A a escala 1:25000, que cubre las laderas vertientes receptoras del centro poblado; sobre la plancha se delimitaron las microcuencas, de las corrientes principales. La información cartográfica se complementó con visitas de campo y con el levantamiento topográfico.

5.1.2 CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA

La caracterización climatológica, está soportada en los registros de las estaciones dispuestas o próximas a San Juan de Sumapaz y en la información secundaria disponible; sin embargo, pocos son los réditos: los documentos técnicos brillan por su ausencia, la precipitación es el único parámetro climatológico monitoreado y la estación San Juan (código 2119027; Lat. 04º01'; Long. 74º18') es la fuente exclusiva.

San Juan recibe una descarga media anual de 1102.8 mm, distribuida en dos periodos de lluvias mínimas (veranos) una entre diciembre y febrero, y el otro desde julio hasta septiembre, y dos periodos de lluvias máximas; el primero desencadenado entre marzo y junio, y el segundo a lo largo de los meses de octubre y noviembre.

FIGURA 5.1 VARIACIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (ESTACIÓN SAN JUAN)



El verano más intenso concuerda con el primer trimestre seco del año; en él, la precipitación mínima tiene lugar durante el mes de enero con 39.5 mm en promedio, equivalente al 3.6% de la precipitación media anual, y la lluvia acumulada en el período (diciembre, enero y febrero) es apenas del 12.5% del total medio anual.

El segundo periodo "seco" (apodado así aunque la lluvia hace presencia) recoge el 19.2% de la precipitación media anual, el 5.3%, es decir 58.5 mm sólo en septiembre.

Las mayores lluvias caen entre marzo y junio, lapso de tiempo en el que el acumulado toca el 41.6% de la media anual, y el máximo se alcanza en abril con un promedio mensual de 160.1 mm (cantidad cercana al 14.57% de la media anual). El segundo periodo invernal recoge el 26.7% del acumulado medio anual, y más de la mitad: 148.7 mm se precipita en octubre.

5.1.3 PRECIPITACIONES DE CORTA DURACIÓN

El primer paso, entonces, para la construcción de las curvas IDF, implica la configuración de la serie anual de precipitación máxima, tarea adelantada gracias a los registros máximos mensuales, y compilada en la *Tabla 5.1*.

El análisis estadístico de la serie, se lleva a cabo al ajustar los registros a una función de distribución de probabilidad, en este caso la Gumbel Tipo I, que puede expresarse como:

$$P\max = 40.42 - \frac{18.09}{0.9833}\left\{0.5035 + \ln\left(\ln\left(\frac{Tr}{Tr-1}\right)\right)\right\}$$

en la que:

Pmax.- es la precipitación máxima en 24 horas en mm.
Tr.- es el período de retorno en años.

TABLA 5.1 SERIE HISTÓRICA DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA (MM) ESTACIÓN SAN JUAN

ORDEN	PMAX(MM)
1	52
2	80
3	17.3
4	65
5	32.5
6	42.6
7	35
8	31.2
9	23.2
10	31
11	47
12	28.2

Definida la función de probabilidad se deducen las precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno, espectro compilado en la *Tabla 5.2*. Conocidas estas últimas, se elaboran las curvas de Precipitación – Duración – Período de Retorno, labor que se soporta en los hallazgos de investigadores como: B.M. Reich,

D.M. Hershfield, L.L. Weiss y W.T. Wilson[1], que proponen que las relaciones duración – lluvia obtenidas en Estados Unidos y otros países, pueden ser aplicadas en otras regiones del mundo, con localizaciones y climas variados.

TABLA 5.2 PRECIPITACIÓN MÁXIMA PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

TR (AÑOS)	P MÁX. (MM/24 HORAS)
2.33	41.8
5	58.7
10	72.6
15	80.3
20	85.8
25	90.0
50	102.9
100	115.8

En este sentido el Departamento Meteorológico de los Estados Unidos (U.S. Weather Bureau) y otros autores, plantean han concluido que: "La lluvia de t minutos de duración tiene un cociente o relación estable con la lluvia de una hora y mismo período de retorno". Al respecto, F.C. Bell reporta algunas relaciones para duraciones cortas, indicando que tales cocientes son independientes del período de retorno, y D.M. Hershfield y W.T. Wilson sugiere relaciones entre la lluvia de 1 hora y la de 24 horas, para una amplia variedad de climas del mundo, así:

DURACIONES, EN MINUTOS						
5	10	15	30	45	60	120
0.30	0.45	0.57	0.79	0.91	1.00	1.25

FUENTE:F.C. BELL

NÚMERO MEDIO DE DÍAS CON LLUVIA AL AÑO.	1	8	16	24
RELACIÓN ENTRE LA LLUVIA DE 1 HORA Y 24 HORAS.	0.20	0.30	0.40	0.50

FUENTE: D.M. HERSHFIELD Y W.T. WILSON

Al concatenar el marco teórico expuesto se obtienen las curvas Precipitación – Duración – Periodo de Retorno

[1] A.C. Goswami. "Short Duration Rainfall Depth-Duration-Frequency Map of India". Proceedings of the Second International Symposium in Hydrology. Fort Collins, Colorado, USA 1972.

e Intensidad – Duración – Periodo de Retorno; unas y otras sintetizadas en la *Tabla 5.3*, en la *Tabla 5.4*, en la *Figura 5.2* y en la *Figura 5.3*. Instrumentos indispensables para el cálculo de los caudales máximos.

TABLA 5.3 PRECIPITACIÓN – DURACIÓN – TR.

Tr (años) \ Duración (mín)	5	10	15	30	45	60	120	1440
2.33	5.3	9.7	12.3	16.8	19.4	21.2	25.7	41.6
5	7.4	13.7	17.3	23.6	27.2	29.8	36.1	58.4
10	9.2	16.9	21.4	29.1	33.6	36.8	44.5	72.2
15	10.2	18.7	23.7	32.2	37.2	40.8	49.3	79.9
20	10.9	20.0	25.3	34.4	39.8	43.5	52.7	85.4
25	11.4	20.9	26.5	36.1	41.7	45.7	55.2	89.5
50	13.0	24.0	30.4	41.3	47.7	52.2	63.2	102.4
100	14.6	26.9	34.1	46.5	53.7	58.8	71.1	115.2

Nota: la precipitación se expresa en mm

FIGURA 5.2 CURVAS PRECIPITACIÓN – DURACIÓN – TR.

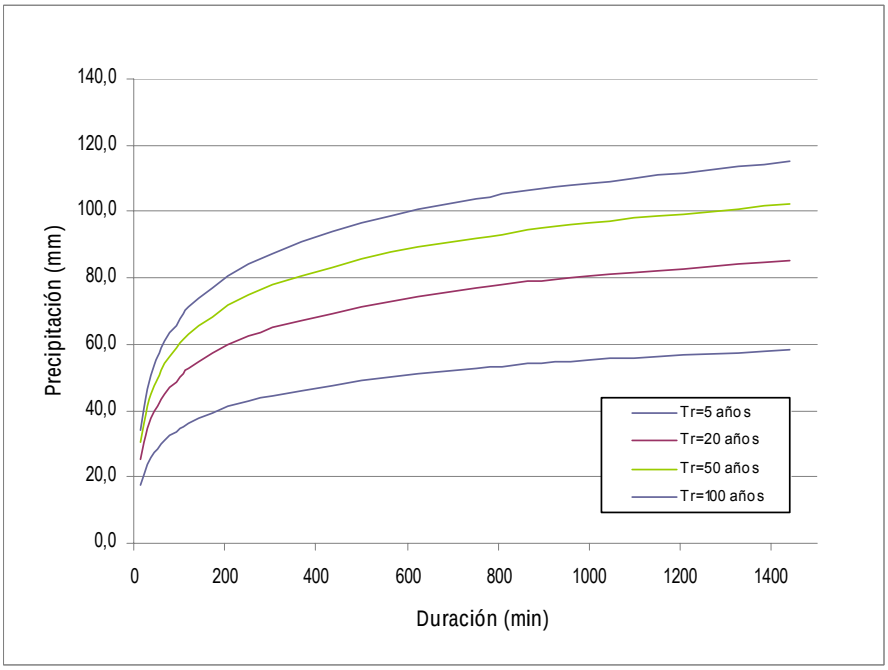
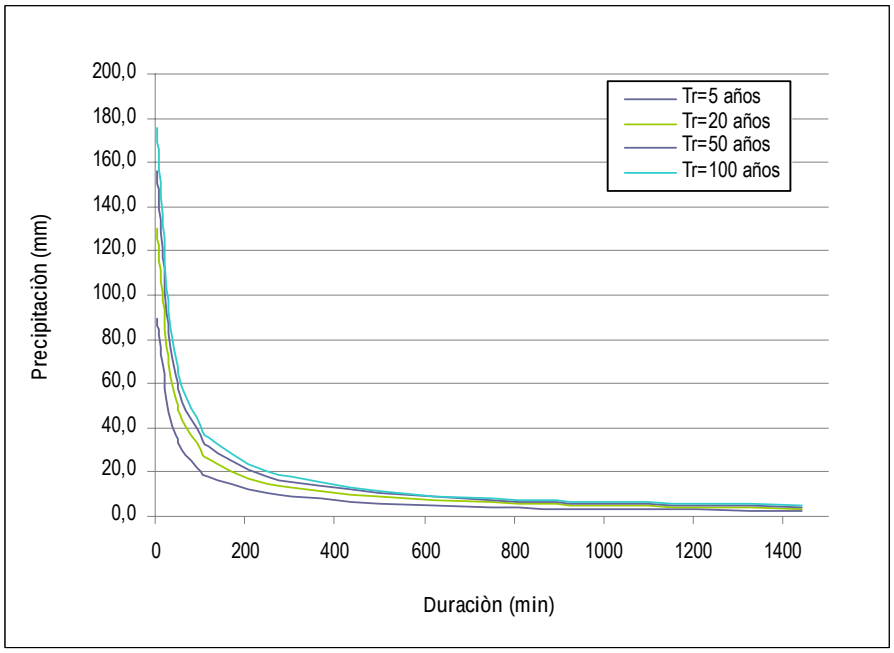


TABLA 5.4 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – TR.

Duración (mín) / Tr (años)	5	10	15	30	45	60	120	1440
2.33	63.4	58.4	49.3	33.5	25.8	21.2	12.8	1.7
5	89.2	82.0	69.3	47.1	36.3	29.8	18.0	2.4
10	110.1	101.3	85.6	58.2	44.8	36.8	22.3	3.0
15	121.9	112.2	94.8	64.5	49.6	40.8	24.7	3.3
20	130.2	119.8	101.2	68.8	53.0	43.5	26.3	3.6
25	136.6	125.7	106.2	72.2	55.6	45.7	27.6	3.7
50	156.2	143.8	121.4	82.6	63.6	52.2	31.6	4.3
100	175.7	161.7	136.6	92.9	71.5	58.8	35.5	4.8

NOTA: LA INTENSIDAD ES DADA EN MM/H

FIGURA 5.3 CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – TR.



5.1.4 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.

No obstante, la incierta fecha de detonación, en día y mes, de los deslizamientos (el DT-001A y el FT-001EC) hacen inoperante el empleo de los métodos de predicción lluvia-deslizamiento, como la curva de masa de precipitación acumulada antecedente (Castellanos R, 1996 y, González A y Zamudio E, 1999) y la regionalización. En este sentido y a fe de subsanar este impasse se recurre a métodos indirectos basados en el comportamiento hidrológico de las lluvias medias mensuales multianuales entre estaciones propias del mismo marco climático, es decir, con comportamiento similar en la precipitación, pero distantes en su ubicación geográfica. Tarea acometida a través del módulo de precipitación, definido como la relación entre la lluvia para un tiempo dado y la precipitación media para el mismo escenario de tiempo, y de la estandarización, que es la relación entre la lluvia para un instante determinado, y el promedio y la desviación estándar del espacio muestral para el mismo dominio temporal; apoyada en los registros de precipitación media mensual multianual de las estaciones Santa María de Usme y San Juan de Sumapaz, agrupados en el *Anexo E*; y abreviada en la *Figura 5.4* y en la Figura 5.5.

En este contexto es claro que hay una marcada sincronía en el comportamiento hidrológico de las dos estaciones; por lo tanto es factible adoptar para San Juan los valores de precipitación crítica, duración y periodo de recurrencia, de la estación Santa María de Usme, variables acotadas como:

Precipitación Crítica:	243.61 mm.
Duración:	32.2 días
Periodo de Recurrencia:	10.3 años

FIGURA 5.4 MÓDULO DE PRECIPITACIÓN ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SAN JUAN – SANTA MARÍA DE USME

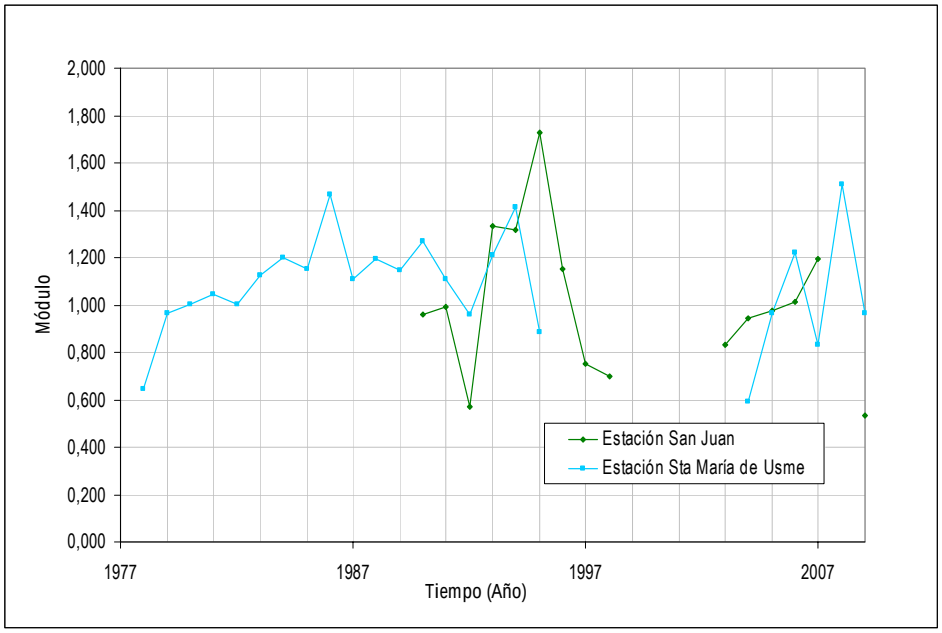
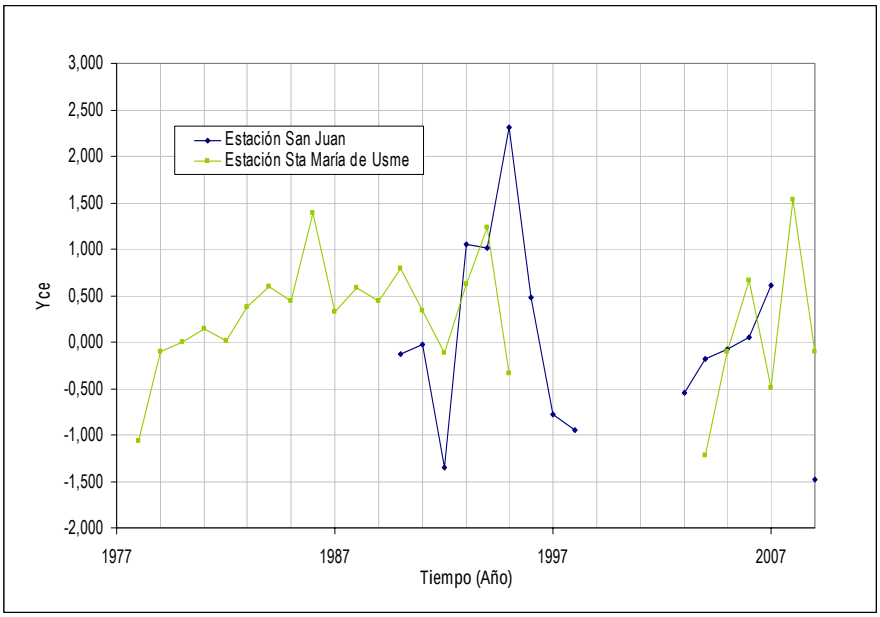


FIGURA 5.5 PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SAN JUAN – SANTA MARÍA DE USME



5.1.5 ANÁLISIS HIDRÁULICO

5.1.5.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LAS MICROCUENCAS

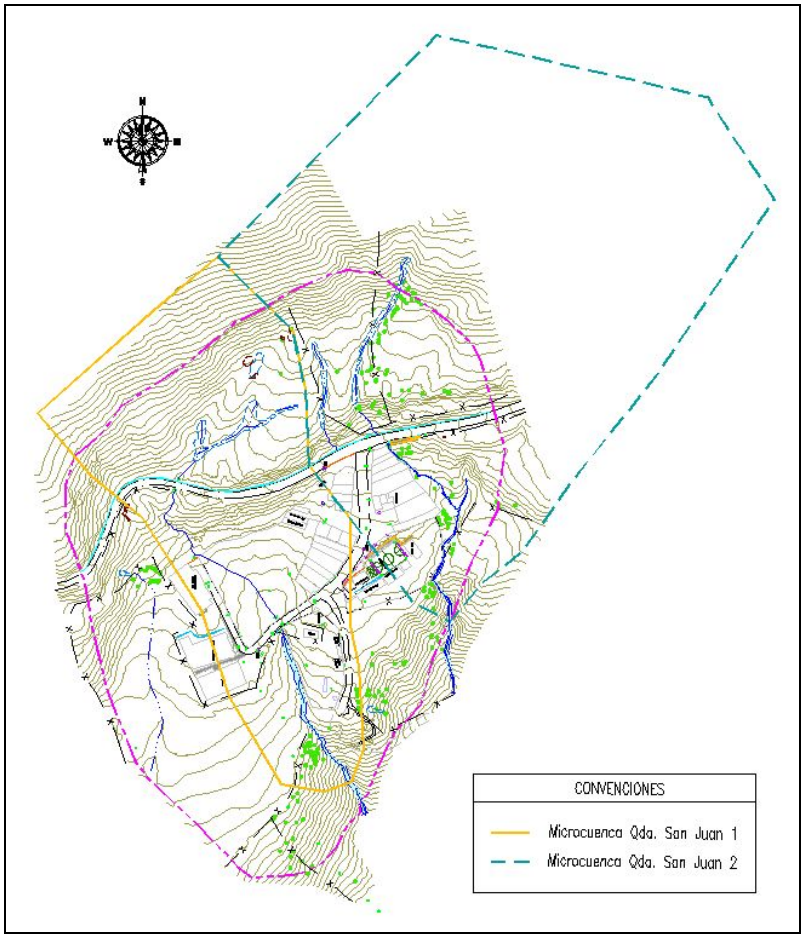
La ausencia de registros de niveles y caudales en los drenajes obliga al uso de métodos indirectos o aproximados, soportados en las características morfológicas de las microcuencas a fe de inferir la respuesta hidráulica en los cauces. Gran parte de las características físicas de una cuenca son reflejo de la acción del agua, hecho que permite plantear existe una fuerte relación entre las características morfométricas y las variables que describen su comportamiento hidrológico.

La delimitación de las microcuencas vertientes en San Juan se apoya en la cartografía del IGAC, escala 1:25.000, única disponible; y en el mapa base, escala 1:500 (producto del levantamiento topográfico en este proyecto). En cada microcuenca se obtuvo: el área (A), la longitud del cauce principal (L), y las cotas máxima y mínima de la microcuenca, insumos para obtener el desnivel total (H). La *Tabla 5.5* compila los resultados obtenidos, y la *Figura 5.6* ilustra la forma en planta.

TABLA 5.5 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LAS CUENCAS

Corriente	A (ha)	L (Km)	Cota Sup. (msnm)	Cota Inf. (msnm)	H (Km)
SAN JUAN 1	4.9	0.463	3630	3473	0.157
SAN JUAN 2	10.4	0.491	3630	3492	0.138

FIGURA 5.6 MICROCUENCAS DE LAS QUEBRADAS DEL CASCO URBANO



5.1.5.2 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DE LAS CUENCAS

El tiempo de concentración de las cuencas se estableció utilizando los criterios de Kirpich, US Army, Kerby y SCS, que se expresan como sigue:

Criterio de Kirpich

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

donde:

T_c: tiempo de concentración en horas.
L: longitud del cause principal en Km.
H: desnivel total del cause principal en Km.

Criterio de US Army

$$Tc = \frac{0.707(1.1 - C)\, L^{0.5}}{S^{1/3}}$$

donde:

Tc: tiempo de concentración en min.
C: coeficiente de escorrentía.
L: longitud del cause principal en m.
S: pendiente media del cauce principal en m/m.

Criterio de Kerby

$$Tc = 1.44\left(\frac{L\, m}{S^{1/2}}\right)^{0.467}$$

donde:

Tc: tiempo de concentración en min.
m: coeficiente que depende de la superficie.
L: longitud del cause principal en m.
S: pendiente media del cauce principal en m/m.

Criterio de SCS

$$Tc = \frac{L}{60\, a\, S^{1/2}}$$

donde:

Tc: tiempo de concentración en min.
a: coeficiente que depende de la superficie.
L.: longitud del cause principal en m.
S: pendiente media del cauce principal en m/m.

En cada caso se estableció un tiempo de concentración mínimo de 15 min, tal como lo sugiere la literatura técnica. Al aplicar los anteriores criterios en la cuenca de la quebrada San Juan 2, se obtienen los siguientes resultados:

Criterio	Valor (h)
KIRPICH =	0.06
KERBY =	0.45
US FAA =	0.31
SCS =	0.13
ADOPTADO =	0.38

Como se observa, los criterios de Kirpich y del soil conservation service (SCS) resultan demasiado pequeños; por lo que se tomó la decisión de adoptar el promedio de los resultados obtenidos con los dos criterios restantes, obteniendo 0.38 h para la cuenca de la quebrada San Juan 2. Por su parte, en el caso de la quebrada San Juan 1, se obtuvieron los siguientes resultados:

Criterio	Valor (h)
KIRPICH =	0.06
KERBY =	0.42
US FAA =	0.28
SCS =	0.11
ADOPTADO =	0.35

En este caso eliminamos del panorama los resultados de los criterios de Kirpich y del Soil Conservation Service (SCS) por resultar demasiado extremos, se promedia, entonces, el valor obtenido con Kerby y US FAA, y se concluye un valor para el tiempo de concentración de 0.35 h.

5.1.5.3 CAUDALES MÁXIMOS ESPERADOS

Las crecientes de diseño se determinan con base en la relación lluvia-cuenca-caudal, gracias al empleo del método racional, confiable para cuencas con áreas inferiores a las 100Ha., y dado por:

$$Q = 2.78\, C\, i\, A$$

donde:

Q: caudal máximo esperado en l/s.
C: coeficiente de escorrentía.
i: intensidad de la lluvia en mm/h.
A: área de la cuenca en ha.

El coeficiente de escorrentía de las cuencas se estima gracias a las condiciones específicas de la cobertura del suelo. Se asumen, entonces, coeficientes de 0.75 para el espacio poblado, por su cobertura dura que impide la infiltración y favorece la escorrentía, y de 0.35 para los corredores protegidos por cobertura vegetal. La intensidad de la lluvia se obtiene al hacer uso de las curvas de intensidad – duración – período de retorno para el período de 100 años.

Al aplicar el método racional se obtienen los siguientes resultados:

San Juan 1: Q_{100} = 0.512 m^3/s

San Juan 2 : Q_{100} = 1.0 m^3/s

Ahora bien, los estimativos obtenidos se basan en que la duración de la tormenta de diseño es igual al tiempo de concentración de la cuenca, considerablemente pequeño en San Juan, al punto que el de la Qda. San Juan 1 diagrama tc = 0.35, h = 21.0 min; y la Qda. San Juan 2 tc = 0.38, h = 22.8 min. Sin embargo, aún es posible que en San Juan y sus alrededores tengan lugar tormentas con duración de hasta 4 horas, se

contrastaron los caudales máximos con los obtenidos por el método del hidrograma unitario triangular; recomendado por el U.S. Bureau of Reclamation de los EEUU [2], cuyos parámetros básicos son:

Qp = 0.208 A Pe / tp
tp = D/2 + 0.6 Tc
Tb = 2.67 tp

donde:

Qp: caudal pico en m3/s.
A: área de la cuenca en Km2.
Pe: precipitación efectiva en mm.
tp: tiempo al pico en horas.
D: duración de la lluvia efectiva en horas.
Tc: tiempo de concentración en horas.
Tb: tiempo base en horas.

La precipitación efectiva (Pe), deduce con base en el método del Soil Conservation Service de los EEUU[3], que se traduce en:

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

donde:

Pe: precipitación efectiva en mm.
P: precipitación de tormenta de diseño en mm.
N: número del complejo hidrológico suelo – vegetación.

Dado que las microcuencas son pequeñas, la selección del número del complejo hidrológico (N) se concatenó a la condición tipo III, es decir, que la cuenca está saturada previo a que tenga lugar la tormenta de diseño, particularidad que arroja como números del complejo hidrológico (N):

Cuenca	N
SAN JUAN 1	88.5
SAN JUAN 2	87.8

Con el de los elementos previos se obtiene el hietograma de la tormenta de diseño con periodo de retorno de 100 años y de duración total de 4 h. La *Tabla 5.6*, la *Tabla 5.7*, la *Tabla 5.8* y la *Tabla 5.9* exponen los resultados obtenidos para los dos cauces.

[2] Bureau of Reclamation, U.S. "Diseño de Presas Pequeñas". Cap. 2
[3] Bureau of Reclamation, U.S. "Diseño de Presas Pequeñas". Cap. 2

TABLA 5.6 TORMENTA DE DISEÑO - QUEBRADA SAN JUAN 1 TR=100 AÑOS

t(h)	P(mm)	Pe(mm)	DH(mm)	H(mm)
0.12	21.4	4.6	4.6	1.0
0.24	33.5	12.1	7.5	1.1
0.36	40.6	17.2	5.1	1.3
0.48	45.6	21.1	3.9	1.6
0.6	49.5	24.2	3.1	2.0
0.72	52.7	26.8	2.6	2.6
0.84	55.4	29.1	2.2	3.9
0.96	57.7	31.0	2.0	5.1
1.08	59.7	32.8	1.7	7.5
1.2	61.6	34.3	1.6	4.6
1.32	63.2	35.8	1.4	3.1
1.44	64.7	37.1	1.3	2.2
1.56	66.1	38.3	1.2	1.7
1.68	67.4	39.4	1.1	1.4
1.8	68.6	40.5	1.1	1.2
1.92	69.8	41.5	1.0	1.1
2.04	70.8	42.4	0.9	0.9
2.16	71.8	43.3	0.9	0.9
2.28	72.8	44.1	0.8	0.8
2.4	73.7	44.9	0.8	0.8
2.52	74.5	45.7	0.8	0.8
2.64	75.3	46.4	0.7	0.7
2.76	76.1	47.1	0.7	0.7
2.88	76.8	47.8	0.7	0.7
3	77.5	48.4	0.6	0.6
3.12	78.2	49.0	0.6	0.6
3.24	78.9	49.6	0.6	0.6
3.36	79.5	50.2	0.6	0.6
3.48	80.1	50.7	0.6	0.6
3.6	80.7	51.3	0.5	0.5
3.72	81.3	51.8	0.5	0.5
3.84	81.8	52.3	0.5	0.5
3.96	82.4	52.8	0.5	0.5
4.08	82.9	53.3	0.5	0.5

T-TIEMPO; P-PRECIPITACIÓN; PE-PRECIPITACIÓN; DH-INCREMENTOS DE PRECIPITACIÓN; H-HIETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO

TABLA 5.7 TORMENTA DE DISEÑO - QUEBRADA SAN JUAN 2 TR=100 AÑOS.

t(h)	P(mm)	Pe(mm)	DH(mm)	H(mm)
0.13	22.8	4.9	4.9	1.3
0.26	34.9	12.3	7.4	1.6
0.39	42.0	17.4	5.1	1.9
0.52	47.0	21.2	3.8	2.6
0.65	50.9	24.3	3.1	3.8
0.78	54.1	26.8	2.6	5.1
0.91	56.8	29.1	2.2	7.4
1.04	59.1	31.0	1.9	4.9
1.17	61.1	32.7	1.7	3.1
1.3	63.0	34.3	1.6	2.2
1.43	64.6	35.7	1.4	1.7
1.56	66.1	37.0	1.3	1.4
1.69	67.5	38.2	1.2	1.2
1.82	68.8	39.3	1.1	1.1
1.95	70.0	40.4	1.0	1.0
2.08	71.2	41.3	1.0	1.0
2.21	72.2	42.3	0.9	0.9
2.34	73.2	43.1	0.9	0.9
2.47	74.2	44.0	0.8	0.8
2.6	75.0	44.8	0.8	0.8
2.73	75.9	45.5	0.8	0.8
2.86	76.7	46.2	0.7	0.7
2.99	77.5	46.9	0.7	0.7
3.12	78.2	47.6	0.7	0.7
3.25	78.9	48.2	0.6	0.6
3.38	79.6	48.8	0.6	0.6
3.51	80.3	49.4	0.6	0.6
3.64	80.9	50.0	0.6	0.6
3.77	81.5	50.5	0.5	0.5
3.9	82.1	51.0	0.5	0.5
4.03	82.7	51.6	0.5	0.5

T-TIEMPO; P-PRECIPITACIÓN; PE-PRECIPITACIÓN; DH-INCREMENTOS DE PRECIPITACIÓN; H-HIETOGRAMA DE LA TORMENTA DE DISEÑO

TABLA 5.8 HIDROGRAMA UNITARIO – QUEBRADA SAN JUAN 1. TR = 100 AÑOS.

t(h)	Q(m3/s)
0	0.00
0.12	0.02
0.24	0.04
0.36	0.03
0.48	0.02
0.6	0.01
0.72	0.00

TABLA 5.9 HIDROGRAMA UNITARIO - QUEBRADA SAN JUAN 2. TR = 100 AÑOS

t(h)	Q(m3/s)
0	0.00
0.13	0.04
0.26	0.07
0.39	0.06
0.52	0.04
0.65	0.02
0.78	0.00

FIGURA 5.7 CRECIENTE – QDA. SAN JUAN 1. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS)

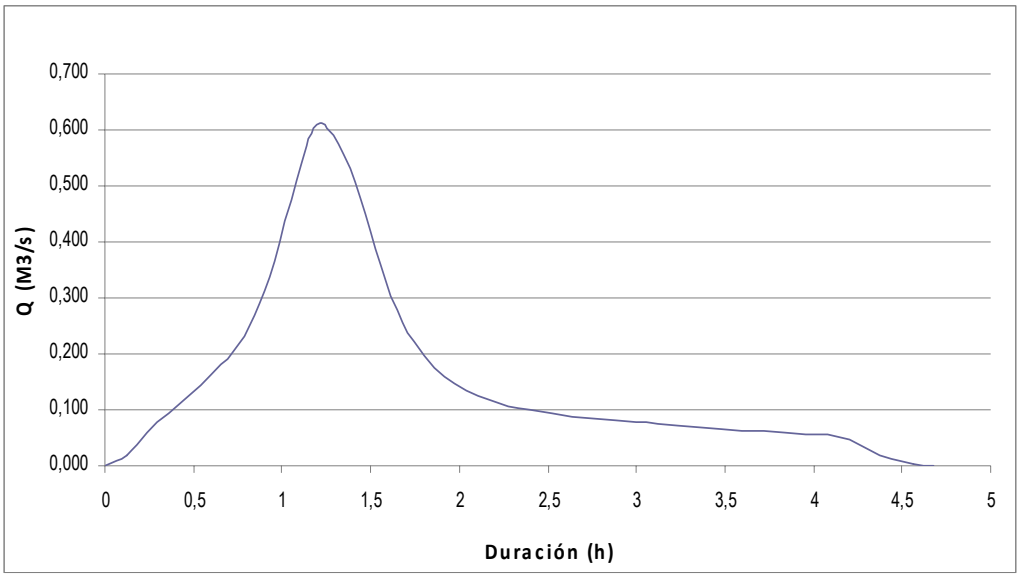


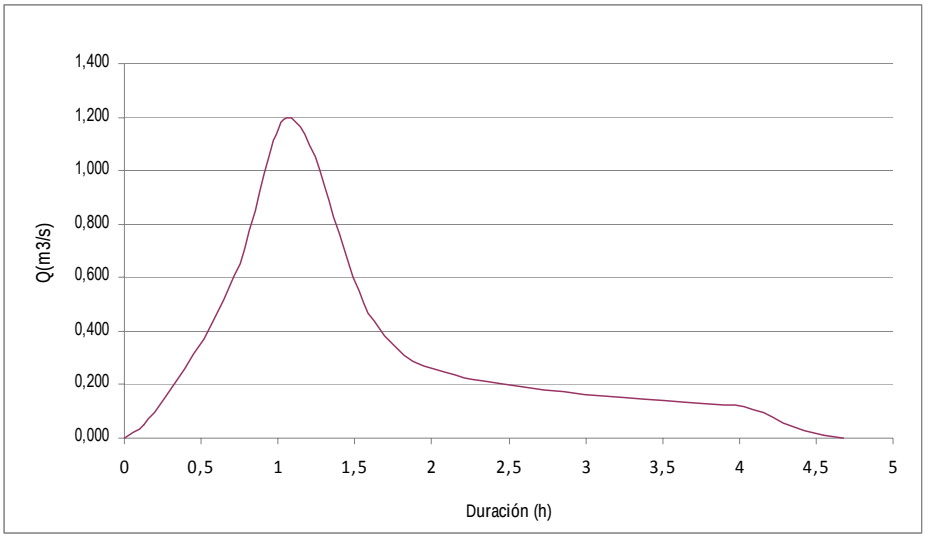
TABLA 5.10 CRECIENTE – QDA. SAN JUAN 1. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS)

t(h)	Q(m3/s)
0	0.000
0.12	0.019
0.24	0.058
0.36	0.095
0.48	0.129
0.6	0.163
0.72	0.202
0.84	0.267
0.96	0.367
1.08	0.510
1.2	0.610
1.32	0.575
1.44	0.477
1.56	0.361
1.68	0.257
1.8	0.197
1.92	0.159
2.04	0.135
2.16	0.118
2.28	0.106
2.4	0.099
2.52	0.093
2.64	0.088
2.76	0.084
2.88	0.081
3	0.077
3.12	0.074
3.24	0.071
3.36	0.069
3.48	0.066
3.6	0.064
3.72	0.062
3.84	0.060
3.96	0.058
4.08	0.056
4.2	0.046
4.32	0.027
4.44	0.013
4.56	0.004
4.68	0.000

TABLA 5.11 CRECIENTE QUEBRADA SAN JUAN 2. TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS)

t(h)	Q(m3/s)
0	0.000
0.13	0.048
0.26	0.153
0.39	0.257
0.52	0.371
0.65	0.518
0.78	0.710
0.91	0.988
1.04	1.193
1.17	1.138
1.3	0.942
1.43	0.711
1.56	0.503
1.69	0.381
1.82	0.312
1.95	0.271
2.08	0.245
2.21	0.227
2.34	0.213
2.47	0.201
2.6	0.190
2.73	0.181
2.86	0.172
2.99	0.164
3.12	0.157
3.25	0.150
3.38	0.144
3.51	0.138
3.64	0.133
3.77	0.128
3.9	0.124
4.03	0.120
4.16	0.098
4.29	0.058
4.42	0.029
4.55	0.009
4.68	0.000

FIGURA 5.8 CRECIENTE QDA. SAN JUAN 2 - TORMENTA DE DISEÑO 4 HORAS (TR = 100 AÑOS)



Luego de llevar las tormentas de diseño a los hidrogramas unitarios, se obtuvieron las crecientes que se ilustran en la *Tabla 5.10*, en la *Tabla 5.11*, en la *Figura 5.7* y en la *Figura 5.8*. De ellos se extrae que los caudales máximos son:

San Juan 1: Q_{100} = 0.61 m^3/s

San Juan 2: Q_{100} = 1.19 m^3/s

Al comparar los caudales aportados por los dos métodos, es evidente que no existen diferencias de magnitud considerable. En este orden de ideas se toman como elementos de trabajo los obtenidos con el método hidrológico.

5.1.5.4 EVALUACIÓN HIDRÁULICA

Su propósito es el de establecer los niveles de inundación de las quebradas San Juan 1 y San Juan 2, acorde con los caudales máximos estimados en el estudio hidrológico (numeral 5.1.5.3). Parte de la información topográfica (incluidas las secciones transversales en la quebradas) y de las inspecciones de campo, que facilitaron la deducción de las condiciones particulares de los cauces; y se apoya en el modelo HEC-RAS.

Modelo HEC – RAS

Para el cálculo del perfil del agua generado por el caudal de diseño, se utilizó el modelo HEC – RAS, que es una versión para windows del modelo HEC – 2, desarrollado por el U. S. Army Corps of Engineers. El programa calcula perfiles de la superficie del agua para flujos gradualmente variados, tanto en cauces naturales como en canales artificiales, y está en capacidad de calcular perfiles para flujos subcrítico y supercrítico, considerando los efectos de obstrucciones en estructuras como puentes, alcantarillas, vertederos y construcciones implantadas en las planicies de inundación.

El procedimiento básico de cálculo del perfil, es el conocido como "estándar por pasos" que resuelve la ecuación de la energía entre dos secciones transversales del río, estimando las pérdidas de ésta, asociadas a la fricción (ecuación de Manning), y a los cambios en las secciones del canal generados por las obstrucciones, como un porcentaje de la carga de velocidad.

En la estimación del coeficiente de rugosidad, la alta presencia de vegetación es factor de especial relevancia; por esto, en la obtención los niveles máximos esperados, se adoptó el máximo coeficiente: 0.15. Para las secciones transversales se definió un coeficiente de contracción igual a 0.1 y de expansión igual a 0.3.

Para el cálculo del perfil, se verificó primero si el flujo era de carácter subcrítico o supercrítico, mediante simulaciones previas. Se estableció en las fronteras tanto de aguas arriba como de aguas abajo, la condición de flujo normal, con un gradiente de energía igual a los valores que se reportan a continuación, correspondientes a las pendientes medias del cauce aguas arriba y abajo del sector de las quebradas en estudio.

Cauce	Gradiente Aguas Arriba	Gradiente Aguas Abajo
SAN JUAN 1	0.13 M/M	0.44 M/M
SAN JUAN 2	0.18 M/M	0.27 M/M

De acuerdo con lo anterior, se calcularon los perfiles del agua para la creciente con período de retorno igual a 100 años. Los resultados obtenidos se presentan en la *Tabla 5.12* y en la *Tabla 5.13*.

TABLA 5.12 PERFIL DE LA CRECIENTE (TR = 100 AÑOS) - QDA. SAN JUAN 1

Sección	Q Total (m3/s)	Cota Min. Canal (m)	Cota Agua (m)	Yc (m)	V (m/s)	T (m)	F
3	0.61	3503.82	3504.17	3504.07	0.73	3.45	0.47
2	0.61	3497.5	3497.82	3497.82	1.6	1.49	1.01
1	0.61	3472.5	3472.72	3472.76	1.73	1.98	1.31

TABLA 5.13 PERFIL DE LA CRECIENTE (TR = 100 AÑOS) - QDA SAN JUAN 2

Sección	Q Total (m3/s)	Cota Min. Canal (m)	Cota Agua (m)	Yc (m)	V (m/s)	T (m)	F
3	1.19	3508.42	3509.04	3509.04	2.16	1.19	1.02
2.5	1.19	3504.43	3504.67	3504.89	4.76	1.75	4.03
2	1.19	3501.79	3502.29	3502.25	1.55	2.29	0.86
1.5	1.19	3497.93	3498.39	3498.39	1.74	2.2	1
1	1.19	3491.56	3491.86	3492.11	4.97	1.33	3.73

De la información recopilada se concluye que no se producirán desbordamientos en las quebradas, dado que sus flujos no superan la capacidad de las secciones transversales. La profundidad del agua es baja (entre los 0.22 m y los 0.62 m), esto, sumado a las altas pendientes de los cauces, se traduce en altas velocidades que oscilan entre los 0.70 m/s y los 4.97 m/s, y plantean la necesidad de conservar la cobertura vegetal de las rondas para minimizar los efectos que la socavación aporte a la profundización de los cauces, que a largo plazo, desestabilizarían las orillas. En este contexto se recomienda delimitar y amojonar las rondas de las quebradas.

5.1.6 CONDICIONES NATURALES DEL DRENAJE

Dos cuerpos de agua que nacen en el norte del área de estudio, y que discurren con orientación al suroccidente a través del centro poblado, configuran el drenaje natural de San Juan. Cuencas dentríticas alimentan las quebradas que carecen de nombre, y que para efectos del presente estudio, se han denominado San Juan 1 (en el oriente del área de estudio) y San Juan 2 (sobre el costado occidental; véase el *Plano 6*).

5.1.7 CONDICIONES ARTIFICIALES DEL DRENAJE

San Juan cuenta con una red de recolección de aguas servidas y de aguas lluvias combinada, constituida por un entramado de tubería en gres y PVC, de 8" y 12" de diámetro, que intercomunican veinticuatro (24) pozos y una (1) caja de inspección, dispuestos, en su mayoría, a lo largo de la vía principal del centro poblado, y sobre la ladera al sur del polideportivo. El fluido que se recolecta es tratado en la planta de tratamiento de aguas negras, construida en el año de 2009, por la empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá, al sur de la población. Luego de su paso por la planta, el agua es vertida al río San Juan. El *Plano 6* ilustra la distribución de la red.

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 5.14*.

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.

5.2.2 CLASIFICACIÓN DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO

La cobertura de la tierra, entendida como los atributos de la superficie del terreno, está integrada por cuatro componentes: bosques naturales –árboles y arbustos-, 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 rural, y cuenta con calles pavimentadas, adoquinadas y en afirmado, construcciones unifamiliares y comerciales, asentadas desde aproximadamente sesenta años, una escuela, un centro de convenciones, un polideportivo, y un centro de atención primaria en salud, dan el matiz dominante a la mayor parte de la vertiente.

TABLA 5.14 LEYENDA Y CLASIFICACIÓN DE USO Y COBERTURA DE LA TIERRA

1ER NIVEL EXPLORATORIO	2DO NIVEL EXPLORATORIO	3ER NIVEL EXPLORATORIO	4TO NIVEL EXPLORATORIO
I. CONSTRUCCIONES	A. RURAL	1.RESIDENCIAL	*UNIFAMILIARES, MULTIFAMILIARES.
		2.COMERCIAL	*TIENDAS, RESTAURANTES, CANCHA DE TEJO Y CRIADERO DE GALLOS.
		3.OFICIAL	*CORREGIDURÍA VEREDAL.
		4.COMUNITARIA	*CENTRO DE CONVENCIONES, JARDÍN INFANTIL, PORTAL INTERACTIVO
		5.EDUCATIVA	*ESCUELA VEREDAL
		6.RECREATIVA	*POLIDEPORTIVO
		7.ATENCIÓN MÉDICA	*UNIDAD PRIMARIA DE ATENCIÓN
		8.COMUNICACIÓN E INFRAESTRUCTURA	*VÍAS PAVIMENTADAS, VÍAS ADOQUINADAS, VÍAS EN AFIRMADO
II. CULTIVOS	A. TEMPORALES	1. NO IRRIGADOS	*CULTIVOS DE PAPA
III. VEGETACIÓN HERBÁCEA	A. PASTIZALES NATURALES	1. HERBÁCEOS	*PASTIZALES, RASTRO BAJO
IV. BOSQUES	A. NATURALES	1. LATIFOLIADAS	* ÁRBOLES, PROTECTOR, ALTA DENSIDAD
		2. MATORRAL	* ARBUSTOS, PROTECTOR, ALTA DENSIDAD
V. CUERPOS DE AGUA	A. NATURALES	1.NACIMIENTOS	* ALIMENTAN A LAS QUEBRADAS SAN JUAN 1 Y SAN JUAN 2, Y ABASTECEN DE AGUA POTABLE A LA POBLACIÓN
		2.QUEBRADAS	*SAN JUAN 1 Y SAN JUAN 2
VI. TIERRAS ERIALES	A. ROCAS EXPUESTAS	1. MASIVOS	* ESCARPES EN ARENISCAS Y LIMOLITAS
	B. SUELO DESNUDO	1. EROSIÓN PROVOCADA	* SURCOS EN RELLENOS ANTRÓPICOS MIXTOS Y NIVELES SUPERIORES DE SUELOS RESIDUALES ARCILLOSOS.
		2. EROSIÓN NATURAL	* REMOCIÓN 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, segundo ambiente de trabajo en importancia 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 (i.e de los suelos residuales), 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 como fallas traslacionales 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 –escarpes, taludes de corte vial y afloramientos- y su papel como catalizador o condicionante de las amplias y espesas masas de residual, 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 valor de 28.3° (muestra C1M5: véase la *Tabla 4.9*)-, y la orientación de los cortes determina la posibilidad cinemática. En la *Tabla 6.1* se listan las características de los cortes estudiados, entre las que se citan: el rumbo, la pendiente, la altura y el 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 F.1*), tanto para las familias de discontinuidades, 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: T31, T39, T40 a lo largo de la intersección D4D5 (o I_{45}), conforman los escenarios con mayor predisposición; la falla por volteo tiene cabida sólo en las superficies T1, T2, T20 y T22 incubada por la discontinuidad: D4; y los

contactos suelo-roca, representados por las unidades de ladera: T43 a T49 coartan cualquier predisposición cinemática.

TABLA 6.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS TALUDES - ESTADO ACTUAL

LADERA		BUZAMIENTO (º)	ALTURA (m)	SUBDOMINIO
ID	ORIENTACIÓN*			
T1	N03E/36SE	35,5	10,0	I y IV
T2	N32E/31SE	31,2	10,0	
T3	N54E/29SE	28,6	12,0	
T4	N45E/26SE	25,5	6,0	
T5	N55E/18SE	17,7	8,0	
T6	N53E/40SE	39,8	10,0	
T7	N80E/29SE	28,6	8,0	
T8	N58E/34SE	34,3	14,0	
T9	N55E/45SE	45,0	16,0	
T10	N65E/33SE	33,0	12,0	
T11	N83E/30SE	29,7	10,0	
T12	N89W/34SW	33,7	16,0	
T13	N74E/35SE	34,8	16,0	
T14	N43E/33SE	32,5	14,0	
T15	N66E/35SE	34,6	6,0	
T16	N85E/37SE	36,5	10,0	
T17	N86E/15SE	14,9	4,0	
T18	N45E/18SE	18,4	3,5	
T19	N83W/12SW	11,7	6,0	
T43	N40E/32SE	32,0	16,0	
T44	N32E/32SE	32,0	22,0	
T45	N33E/30SE	30,0	22,0	
T46	N14W/30NE	30,0	16,0	
T47	N74W/26SW	26,0	18,0	
T48	N18E/33SE	33,0	20,0	
T49	N39E/34SE	34,0	20,0	
T20	N20E/33SE	32,8	10,0	II
T27	N74E/31SE	30,7	8,0	
T28	N78E/38SE	37,6	10,0	
T29	N68E/40SE	40,1	8,0	
T21	N45E/42SE	41,6	4,0	III
T22	N23E/39SE	39,2	12,0	
T23	N12E/25SE	25,2	8,0	
T24	N42E/31SE	31,0	11,0	
T25	N51E/28SE	28,4	6,0	
T26	N87W/41SW	40,6	6,0	
T30	N70E/55SE	55,0	5,0	
T31	N75E/51SE	50,9	8,0	
T32	N66E/51SE	50,9	8,0	
T33	N67E/63SE	63,4	9,0	
T34	N45E/37SE	37,1	10,0	
T35	N58E/37SE	36,9	6,0	
T36	N61E/31SE	30,5	6,0	
T37	N40E/38SE	37,6	4,0	
T38	N87E/40SE	40,3	14,0	
T39	N66W/47SW	47,2	4,0	
T40	N87E/49SE	48,8	4,0	
T41	N74E/58SE	58,0	4,0	
T42	N82E/36SE	35,5	5,0	

* Orientación expresada en Rumbo / Buzamiento
Nota: La orientación de las superficies libres T43, T44, T45, T46, T47, T48 y T49 responden al plano de contacto entre el depósito y el macizo. Su representación en superficie es entonces simbólica, y es producto de las limitaciones cartográficas.

TABLA 6.2 RESUMEN DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO

LADERA		REGIÓN ESTRUCTURAL	FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES		POSIBILIDAD CINEMÁTICA		
ID	ORIENTACIÓN*		PLANOS**	CUÑAS**	PLANAR	CUÑA	VOLTEO
T 1	N03E/36SE	I y IV	E1=300/10 D2=171/78 D3=160/73 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	E1D2=260/07 E1D3=248/06 E1D4=05/05 E1D5=30/00 E1D6=310/10 E1D7=319/09 D2D3=104/61 D2D4=185/78 D2D5=108/66 D2D6=142/76 D2D7=100/57 D3D4=185/71 D3D5=113/66 D3D6=139/72 D3D7=99/58 D4D5=185/44 D4D6=185/86 D4D7=5/65 D5D6=136/65 D5D7=90/63 D6D7=131/12	N.A.	N.A.	D4
T 2	N32E/31SE				N.A.	N.A.	D4
T 3	N54E/29SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 4	N45E/26SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 5	N55E/18SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 6	N53E/40SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 7	N80E/29SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 8	N58E/34SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 9	N55E/45SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 10	N65E/33SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 11	N83E/30SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 12	N89W/34SW				N.A.	N.A.	N.A.
T 13	N74E/35SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 14	N43E/33SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 15	N66E/35SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 16	N85E/37SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 17	N86E/15SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 18	N45E/18SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 19	N83W/12SW				N.A.	N.A.	N.A.
T43	N40E/32SE				N.A.	N.A.	N.A.
T44	N32E/32SE				N.A.	N.A.	D4
T45	N33E/30SE				N.A.	N.A.	D4
T46	N14W/30NE				N.A.	N.A.	D4
T47	N74W/26SW				N.A.	N.A.	N.A.
T48	N18E/33SE				N.A.	N.A.	D4
T49	N39E/34SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 20	N20E/33SE	II	E1=284/02 D2=171/78 D3=160/73 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	E1D2=261/02 E1D3=250/02 E1D4=05/00 E1D5=210/01 E1D6=310/02 E1D7=316/02 D2D3=104/61 D2D4=185/78 D2D5=108/66 D2D6=142/76 D2D7=100/57 D3D4=185/71 D3D5=113/66 D3D6=139/72 D3D7=99/58 D4D5=185/44 D4D6=185/86 D4D7=5/65 D5D6=136/65 D5D7=90/63 D6D7=131/12	N.A.	N.A.	D4
T 27	N74E/31SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 28	N78E/38SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 29	N68E/40SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 21	N45E/42SE	III	E1=145/10 D2=171/78 D3=160/73 D4=275/90 D5=120/66 D6=220/87 D7=45/70	E1D2=82/5 E1D3=71/3 E1D4=185/8 E1D5=208/5 E1D6=131/10 E1D7=131/10 D2D3=104/61 D2D4=185/78 D2D5=108/66 D2D6=142/76 D2D7=100/57 D3D4=185/71 D3D5=113/66 D3D6=139/72 D3D7=99/58 D4D5=185/44 D4D6=185/86 D4D7=5/65 D5D6=136/65 D5D7=90/63 D6D7=131/12	N.A.	N.A.	N.A.
T 22	N23E/39SE				N.A.	N.A.	D4
T 23	N12E/25SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 24	N42E/31SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 25	N51E/28SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 26	N87W/41SW				N.A.	N.A.	N.A.
T 30	N70E/55SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 31	N75E/51SE				N.A.	D4D5	N.A.
T 32	N66E/51SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 33	N67E/63SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 34	N45E/37SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 35	N58E/37SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 36	N61E/31SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 37	N40E/38SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 38	N87E/40SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 39	N66W/47SW				N.A.	D4D5	N.A.
T 40	N87E/49SE				N.A.	D4D5	N.A.
T 41	N74E/58SE				N.A.	N.A.	N.A.
T 42	N82E/36SE				N.A.	N.A.	N.A.

* Orientación expresada en Rumbo / Buzamiento

** Planos reportados en Azimut de Buzamiento / Buzamiento

N.A.: Sin posibilidad cinemática

Nota: La orientación de las superficies libres T43, T44, T45, T46, T47, T48 y T49 responden al plano de contacto entre el depósito y el macizo. Su representación en superficie es entonces simbólica, y es producto de las limitaciones cartográficas.

FIGURA 6.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

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 y cuñas 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 inferior 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, en el mejor de los casos, 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 T31, T39 y T40, da lugar a bloques claves muy delgados y paralelos a la superficie libre, asimilables a los deslaves (o a las fallas planares infinitas).

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 coluviales o residuales; y la estratificación juega, en apariencia, papel indiferente, su buzamiento es en extremo inferior al de las laderas, y su azimut de buzamiento es diametralmente opuesto 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 calcula 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 determina 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 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 (y temporal) 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.

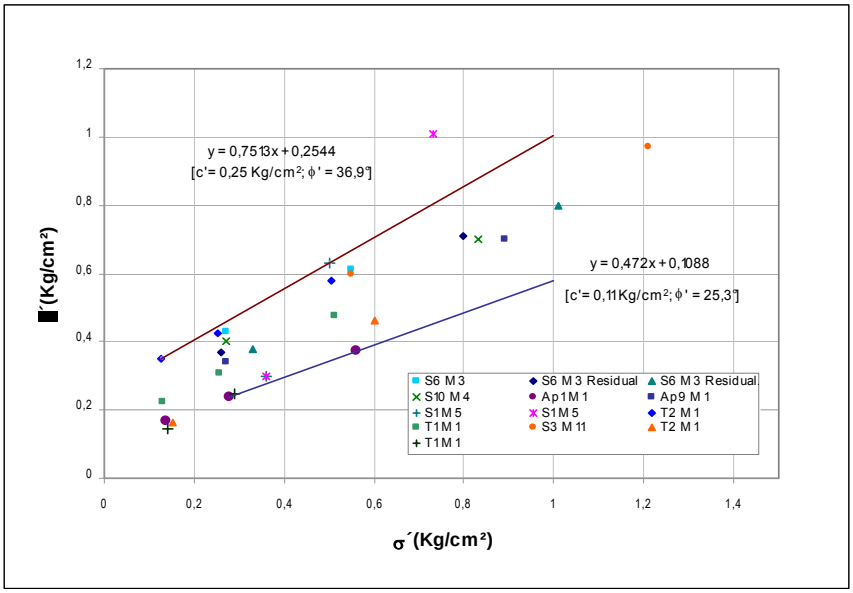
6.2.1.1 PARÁMETROS DE RESISTENCIA

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 4.9, 4.10* y *4.11*, en las *Figuras 4.3* a *4.6* y en el *Anexo D.2*; 2) información secundaria: ensayos de clasificación, compresiones inconfinadas, cortes directos y sondajes (spt) en lodolitas y suelos residuales de la Formación Fusagasugá, seleccionados por similitud litológica y geomorfológica y adoptada del Estudio de Suelos y Cimentaciones para la Sede Administrativa y Local de Sumapaz (Consorcio Sumapaz, 2007); 3) Método de Larson: conjuga 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*, la *Figura 6.3* y la *Figura 6.4*, sintetizan los resultados encontrados en los suelos residuales, Qpglf-ld-sr, y en las lodolitas y limolitas, Pglf-Ld y Pglf-Lm, y en las areniscas, Pglf-A, materiales con el más amplio universo muestral; y revelan el primer espectro probable de variación de los ángulos de fricción, enmarcado entre 25º y 36º para el Qpglf-Ld-sr, 28º y 45º, si se trata de l Pglf-Ld, y desde 38º hasta 42º en el Pglf-A (panorama refinado en adelante) 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 suelos residuales (Qpglf-Ld-sr y Qpglf-Lm-sr), representados en las superficies libres 3-3´, 4-4´, 7-7´, 8-8´, y 9-9´, e idealizados en el dominio de la región estructural IV; y 5) análisis retrospectivo: pilar para la deducción de los parámetros mínimos operativos en la falla en los depósitos coluviales.

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 QPGLF-LD-SR



Al amparo de estas premisas, en el retroanálisis se emplearon los deslizamientos DT001A y FT001EC, 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.

FIGURA 6.3 ENVOLVENTE DE LARSON PGLF-LD

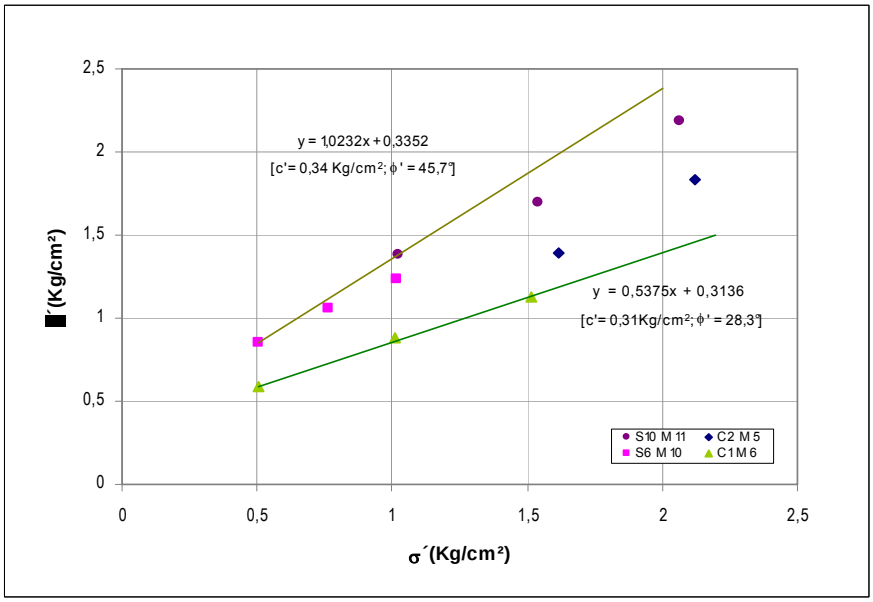
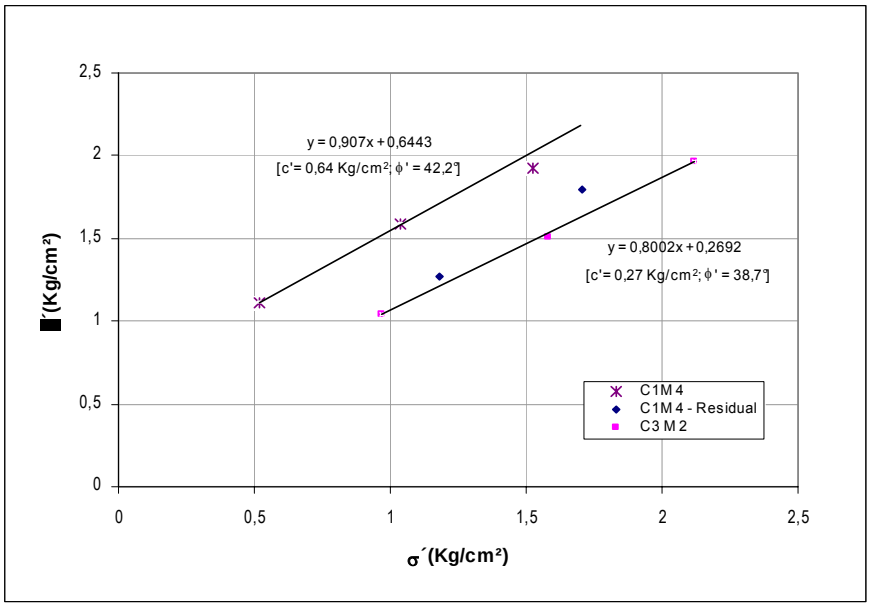


FIGURA 6.4 ENVOLVENTE DE LARSON PGLF-A



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 y los flancos de deslizamiento, asumidos como puntos de control), la cartografía del IGAC (1967) brillo por su inoperancia: la escala de trabajo 1:25.000 lo impidió. El mecanismo de falla: rotacional, o compuesto (rotacional-traslacional) se infiere de las expresiones morfológicas 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_1 y representado en el *Plano 4A* y tabulado en el *Anexo F*), en concomitancia con la probabilidad condicional de falla.

El trabajo así descrito se expresa en la *Figura 6.5* y en la *Figura 6.6*. 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: $c_{mín}$ =0.50 Ton/m², $\phi_{mín}$=23° y $c_{máx}$= 2.9 Ton/m², $\phi_{máx}$= 33.40°, distan de reproducir los estados de falla; su diagramación tiene cabida sí y sólo sí la masa movida bordé los cinco metros (5), la cohesión operativa disminuya hasta 1Ton/m², y el foco de análisis sea la superficie de deslizamiento intermedia en el cuerpo DT-001A, rotulada como S2; o la superficie mayor (bautizada S1) en el proceso FT-001EC. La reconstrucción de las superficies de menor tamaño, la S2 y la S3, en el movimiento FT-001EC está ligada con factores de seguridad inferiores a 0.70, contexto que desvirtúa la hipótesis de que el estado de actividad en la gestación haya sido retrogresivo; uno y otro comportamiento abren la puerta a esquemas en los que la tasa de deformación concurra como discriminante en la selección de los parámetros. La participación de los más potentes espesores (encerrados en la superficie intermedia y mayor de deslizamiento, en los Qco) definen como coeficientes movilizados en la falla c'=0,10 Kg/cm² y ϕ'=23. Pareja parcialmente reproducida por la prueba de corte de la muestra 5 del sondeo S-1 (S1M5).

FIGURA 6.5 RETROANÁLISIS: SECCIÓN A-A'

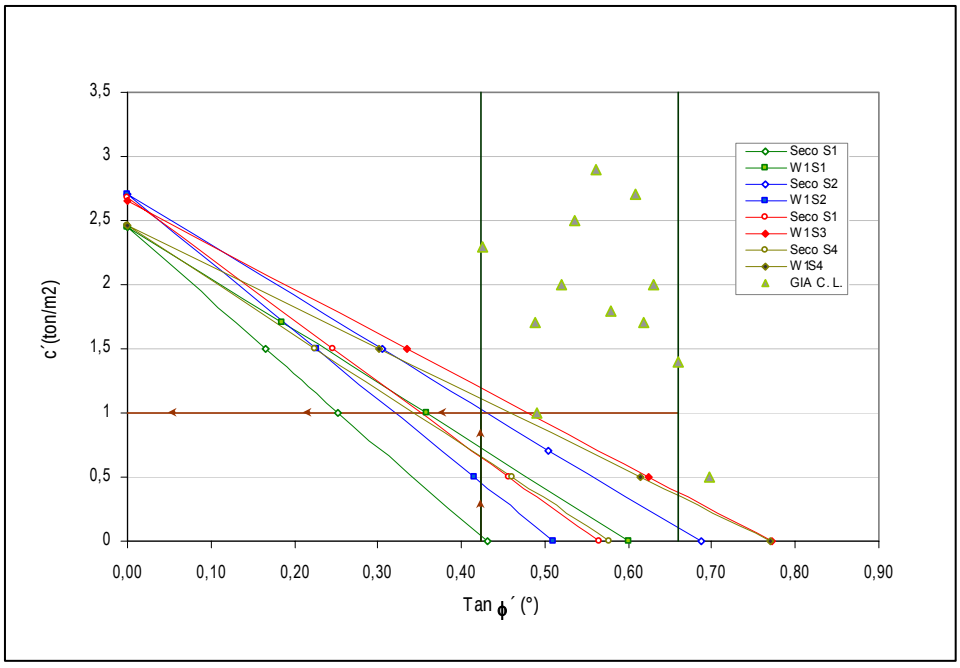
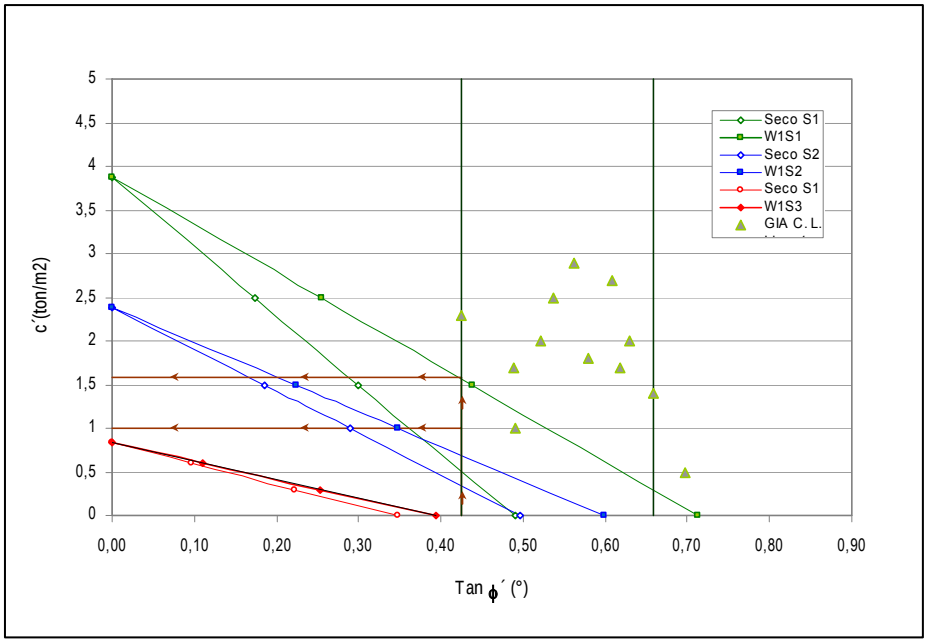


FIGURA 6.6 RETROANÁLISIS: SECCIÓN B-B')



No obstante, la transformación reciente del cuerpo del deslizamiento en la vertiente oriental de la quebrada San Juan 1 (i.e. el DT-001A), provocada por la sobrecarga de parte de los sobrantes de los cortes de excavación para la adecuación del carreteable al cementerio, y responsable de su reactivación, permite suponer la disminución de los coeficientes de resistencia y universos diferenciables para las masas traslocadas DT-001A y FT-001EC; concepto denominado por Cornforth, 2005, "Resistencia residual" y acotado para grandes deformaciones. Hipótesis contrastada, y en parte, 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 0.42, si se trata del DT-001A y 0.46 en lo que hace referencia al FT-001EC, si los parámetros operativos en la falla, se fijan bien como el c'_{max} y el ϕ'_{max} (deslizamiento DT-001A) o bien sólo como el ϕ'máx y el c'_{min} es próximo a cero, resultado más a tono con el comportamiento de las laderas. Tema que se retoma en el numeral <u>6.2.2.2.</u>

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 bien con partes del espacio muestral, es decir, con parejas c', ϕ' provenientes de cortes directos. Esquema válido tanto para los suelos residuales: Qpglf-Ld-sr como para la Lodolita: Pglf-Ld, o bien con las envolventes superior e inferior de Larson en lo que atañe a la arenisca y los planos de discontinuidad. 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 F.3*, mediante el ensayo de varios juegos de parámetros. Procedimiento de gran valor para fijar el borde inferior (c'mín, Φmín) en el Qco. Las combinaciones propias de cada uno se condensan en las memorias de cálculo del *Anexo F*.

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 F.2*, ellos fueron rechazados puesto que no satisfacían el criterio de retroalimentación.

Finalmente, si bien la posibilidad de gestación de mecanismos de falla controlados por las discontinuidades en los macizos rocosos (en especial en los subdominios estructurales IV y III, tallados en los potentes paquetes de arenisca) es inocua (baste repasar la *Tabla 6.2*) e inmodificable en el tiempo, no lo es su estado ni su comportamiento mecánico; máxime si se precisa la vedada influencia del complejo tectónico. Este marco de acción abre el espacio para diferenciar y discriminar las funciones de distribución de los coeficientes de resistencia entre los macizos (los de origen arcilloso o lodoso gozan de una generosa investigación y caracterización, y amplia discusión y retroalimentación a lo largo del capítulo), representado por los horizontes de meteorización IIA y IIB del perfil de Deer y Patton (1.971) y sus suelos residuales propiamente dichos, horizontes IA, IB o IC. En este sentido y como último escalón de la cadena predictiva, la deducción de los parámetros operativos en el residual de la arenisca (o reblandecido) se apoyó en la propuesta de Skempton, (citado por Cornforth, 2005) que sugiere que c'= (2/3)$c_{máx}$ y tgϕ'=(2/3)tg$\phi_{máx}$ de su aplicación se obtiene: $c'_{mín}$=1.13Ton/m^2, $\phi'_{mín}$=23.6º y $c'_{máx}$=2.73Ton/m^2, $\phi'_{máx}$.=33.2º (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 suelos residuales: Qpglf-Ld-sr, y en los horizontes coluviales: Qco 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. Modelamiento adelantado sin detrimento de la expresión morfológica hoy día (es decir conservándola) al someter al suelo a la pérdida progresiva o instantánea de resistencia, representada en la mutación de los

coeficientes de resistencia (efectivos) v.g. con la supresión de la cohesión gracias al trabajo del agua lluvia y de infiltración).

b) Fallas planares con grieta de tracción, incubadas a lo largo del plano de estratificación (E_1=145/10), y en las exposiciones de los bancos de arenisca (Tpb-A2) en los cortes viales (i.e. en el subdominio estructural III).

   Esta fenomenología carente de expresión tanto al interior de San Juan en la carretera San Juan – La Unión sirve de validador del cuadro descrito y de puente para la estructuración de mecanismos de deslizamientos incubados por reblandecimiento (o pérdida de resistencia en el tiempo).

c) Fallas planares infinitas en los suelos residuales (simulados asimismo bajo la óptica del macizo alterado por los paquetes arenosos); la superficie de movilización está controlada por el contacto suelo-roca, paralela a la superficie libre, y su espesor en caso alguno supera los dos (2) metros. Tienen cabida en las exposiciones de las areniscas y las lodolitas, regiones CENI-IV-3, CENI-IV-2, CENI-IV-1, LEI-III-1 y LEI-III-2, y su activación recae en la saturación o en la presurización, del manto potencial, provocada por el movimiento descendente del agua lluvia. Son ante todo modelos abstraídos de las huellas en los cortes viales, y de las diferencias en la resistencia a la compresión simple entre los testigos mismos de la arenisca y de la lodolita (véase la *Tabla 4.11* del capítulo 4)

El modelo de falla progresiva, fue descartado puesto que las laderas al norte, al sur y al oriente mantienen sus expresiones morfológicas en los últimos años, según lo ratifican los testimonios de los habitantes y la contrastación morfológica entre las aerofotografías de 1955 y de 1985, y la cartografía del estudio (GIA, 2010). Igual suerte recae en los deslizamientos rotacionales en el macizo rocoso (sano o ligeramente alterado). Hipótesis desprendida de la baja calidad del macizo (35≤GSI≤45) y de la disposición estructural (se reitera la configuración como pendiente estructural), en especial el del borde sur, zonas homogéneas: CEI-Lsr-I-6, CEI-Lsr-I-5 y CEI-esrdu-I-1 pero depurada (o desvirtuada) en parte por la separación modal de las familias de discontinuidad (mayor a dos metros en la región CENI-IV-1), y los valores del RQD que tocan el 72%, y en parte por los horizontes alterados (deducidos de las columnas estratigráficas) prevalentes: en ningún caso superiores a los dos (2) metros. En la *Tabla 4.21* 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 un piezómetro abierto, destruido (casi en simultáneo con el término de la segunda fase de exploración) en el proceso de adecuación del corredor vial al cementerio, y se monitoreó el comportamiento de la tabla de agua

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	Qso	Suelo Orgánico	1,73		0	26,5			_	_	_	_	0	_	26,5	_	_	_	_	_	Los mínimos se adoptan del SPT; el máximo y el promedio se dejan puesto que el material carece de participación (relevante) en los cuerpos potenciales o activos de deslizamiento.
2	Qarm1 y Qarm2	Relleno Antrópico de reconformación	1.80						0,25	32,0	_	_	0,00	26,6	_	_	0,50	36,9	_	_	Los promedios se asumen con base en la experiencia del consultor en este tipo de materiales. Los parámetros máximos y mínimos se determinan gracias a coeficientes de variación así: Cvc= 0,40 y un Cvf= 0,20.
3	Qco	Depósitos Coluviales	1,90	1,94			1,40	33,40	1,00	19,0	_	_	0,50	15,8	-	-	1,50	23,0	_	_	Los parámetros son deducidos a partir del retroanálisis y de la aplicación del criterio de retroalimentación iterativa en los cuerpos de deslizamiento.
							0,48	33,40													
							-	-													
4	Qpglf-Ld-sr y Qpglf-Lm-sr	Relleno Antrópico seleccionado de reconformación	1,90	1,94	0,00	27,70	2,00	27,50	1,90	29,5	_	_	1,0	23	-	-	2,50	31,70	_	_	Los promedios se determinan del universo muestral. Los mínimos se abstraen a partir de la aplicación del criterio de retroalimentación iterariva, pero justificados con los cortes directos. Los máximos se fijan gracias a los coeficientes de variación cv_c=0.42 y cv_f=0.20, pero ligados a los ensayos de corte. La muestra S6M3 y S1M5 configuran los extremos superior e inferior del intervalo de dominio.
							2,30	23,00													
							2,50	32,70													
							1,70	31,70													
					0,00	28,50	2,50	28,20													
							1,00	26,10													
							2,90	29,30													
							1,70	26,00													
5	Pglf-Ld y Pglf-Lm	Lodolitas y Limolitas de la Formación Fusagasugá	2,19	2,26	0,00	43,50	3,20	28,30	3,40	31,6	_	_	2,05	26,1	_	_	4,80	36,5	_	_	Los máximos se abstraen del ensayo en la muestra S6M10 (c'=4,80 ton/m2, y ϕ'=36,50°). Los promedios y los mínimos se abstraen con base en coeficientes de variación: cv_c = 0,40 y un cv_f=0,20.
							0,60	39,90													
							4,80	36,50													
							5,60	37,80													
6	Pglf-A1 Pglf-A2	Areniscas de la Formación Fusagasuga	1,98	2,18	0,00	44,00	7,10	38,90	2,90	39,1	_	_	1,70	33,2	_	_	4,10	44,5	_	_	Se deduce el promedio del universo muestral disponible. Los máximos y mínimos se obtienen al aplicar un Cvc=0,40 y un Cvf= 0,20.
							2,60	38,60													
							0,60	39,90													
	Pglf-A Reblandecido (Suelo residual)		1,98	2,18	-	-	-	-	1,26	24,9	_	_	1,13	23,6	_	_	2,73	33,2	_	_	Se deducen como 2/3 de los parámetros máximos y mínimos.

(representado de manera alguna por la cabeza de presión) aguas arriba de él, en unos de los parches del residual (específicamente en el sondeo S-1) durante parte del tiempo del estudio.

Labor que deja al descubierto la casi saturación de los suelos residuales; 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), traducido como alturas de agua (Hw/H) en la grieta de tracción. Estas últimas para estados instantáneos.

b) La saturación parcial o total de las capas de suelo –llenos o residuales–. El primer planteamiento, tal y como lo expresan los resultados del retroanálisis, es el regente de las laderas en el cinturón sur (unidades geomorfológicas CEI-Lsr y CEI-esrdu); su extrapolación tiene lugar gracias a la conversión de la tabla de agua crítica en las masas deslizadas como coeficiente de presión de poros: ru. Y el segundo, aplicable a las zonas homogéneas: CENI-IV-1, CENI-IV-2, CENI-IV-3, CEI-Lsr-I-1, CEI-Lsr-I-3, CEI-Lsr-I-4, CEI-Lsr-I-5 y CEI-Lsr-I-6, enmarcadas en masas con espesores inferiores a los dos (2) metros; hipótesis favorecida por la residencia del cuaternario sobre el sello hidrogeológico por excelencia en las vertientes: las lodolitas de la formación Fusagasugá. Uno y otro esquema bajo condiciones de flujo libre, gestados 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.

6.2.1.3.2 Sismo

En cuanto a la variable sismo, se toma como bastión 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). 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. La "Microzonificación Sísmica de Bogotá" como fuente de trabajo es intrascendente, máxime porque San Juan de Sumapaz se erige por fuera del marco estudiado.

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=10 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 compilan 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 = 10 años	0.100	0.900	0.6321	0.3679	0.993	0.007
Sismo, T= 475 años	0.002	0.998	0.021	0.979	0.052	0.948

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 de deslizamiento, así para la falla planar en roca con grieta de tracción el planteamiento de Norrisahnd and Wyllie (1996), que es una versión generalizada de la de Hoek y Bray (1974); para los deslizamientos traslacionales en suelo la solución de Taylor (1948), toda vez que el movimiento se produzca en un plano paralelo a la superficies libre (proceso también conocido como falla planar infinita); y 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 el cuaternario; y en hojas de cálculo (en excel) debidamente validadas para lo concerniente a los mecanismos de falla planar con grieta y falla planar infinita.

Bajo los lineamientos anteriores, y con el fin de adelantar la tarea de evaluación de estabilidad, se establecieron once (11) secciones de trabajo (S1 a S11), 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 y Slide, en particular a las superficies potenciales de deslizamiento, se les asignó un código alfa numérico entrelazado al escenario analizado; éste diferencia sucesivamente el universo de trabajo (San Juan: SJ), la sección de análisis, el modelo de falla y el número consecutivo de superficie analizada; v.g., el archivo SJS1_1 condensa el escenario actual, en la sección de análisis 1; retrabajada por fallas rotacionales: R, específicamente la primera superficie crítica: 1.

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*, en la *Tabla 6.11* y en la *Tabla 6.12* y en la *Tabla 6.13*, 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 41%; su progresión (movilización) se da 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 1.41, umbral obtenido indistintamente en las dos masas (el DT-001A y el FT-001EC, véase el *Plano 4*), sí y solo sí el sismo y el agua estén ausentes (véase la *Tabla 6.6*). Respuesta apenas lógica: los movimientos hoy día son activos, por lo menos el DT-001, aunque sus tazas de deformación son disímiles. Corolario ratificado por las probabilidades de falla en la *Tabla 6.9* y en el *Anexo F.3* (superficie SJS2_1).

La retrogresión aunque viable dista de tener consecuencias drásticas, las superficies de movilización críticas: la SJS1_1 y la SJS2_1, trasiegan a pocos metros (menos de cinco) de los escarpes de deslizamiento, insuficiente para comprometer cualquier edificación, salvo el tanque de almacenamiento (en desuso). 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 6.9* y la *Tabla 6.10*). Respuesta ligada a la generalización de los parámetros del Qco en el Qpglf-Ld-sr, comportamiento avalado y sustentado por el reblandecimiento del material, o por el desconfinamiento y la deformación (rápida o paulatina) de los depósitos; evento último en otrora antecesor a la detonación de los deslizamientos.

Réplica en menor escala, pero no menos trascendente, se enmarca en las zonas homogéneas CEI-Lsr-I-1, CEI-Lsr-I-3, CEI-Lsr-I-4, CEI-Lsr-I-5, CEI-Lsr-I-6 y CENI-Lsr-I-1 (*Plano 7*), atmósferas recreadas en los horizontes residuales, y tipificadas por los cortes S-4, S-8, S-7, S-3, S-9 y S-10. El cuaternario diagrama, apenas, aceptables estadios de trabajo; los taludes encierran condiciones seguras en ausencia de uno de los agentes detonantes, las esperanzas del factor de seguridad se circunscriben entre el 0.72 y el 4.65 (*Tabla 6.6* y *Tabla 6.7*); la activación, expresada como deslizamientos rotacionales o fallas planares infinitas, tiene asidero toda vez que participe por lo menos uno de los coeficientes de resistencia mínimos (véase la *Tabla 6.9*, la *Tabla 6.10* y la *Tabla 6.11*, superficies SJS3_2, SJS4_1, SJS7_1, SJS7_2, SJS8_2, SJS9_2 y SJS10_1; y la *Tabla 6.13* planos SJP3_3, SJP7_3 y SJP8_3). La probabilidad de falla alcanza el 38% a los 10 años (estado actual) o bordea el 60% si la vida útil se extiende hasta los 50 años, propia de la unidad S-7.

Esquema que deja en evidencia por una parte las escasas perspectivas del crecimiento urbano y, los retos de ocupar el cinturón sur del centro poblado (unidades geomorfológicas: CEI-Lsr, CENI-Lsr, diagramadas en el *Plano 7*), que van desde la puesta en marcha de estudios geotécnicos estructurados (o contextualizados) no

por la edificación y sus características geométricas (p.e. el número de pisos, o el área) sino por el o los procesos involucrados: deslizamientos, suelos blandos comprensibles, o efectos sísmicos (amplificación) que satisfagan las exigencias de la NSR-98 y de la resolución 227 de 2206; hasta la pérdida de la inversión; y por otra, que la movilización de las superficies libres (laderas), al igual que lo fue la de los cuerpos de deslizamiento principales, es asunto de tiempo. Los factores condicionantes en unos y otros, antes y ahora, permanecen vigentes. En otras palabras, salvo que se tomen correctivos importantes como la despresurización de los horizontes de suelo: bien con cunetas, subdrenes horizontales o trincheras drenantes, o bien con una combinación de éstos; la reducción de la masa activa (traducida en el perfilado), y la puesta en marcha de sistemas de contención eficientes (y bien diseñados i.e. con pantalla pilotes, pantallas ancladas o anclajes), las emergencias estarán a la orden del día.

El comportamiento de las restantes masas residuales, ejemplificadas por las laderas S-4 (cuerpos potenciales SJS4_2 y SJS4_3), S-5 (masas SJS5_1, SJS5_2 y SJS5_3), S-6 (SJS6_1 y SJS6_1) y S-11 (SJS11_1), no solo es más halagüeño, sino tranquilizador. El cuaternario permanece estable, cualquiera sea la combinación de parámetros, toda vez que actúe uno de los agentes exógenos (lluvia y sismo), o se movilice la cohesión máxima o los parámetros máximos: $c_{máx}$, $\phi'_{máx}$, simultáneamente; los factores de seguridad recorren el intervalo [1.49 - 5.2], y las probabilidades de falla son inferiores al 0.3%, si el escenario de estudio es a un año; boceto descrito en la *Tabla 6.6*, en la *Tabla 6.7*, en la *Tabla 6.10*, y en la *Tabla 6.11*. Valores que describen (por lo menos desde la perspectiva del razonamiento aproximado) con objetividad el comportamiento de estas laderas: durante los más de veinte años de vida de San Juan de Sumapaz (repárese la *Figura 3.2* del capítulo 3) son los ambientes más estables.

El panorama es igualmente prometedor, si la exposición toca los 10 años, las probabilidades condicionales trasiegan del 0.08% (SJS4_3) al 0.1% (SJS5_1); y son sencillamente benéficas a los cincuenta años, la movilización de los depósitos sería dudosa, las probabilidades de falla apenas tocarían el 5% (véase la *Tabla 6.10*). El mayor reparo se ciñe en las estructuras de contención, dos (2) muros en cantiliver (presunción extraída de su imagen en campo pero de ninguna manera corroborada con la información secundaria, puesto que ni la Secretaria de Educación ni la alcaldía menor poseen documento alguno) y un muro de gaviones, adosados al cinturón norte de la escuela, y garantes de la permanencia del comedor comunitario, de las baños y de la cancha múltiple. Aunque ninguna exhibe deterioro o patología evidente de daño; el arreglo geométrico, aún el del gavión que es el más expuesto, deja serías dudas, como para concluir acerca de su conveniencia para soportar los estados de trabajo estáticos y seudoestáticos, y la vida útil, salvo por los limítrofes al jardín infantil, se aproxima a su cumplimiento, por menor que obliga a su mantenimiento y reforzamiento, sin dejar de lado el monitoreo, y en el peor escenario a su reemplazo en el corto o mediano plazo (inferior a 10 años)

Aun cuando el macizo rocoso, al igual que las superficies libres S5, S6 y S11, expone las mejores condiciones de estabilidad, con posibilidades de falla inferiores al 0.13% y factores de seguridad superiores a 1.219, cualquiera sea la conjugación de los agentes exógenos (agua o sismo) y el 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: planos SJT20_1, SJT20_2, SJT20_3, SJT8_1, SJT8_2, SJT8_3 (acopiados en la *Tabla 6.12*), la movilización tendría lugar con la participación de la lluvia o del sismo, o con la combinación de los dos. Las probabilidades condicionales modales superarían el 15% para los 10 años y el 22% 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 los corredores de afectación esperados por los procesos. Tales espacios se limitan una vez estimadas las distancias probables de viaje de las masas: a) en los suelos residuales (incluidos los macizos alterados), 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)

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

En el *Anexo F.4* se condensan las longitudes calculadas (tanto para los coeficientes máximos como para los promedios) para todos los cuerpos potencialmente inestables discriminados por sección. Conjugados los datos obtenidos tanto del PEM, como 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 San Juan de Sumapaz (véase la *Tabla 6.5*).

TABLA 6.5 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

El *Plano 8* ilustra los resultados de la zonificación de amenaza a 10 años, definida en adelante como actual. Los escenarios de amenaza alta, se concentran en los dos cuerpos de deslizamientos, zonas homogéneas CEI-trat-I-1 y CEI-Lsrt-I-1, el primero gestado en rellenos antrópicos y suelos residuales, y el segundo enmarcado exclusivamente en el perfil residual; le siguen en importancia las regiones CEI-Lsr-I-1 a CEI-Lsr-I-6, CENI-Lsr-I-1 y CEI-Lsrt-I-2 (representadas en el *Plano 7*), todas con categoría media, erigidas al sur de San Juan, entrelazan espesos horizontes arcillosos (residuales de más de cuatro metros de talle), proclives a desplazarse bien por presurización o por reblandecimiento. El escenario más conservador, o de amenaza baja, encierra el espacio urbanizado y las laderas al norte, unidades CEI-esrdu-I-1 a CEI-esrdu-I-5, CEI-eradu-I-1, LEI-II-1 y 2, LEI-III-1 y 2, CENI-sr-IV-1, CENI-sr-IV-2 y CENI-IV-1 a 3 (véanse los *Planos 7* y *8*).

La imagen es más drástica hacia el futuro: 50 años. El deterioro en la condición de amenaza en todo San Juan es evidente; las franjas otrora de cualificación baja mutan a media, y las de media se encumbran en alta (véase el *Plano 8*); transición incubada desde las primeras décadas de exposición (baste mirar la ratificación fijada en la *Figura 6.7*, que simboliza el plano de Amenaza para 25 años) los deslizamientos rotacionales en los residuales de las lodolitas y las fallas planares infinitas en los macizos rocosos alterados, tienen lugar protagónico. El uso residencial (o para construcción de viviendas), independientemente de las cortapisas ambientales (tema que se toca en el capítulo 8). Aguas abajo de la cota 3500 msnm en la vertiente occidental de la microcuenca San Juan 1, o de la 3512 msnm en las vertientes oriental y occidental de las quebradas San Juan 1 y San Juan 2, respectivamente, es vedado. Restricción que sólo podría levantarse en la medida en que se acometan sistemas de estabilización, contención y mitigación, p.e. pantallas ancladas, pantallas con pilotes y perfilados (reconformación morfológica), sistemas, invariablemente, acompañados por redes de drenaje superficial (cunetas, zanjas de coronación, descoles, etc) y subdrenaje; o se adelanten estudios de riesgo por remoción en masa en otros lugares, que garanticen condiciones seguras para el establecimiento de las nuevas construcciones.

Distante, pero no menos importante, al lugar ocupado por los procesos de inestabilidad es el deterioro estructural de dos de las edificaciones de la escuela (las aulas), esbozado por grietas transversales y longitudinales de hasta varios milímetros (véase el *Anexo G.3*), favorecidas no sólo por la ausencia de elementos de amarre, por su escueta estructura, distante de los planteamientos y especificaciones sintetizados en la norma NSR-98, o por su edad (cercana o superior a los 40 años acorde con la información de la comunidad) sino por el reblandecimiento del suelo, atenuante revelado por el sondeo S-4, causante, a priori, del aumento en los asentamientos y del menoscabo en la respuesta geomecánica de la cimentación. Su reconstrucción es innegable, el cuándo y el dónde quedan en pie, la respuesta a estos interrogantes estará supeditada, en parte, en un estudio geotécnico particular, con igual o mayor exigencia a la requerida por la Secretaria Distrital de Educación para los colegios nuevos, o por la DPAE para las construcciones nuevas; sin embargo, desde ya se abren paso como espacios preferenciales para su emplazamiento el ocupado hoy día por los edificios, o el contiguo (pero al sur) al polideportivo.

TABLA 6.6 ESPERANZAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD.

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS_{prom} (ESPERADOS)
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
1	SJS1_1	Qco	19,00	1,00	No	No	1,41
					No	Si	0,96
					Si	No	1,13
					Si	Si	0,77
	SJS1_2				No	No	1,06
					No	Si	0,70
					Si	No	0,89
					Si	Si	0,58
	SJS1_3				No	No	0,99
					No	Si	0,67
					Si	No	0,81
					Si	Si	0,55
2	SJS2_1				No	No	1,03
					No	Si	0,67
					Si	No	0,77
					Si	Si	0,50
	SJS2_1				No	No	1,41
					No	Si	0,93
					Si	No	1,07
					Si	Si	0,70
	SJS2_2				No	No	1,04
					No	Si	0,70
					Si	No	0,77
					Si	Si	0,53
	SJS2_2	Qpglf-Ld-sr	29,50	1,90	No	No	3,14
					No	Si	1,70
					Si	No	2,96
					Si	Si	1,60
3	SJS3_1				No	No	1,70
					No	Si	1,13
					Si	No	1,50
					Si	Si	0,96
	SJS3_2				No	No	1,54
					No	Si	1,05
					Si	No	1,26
					Si	Si	0,86
	SJS3_3				No	No	4,29
					No	Si	1,94
					Si	No	3,78
					Si	Si	1,72
	SJS3_4				No	No	2,96
					No	Si	1,97
					Si	No	2,96
					Si	Si	1,96
4	SJS4_1				No	No	1,48
					No	Si	0,98
					Si	No	1,10
					Si	Si	0,72
	SJS4_2				No	No	1,67
					No	Si	1,07
					Si	No	1,26
					Si	Si	0,81
	SJS4_3				No	No	4,15
					No	Si	1,88
					Si	No	3,27
					Si	Si	1,50
5	SJS5_1	Qarm	32,00	0,25	No	No	3,57
					No	Si	1,81
					Si	No	2,92
					Si	Si	1,48
	SJS5_2				No	No	3,11
					No	Si	1,34
					Si	No	2,99
					Si	Si	1,30
	SJS5_3	Qpglf-Ld-sr	29,50	1,90	No	No	4,96
					No	Si	2,36
					Si	No	4,31
					Si	Si	2,05

TABLA 6.7 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN)

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f prom	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
6	SJS6_1	Qpglf-Ld-sr	29,50	1,90	No	No	3,14
					No	Si	1,82
					Si	No	2,64
					Si	Si	1,53
	SJS6_2				No	No	3,61
					No	Si	1,85
					Si	No	2,92
					Si	Si	1,51
7	SJS7_1				No	No	1,34
					No	Si	0,90
					Si	No	0,98
					Si	Si	0,66
	SJS7_2				No	No	1,36
					No	Si	0,93
					Si	No	1,09
					Si	Si	0,74
	SJS7_3				No	No	1,65
					No	Si	1,11
					Si	No	1,31
					Si	Si	0,89
	SJS7_4				No	No	3,35
					No	Si	1,72
					Si	No	2,95
					Si	Si	1,52
	SJS7_5				No	No	4,65
					No	Si	1,99
					Si	No	3,58
					Si	Si	1,55
8	SJS8_1				No	No	1,54
					No	Si	1,00
					Si	No	1,26
					Si	Si	0,81
	SJS8_2				No	No	1,42
					No	Si	0,97
					Si	No	1,09
					Si	Si	0,74
	SJS8_3				No	No	1,77
					No	Si	1,13
					Si	No	1,41
					Si	Si	0,90
	SJS8_4				No	No	2,70
					No	Si	1,53
					Si	No	2,25
					Si	Si	1,27
9	SJS9_1				No	No	1,48
					No	Si	1,01
					Si	No	1,14
					Si	Si	0,77
	SJS9_2				No	No	1,27
					No	Si	0,99
					Si	No	1,13
					Si	Si	0,76
	SJS9_3				No	No	1,74
					No	Si	1,12
					Si	No	1,39
					Si	Si	0,90
	SJS9_4				No	No	2,49
					No	Si	1,46
					Si	No	2,09
					Si	Si	1,22
10	SJS10_1				No	No	1,46
					No	Si	1,02
					Si	No	1,25
					Si	Si	0,86
11	SJS11_1				No	No	4,56
					No	Si	1,99
					Si	No	3,82
					Si	Si	1,68

TABLA 6.8 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD (CONTINUACIÓN)

SECCIÓN / TALUD	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS prom (ESPERADOS)
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO	
T23 T10 T20	SJT20_1	Qpglf-A-sr	24,90	1,26	No	No	4,83
					No	Si	3,96
					Si	No	4,48
					Si	Si	3,67
	SJT20_2				No	No	2,75
					No	Si	2,26
					Si	No	2,40
					Si	Si	1,97
	SJT20_3				No	No	1,71
					No	Si	1,40
					Si	No	1,36
					Si	Si	1,12
T14 T3 T8 T9	SJT8_1				No	No	5,64
					No	Si	4,62
					Si	No	5,15
					Si	Si	4,22
	SJT8_2				No	No	3,29
					No	Si	2,70
					Si	No	2,80
					Si	Si	2,30
	SJT8_3				No	No	2,12
					No	Si	1,74
					Si	No	1,63
					Si	Si	1,33
T32	SJT32_1				No	No	6,10
					No	Si	2,50
					Si	No	3,38
					Si	Si	1,71
	SJT32_2				No	No	6,00
					No	Si	2,46
					Si	No	3,59
					Si	Si	1,76
	SJT32_3				No	No	5,88
					No	Si	2,41
					Si	No	3,92
					Si	Si	1,84
T36	SJT36_1				No	No	5,67
					No	Si	2,32
					Si	No	3,41
					Si	Si	1,63
	SJT36_2				No	No	5,63
					No	Si	2,30
					Si	No	3,52
					Si	Si	1,66
	SJT36_3				No	No	5,57
					No	Si	2,28
					Si	No	3,69
					Si	Si	1,70
3	SJP3_3	Qpglf-Ld-sr	29,5	1,9	No	No	1,62
					No	Si	1,33
					Si	No	1,27
					Si	Si	1,04
7 y 4	SJP7_3				No	No	1,81
					No	Si	1,48
					Si	No	1,39
					Si	Si	1,14
8 y 10	SJP8_3				No	No	1,72
					No	Si	1,41
					Si	No	1,34
					Si	Si	1,10

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

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL										
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS										
Sección				S-1	S-1	S-1	S-2	S-2	S-2	S-2	S-3	S-3	S-3	S-3
Superficie de Falla				SJS1_1	SJS1_2	SJS1_3	SJS2_1	SJS2_1	SJS2_2	SJS2_2	SJS3_1	SJS3_2	SJS3_3	SJS3_4
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.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,038	1,389	1,284	1,951	1,307	1,334	3,691	1,956	1,979	5,379	3,872
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,646	1,111	1,028	1,511	1,021	1,033	3,309	1,760	1,650	4,236	3,324
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,164	1,017	0,942	1,306	1,039	1,052	2,966	1,694	1,422	4,347	2,602
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	0,772	0,741	0,685	0,868	0,752	0,752	2,314	1,380	1,093	3,203	2,053
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,391	0,915	0,878	1,283	0,855	0,872	2,138	1,330	1,355	2,430	2,581
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,128	0,735	0,705	0,997	0,668	0,676	1,785	1,183	1,138	1,907	2,195
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,785	0,665	0,639	0,852	0,676	0,751	1,606	1,140	0,969	1,976	1,729
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,520	0,485	0,466	0,566	0,488	0,489	1,251	0,854	0,748	1,453	1,361
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,710	1,176	1,072	1,537	0,992	1,000	3,751	1,763	1,654	4,771	3,872
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,428	0,970	0,887	1,236	0,809	0,811	3,161	1,625	1,428	3,818	3,324
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,840	0,807	0,731	0,898	0,723	0,719	2,757	1,472	1,096	3,739	2,602
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,558	0,600	0,545	0,596	0,538	0,528	2,170	1,121	0,871	2,785	2,053
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,164	0,773	0,730	1,008	0,645	0,651	2,025	1,201	1,128	2,162	2,562
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,978	0,640	0,606	0,814	0,527	0,528	1,707	1,021	0,981	1,723	2,195
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,561	0,525	0,492	0,581	0,466	0,598	1,493	0,906	0,737	1,707	1,729
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,372	0,392	0,369	0,386	0,347	0,343	1,174	0,691	0,588	1,268	1,361
			ru	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				Qco	Qco	Qco	Qco	Qco	Qco	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			32,6	23,0	23,0	32,6	23,0	23,0	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			23,0	15,8	15,8	23,0	15,8	15,8	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			2,50	1,50	1,50	2,50	1,50	1,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
	C_{min} (ton/m²)			0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,2131	0,4191	0,5598	0,1691	0,4860	0,4650	0,0002	0,0024	0,0594	0,0000	0,0020
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,3215	0,5968	0,5968	0,3297	0,7538	0,7411	0,0006	0,0200	0,1452	0,0002	0,0022
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,3873	0,6955	0,6955	0,4251	0,8946	0,8865	0,0014	0,0437	0,2039	0,0005	0,0026
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,4205	0,7326	0,7326	0,4699	0,9333	0,9267	0,0026	0,0745	0,2429	0,0010	0,0033

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											
Sección				S-4	S-4	S-4	S-5	S-5	S-5	S-6	S-6	S-7	S-7	S-7
Superficie de Falla				SJS4_1	SJS4_2	SJS4_3	SJS5_1	SJS5_2	SJS5_3	SJS6_1	SJS6_2	SJS7_1	SJS7_2	SJS7_3
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.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1,873	2,112	5,221	4,880	3,270	6,229	3,970	4,485	1,656	1,721	2,051
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,517	1,703	4,155	3,749	3,071	5,095	3,184	3,477	1,290	1,388	1,594
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,434	1,631	4,134	3,396	3,150	4,825	3,098	3,744	1,384	1,326	1,699
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,077	1,221	3,068	2,264	2,947	3,691	2,313	2,736	1,010	0,996	1,241
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,244	1,332	2,362	2,465	1,393	2,945	2,294	2,298	1,121	1,178	1,382
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,011	1,102	1,874	1,888	1,328	2,406	1,835	1,776	0,872	0,955	1,074
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,946	1,047	1,881	1,730	1,351	2,305	1,804	1,929	0,930	0,901	1,144
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,713	0,786	1,393	1,153	1,283	1,767	1,344	1,406	0,679	0,678	0,834
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,422	1,628	4,189	4,095	3,127	5,453	3,381	3,670	1,237	1,405	1,651
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,206	1,370	3,446	3,226	2,973	4,564	2,782	2,918	0,997	1,172	1,318
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	0,985	1,148	3,102	2,606	3,009	4,048	2,502	2,925	0,959	1,009	1,301
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,768	0,890	2,358	1,737	2,850	3,160	1,905	2,173	0,717	0,778	0,968
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0,939	1,047	1,940	2,072	1,342	2,583	1,959	1,888	0,830	0,957	1,116
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,801	0,885	1,559	1,627	1,292	2,158	1,607	1,494	0,671	0,802	0,890
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,640	0,733	1,423	1,333	1,300	1,944	1,459	1,515	0,638	0,678	0,884
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,502	0,570	1,078	0,889	1,247	1,522	1,108	1,122	0,479	0,525	0,656
			ru	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qarm	Qarm	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			31,7	31,7	31,7	36,9	36,9	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			23,0	23,0	23,0	26,6	26,6	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			2,50	2,50	2,50	0,50	0,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
	C_{min} (ton/m²)			1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1 año Método PEM			N	0,0724	0,0304	0,0000	0,0033	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,1156	0,1034	0,0195
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,2458	0,1223	0,0008	0,0099	0,0000	0,0001	0,0010	0,0005	0,3837	0,2572	0,0745
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,3513	0,1878	0,0025	0,0164	0,0000	0,0001	0,0024	0,0014	0,5342	0,3517	0,1201
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,4043	0,2344	0,0500	0,0230	0,0000	0,0003	0,0043	0,0029	0,5914	0,4015	0,1603

TABLA 6.11 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL											
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS											
Sección				S-7	S-7	S-8	S-8	S-8	S-8	S-9	S-9	S-9	S-9	S-10	S-11
Superficie de Falla				SJS7_4	SJS7_5	SJS8_1	SJS8_2	SJS8_3	SJS8_4	SJS9_1	SJS9_2	SJS9_3	SJS9_4	SJS10_1	SJS11_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.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	4,219	5,721	1,755	1,818	2,246	3,423	1,888	1,859	2,217	3,176	1,869	5,672
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	3,367	4,376	1,636	1,506	1,814	2,761	1,567	1,539	1,810	2,604	1,628	4,394
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	3,324	4,916	1,563	1,324	1,728	2,640	1,401	0,656	1,667	2,369	1,317	4,720
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	2,471	3,571	1,174	1,013	1,296	1,977	1,067	1,056	1,261	1,797	1,031	3,442
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	2,171	2,448	1,152	1,241	1,440	1,934	1,300	1,250	1,435	1,862	1,326	2,466
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,728	1,865	1,073	1,035	1,165	1,558	1,076	1,048	1,174	1,526	1,134	1,904
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,720	2,115	1,005	0,896	1,103	1,495	0,952	0,936	1,073	1,389	0,899	2,066
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	1,276	1,532	0,758	0,689	0,830	1,119	0,727	0,713	0,814	1,053	0,708	1,503
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	3,748	4,460	1,610	1,434	1,821	2,885	1,489	1,470	1,808	2,700	1,656	4,797
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	3,043	3,509	1,367	1,244	1,521	2,391	1,284	1,263	1,529	2,277	1,449	3,793
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	2,854	3,655	1,150	0,944	1,303	2,102	0,992	0,990	1,259	1,894	1,057	3,846
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	2,148	2,702	0,891	0,751	1,003	1,607	0,786	0,781	0,981	1,469	0,852	2,841
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,934	1,930	1,040	0,972	1,165	1,632	1,011	0,991	1,167	1,583	1,139	2,099
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,564	1,508	0,886	0,850	0,976	1,350	0,879	0,857	0,990	1,334	1,007	1,651
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	1,483	1,597	0,734	0,626	0,830	1,194	0,664	0,656	0,807	1,111	0,713	1,701
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	1,113	1,175	0,571	0,502	0,641	0,912	0,529	0,521	0,630	0,862	0,579	1,252
			ru	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1	W1
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	**0,22**
Material				Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
	C_{min} (ton/m²)			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0001	0,0000	0,0220	0,1010	0,0168	0,0007	0,0732	0,2832	0,0218	0,0018	0,0824	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0007	0,0002	0,1187	0,2652	0,0639	0,0041	0,2191	0,3099	0,0752	0,0080	0,1665	0,0002
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0018	0,0008	0,1860	0,3647	0,1040	0,0094	0,3101	0,3388	0,1181	0,0161	0,2230	0,0005
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0035	0,0018	0,2330	0,4141	0,1406	0,0168	0,3586	0,3719	0,1547	0,0263	0,2597	0,0010

TABLA 6.12 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL							
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS							
Sección / Talud				T23-T10-T20			T3-T8-T9-T14			T32	T32
				SJT20_1	SJT20_2	SJT20_3	SJT8_1	SJT8_2	SJT8_3	SJT32_1	SJT32_2
Espesor de la masa				Z=0.5	Z=1.0	Z=2.0	Z=0.5	Z=1.0	Z=2.0	Z=9.04	Z=8.67
Posición Grieta de Tracción/ Inclinación del talud				39°	39°	39°	30°	30°	30°	b=1	b=2
Fricción	Cohesion (T/m^2)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	6,685	3,747	2,278	7,771	4,453	4,453	7,642	7,505
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	6,415	3,477	2,008	7,392	4,074	4,074	5,790	5,653
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	3,241	2,025	1,417	3,882	2,508	2,508	6,408	6,352
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	2,971	1,755	1,147	3,503	2,129	2,129	4,556	4,500
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	5,479	3,071	1,867	6,370	3,650	3,650	3,137	3,079
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	5,258	2,850	1,646	6,059	3,340	3,340	2,386	2,328
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	2,657	1,660	1,162	3,182	2,056	2,056	2,615	2,591
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	2,435	1,439	0,940	2,871	1,745	1,745	1,864	1,840
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	6,264	3,326	1,857	7,181	3,863	3,863	4,265	4,524
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	6,134	3,197	1,728	6,999	3,681	3,681	3,306	3,477
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	2,820	1,604	0,996	3,292	1,918	1,918	3,446	3,709
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	2,691	1,475	0,867	3,110	1,736	1,736	2,487	2,661
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	5,135	2,726	1,522	5,886	3,166	3,166	2,158	2,220
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	5,028	2,620	1,416	5,737	3,017	3,017	1,682	1,715
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	2,312	1,315	0,817	2,698	1,572	1,572	1,728	1,805
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	2,206	1,209	0,710	2,549	1,423	1,423	1,252	1,299
			ru	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A	Pglf-A
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2	33,2
		ϕ_{min}		23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6	23,6
		C_{max} (ton/m²)		2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73
		C_{min} (ton/m²)		1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0139	0,0244	0,0687	0,0136	0,0119	0,0339	0,0000	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0186	0,0412	0,1500	0,0136	0,0242	0,0229	0,0002	0,0001
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0213	0,0509	0,1974	0,0160	0,0312	0,0984	0,0006	0,0004
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0223	0,0548	0,2170	0,0169	0,0339	0,1102	0,0013	0,0009

TABLA 6.13 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD DE FALLA CONDICIONAL (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL						
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS						
Sección / Talud				T32	T36	T36	T36	SEC3	SEC 7 Y 4	SEC 8 Y 10
				SJT32_3	SJT36_1	SJT36_2	SJT36_3	SJP3_3	SJP7_3	SJP8_3
Espesor de la masa				Z=8.51	Z=13.48	Z=13.30	Z=12.95	Z=2.0	Z=2.0	Z=2.0
Posición Grieta de Tracción/ Inclinación del talud				b=4	b=1	b=2	b=4	38°	33°	35°
Fricción	Cohesion (T/m^2)	Lluvia	Sismo	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S	F.S
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	7,337	7,030	6,977	6,895	2,147	2,391	2,282
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	5,486	5,178	5,125	5,043	1,899	2,094	2,006
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	6,282	6,155	6,133	6,099	1,333	1,527	1,442
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	4,430	4,303	4,281	4,247	1,086	1,230	1,166
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	3,008	2,878	2,856	2,821	1,759	1,960	1,871
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	2,257	2,127	2,105	2,070	1,557	1,716	1,645
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	2,562	2,508	2,498	2,484	1,093	1,252	1,182
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	1,810	1,756	1,747	1,733	0,890	1,008	0,956
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	4,920	4,265	4,387	4,598	1,736	1,897	1,824
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	3,739	3,208	3,286	3,420	1,617	1,754	1,691
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	4,105	3,618	3,747	3,967	0,922	1,033	0,983
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	2,925	2,561	2,645	2,789	0,803	0,890	0,851
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	2,311	2,040	2,071	2,123	1,423	1,555	1,495
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,765	1,542	1,558	1,586	1,325	1,438	1,386
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	1,914	1,717	1,755	1,819	0,756	0,846	0,806
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	1,368	1,219	1,243	1,282	0,658	0,729	0,698
			ru	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				PgIf-A	PgIf-A	PgIf-A	PgIf-A	QpgIf-Ld-Sr	QpgIf-Ld-Sr	QpgIf-Ld-Sr
Valores paramétricos empleados en cada sección		ϕ_{max}		33,2	33,2	33,2	33,2	31,7	31,7	31,7
		ϕ_{min}		23,6	23,6	23,6	23,6	23,0	23,0	23,0
		C_{max} (ton/m²)		2,73	2,73	2,73	2,73	2,50	2,50	2,50
		C_{min} (ton/m²)		1,13	1,13	1,13	1,13	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0885	0,0499	0,0640
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,1904	0,1311	0,1548
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0003	0,0007	0,0006	0,0005	0,2493	0,1783	0,2074
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0006	0,0015	0,0013	0,0010	0,2730	0,1977	0,2288

FIGURA 6.7 AMENAZA FUTURA (20 AÑOS)

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

CAPÍTULO 7

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

7.1 VULNERABILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

La vulnerabilidad, entendida como la predisposición intrínseca de un sujeto o de 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 los 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 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 aunados 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) ajustada 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 de90finen 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 son 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	CALIFICACIÓN
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	Placas de concreto, zapatas y vigas de amarre	17
Regular	Zapatas aisladas o vigas de amarre.	13
Malo	Concreto ciclópeo o sistema mixto.	9
Pésimo	No hay cimentación homologable con los anteriores sistemas o es inexistente	3

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

- NIVEL A: Integra viviendas que cumplen con parámetros mínimos de rigidez y solidez estructural, de 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 27 construcciones y de las familias circunscritas en el centro poblado San Juan de Sumapaz. En tanto que la fijación de la solicitación se fundamentó en los resultados del análisis de amenaza, descritas en el capítulo 6. Sin embargo, la cobertura de información, en especial en el contexto social y en la condición estructural, es apenas medianamente aceptable (con marcadas pinceladas de insuficiencia); sin acceso al interior de las viviendas, éstas fueron evaluadas desde el exterior, en razón a que gran parte de las familias se rehusó a colaborar. En el "conocimiento popular" de que la información sería usada para la expropiación de los predios, por ser zona de reserva natural.

Inventario de Viviendas.

El formato de recolección de información de las edificaciones (*véase el Anexo G.2*) está conformado por 4 secciones: La primera de ellas denominada: Datos Generales, comprende información concerniente al propietario, el número de personas residentes y su distribución por género, a la ubicación espacial y catastral 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" en elementos estructurales y no estructurales, a la auscultación sobre filtraciones, y al planteamiento de alguna medida a priori de acuerdo con lo observado. Y la última condensa datos enmarcados en el contexto social. Finalmente, contiene un espacio para observaciones, en las que se plasman comentarios de los habitantes o apreciaciones del aforador que en alguna medida contribuyen al estudio. En el *Anexo G.1* se dispone el formato de campo con el instructivo que sirve como guía para su utilización. El estudio de la vulnerabilidad de los elementos expuestos: veintiún (21) viviendas, la Escuela San Juan, La Corregiduría, El Matadero, la Planta Eléctrica, el Polideportivo y el Hospital Nazaret - UPA San Juan, se materializó en el "Formulario para la evaluación de daños y estado en edificaciones por fenómenos de remoción en masa" (véase el *Anexo G.2*).

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 los 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 en ningún caso supera los tres salarios mínimos, y lo normal es que sea apenas de uno. Valores deducidos, ante la ausencia de información socio-económica, a partir del valor de las viviendas (tomado de Catastro, 2010) de forma similar a como las entidades financieras determinan la capacidad de pago (tasada entre el 3% y el 4% del bien). Contexto que pareciese se contrapone con la posesión de grandes extensiones de tierra, pero que sólo lo ratifican: los predios carecen de destinación agrícola o pecuaria intensiva, y su uso es en esencia para conservación . La actividad laboral se concentra en la agricultura de pan coger y en la cría de animales para la subsistencia y para la atención minoritaria del comercio (restaurantes y tiendas que funcionan en la misma vivienda).

El valor de las edificaciones, oscila entre los 8.8 millones y los 29 millones, el valor promedio es de 15 millones, de las 21 residencias tan solo tres son de dos plantas, las restantes poseen un solo piso y en su gran mayoría son habitadas por los propietarios. La dotación de equipamiento colectivo es bastante generosa, 8 de las 29 edificaciones pertenecen a usos comunitarios y solventan las necesidades de la población, e incluso las de la localidad de Sumapaz.

Cobertura de Servicios Públicos.

La totalidad de las viviendas, y por tanto sus familias, poseen servicios públicos, con excepción del gas natural.

Organizaciones Cívicas

El centro poblado cuenta con una Junta de Acción Comunal bien organizada y notablemente participativa. Ésta propende por el bienestar social, su gestión ha avanzado en la construcción de bienes comunitarios como el Centro de Convenciones. Acompaña a la Junta, una organización a mayor escala: el Sindicato de Trabajadores Agrícolas del Sumapaz - Sintrapaz, apropiado de gestionar temas como: la educación, la cultura, el urbanismo, las políticas de desarrollo, y la seguridad de la región y sus habitantes campesinos.

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. El 100% de las construcciones residenciales carece de un sistema estructural apropiado, los muros portantes no confinados, marcan el derrotero. Los muros externos se levantan en mampostería de arcilla con deficiencia en las trabas y en el mortero de pega; y las divisiones internas, en su gran mayoría, se construyen en madera de la región.

Las edificaciones se prestan insuficientes para resistir fuerzas de tensión y, los esfuerzos de compresión y cortante, que puedan generar el empuje de tierras. El interés de ampliación de las edificaciones es bajo (tres viviendas de dos plantas), ya sea por los altos costos de inversión o por la migración de la población joven a la ciudad, que redunda en la desaceleración demográfica y por ende en el desinterés de crear nuevos espacios. Las construcciones comunitarias en cambio, muestran mayor calidad en los sistemas constructivos; el uso de los pórticos y la mejor disposición y calidad de los materiales hacen de éstas claros ejemplos de construcción formal.

Percepción del Peligro.

Los habitantes del centro poblado son ajenos a la preocupación que generan los deslizamientos. Con solo un antecedente, la condición vislumbrada es de total tranquilidad. En cambio las condiciones de seguridad y de derechos humanos son el centro de atención y su mayor preocupación.

Daños Generales de la Construcción.

El nivel de daño 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 obtenida de la auscultación de las 29 edificaciones complementada, a grandes rasgos, con los comentarios de los 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 G.2*. de los que se puede extractar que tanto las viviendas como las edificaciones comunitarias, se conservan sin daños, a excepción de el bloque 1C de la escuela de San Juan que posee un importante deterioro en sus elementos constructivos.

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 (sus viviendas). 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. Así entonces para las familias con ingresos de hasta un (1) salario mínimo, escenario por excelencia del centro poblado, la capacidad de ahorro no supera el 10%, este criterio combinado con el porcentaje de perdida física en la vivienda (valores fluctuantes entre el 10 y el 30%) arrojan como resultado que los tiempos de recuperación sean de hasta diecisiete (17) años. Mientras que para las familias con ingresos de dos (2) s.m.l.m.v. la tasa de endeudamiento asciende al 20%, como lo refrenda la *Tabla 7.7* y los tiempos de recuperación se acortan a un año.

TABLA 7.7 CAPACIDAD DE ENDEUDAMIENTO

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

Ahora bien, las pérdidas potenciales por la ocurrencia del evento, alcanzan el 30% del patrimonio, esquema ratificado por las viviendas 2 y 3 de la manzana 4 , parece sensato por lo tanto 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 3, alcanzan el 30%. 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%

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 4.76% tardaría de 0 años para recuperar su patrimonio, el 4.76% necesitaría hasta 8 años, el 4.76% esperaría no menos de 17 años y el 85.72% prorrogaría su recuperación a 1 año. 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
0	4.76%
1	85.72%
8	4.76%
17	4.76%

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 ejerce sobre los componentes; el segundo, cubre la calidad, las propiedades y los 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*).

TABLA 7.12 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

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.

$$TD = \%daño \times A_{afectación}$$

TABLA 7.13 ÁREA DE AFECTACIÓN SEGÚN ÁREA DE EXPOSICIÓN

ÁREA AFECTADA	
ÁREA EXPUESTA (EN TANTO POR UNO)	ÁREA AFECTADA (EN TANTO POR UNO)
1.00	0.1
1.00	0.2
1.00	0.3
1.00	0.4
1.00	0.5
1.00	0.6
1.00	0.8

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 edificaciones; 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 17.4% de las edificaciones manifiestan vulnerabilidad media y el 82.75% restante, baja. Este fenómeno encuentra explicación en las exiguas tasas de daño: los sistemas estructurales aunque insuficientes, de escaso cumplimiento de las exigencias de la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-98), y de deficiente calidad de construcción, pasan en su gran mayoría sin exhibir patología alguna de daño.
Sin embargo, los niveles medios de vulnerabilidad coinciden con edificaciones de regular calidad de construcción pero de mayor exposición, es decir las numeradas como manzana 5 predio 5, manzana 6 predio 1 y los bloques 1C y 1D de la escuela San Juan. Las viviendas restantes se califican con vulnerabilidad baja. Cabe anotar que ninguna vivienda adquiere la calidad de vulnerabilidad alta, 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

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 Esta tarea tiene como objetivos: deducir sus implicaciones en el deterioro estructural, determinar la capacidad de habitabilidad de las edificaciones, y definir el conjunto de recomendaciones para su recuperación.

No obstante, el desarrollo del marco señalado no solo está fuera del alcance de este proyecto sino que requiere de información hoy día aún vedada v.g. los planos estructurales, las memorias de diseño de las edificaciones y la calidad de los materiales empleados, entre otros, baste con señalar que no fue posible auscultar las edificaciones. Para suplir tales deficiencias, sin dejar de lado la importancia del tema, se recurrió a técnicas de razonamiento aproximado, basadas en la observación, en las que las variables discriminantes son el tipo de sistema estructural y la calidad de las construcciones. De la aplicación del derrotero descrito se obtiene un acercamiento a las condiciones de respuesta sísmica, materializada en el Plano 9. , en la que el 82.75% de las construcciones evidencia una alta vulnerabilidad sísmica, el 13.79% vulnerabilidad baja (esquematizada en las edificaciones 2 de la manzana 2, 1A, 1B, 10, 10A, 10B y 11 de la manzana 4), y el 3.44% vulnerabilidad media (ejemplificada en el bloque 1E de la manzana 4).

Algunos de los elementos de juicio que transcriben los resultados señalados son:

- Las construcciones, salvo el centro de convenciones, el polideportivo y el hospital, carecen de diseño alguno. En este sentido el proceso constructivo dominante fue la autoconstrucción.

- Los elementos estructurales, los pocos que se rescatan, distan de tener continuidad.

- La diversidad en las unidades de mampostería, o la combinación de materiales o de sistemas estructurales es la nota reinante.

- La pega de la mampostería es deficiente y variable; en algunos casos se encuentra pega superior e inferior pero no hay pega lateral.
- La cimentación es incierta.

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, su habitabilidad (desde el contexto sísmico-estructural) es inaceptable. Sólo las edificaciones comunitarias Centro de Convenciones, Polideportivo, Hospital Nazareth, el bloque 1E de la Escuela San Juan e incluso la Corregiduría poseen capacidad de habitabilidad, incluso para operar como albergues en caso de emergencias..

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 7.15*).

7.3.2 ZONIFICACIÓN DE RIESGO.

Como se deduce de la *Tabla 7.12*, el 96.5% de las viviendas (28) expone riesgo actual bajo, y el 3.5% restante ostenta niveles de riesgo medio; distribución justificada en el escaso número de edificaciones con niveles medios de vulnerabilidad, y en el marcado estado de amenaza, esencialmente bajo; los niveles de riesgo aumentan, para los estados de la amenaza a 50 años, al punto de convertirse casi exclusivamente en medio (salvo por los predios 10 y 11 de la manzana 04 y 02 de la manzana 02 que mantienen su cualificación),simbolismo diagramado en el *Plano 10* y soportado por el incremento en las probabilidades de falla.

TABLA 7.15 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.

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 de remoción en masa actuales y potenciales, y de esta manera poder mitigar, conservar o controlar los niveles de amenaza, es decir, disminuir la influencia de los agentes detonantes y contribuyentes, o modificar los elementos y los escenarios expuestos.

Es así como a lo largo del desarrollo de los capítulos anteriores se bosqueja un abanico de medidas que puede cumplir con este objetivo; Surge entonces, la necesidad de evaluar el papel que juegan, para seleccionar la mejor. El proceso de decisión, se fundamenta en el análisis comparativo entre la condición actual y futura, con los diferentes escenarios con la implementación de las obras.

Bajo este panorama, la definición de la amenaza futura implica determinar la eficiencia de las alternativas en la reducción de los potenciales estados. La condición prevalente de amenaza (a 10 años) exhibe dos escenarios diferentes, uno donde su calificación es baja, abarca el casco urbano, el corredor vial y las laderas al norte de la población; el otro, se circunscribe a las laderas al sur y oriente de San Juan de Sumapaz calificado como amenaza media. Así las cosas, y aunque se tenga la vaga sensación de control de la situación, es imperativo incorporar diferentes programas de mitigación para evitar pasar a un escenario donde los valores medios y altos serán los calificativos preponderantes de la condición de amenaza.

La función principal de las medidas será reducir, al menor costo, los estados de probabilidad condicional total actual, y disminuir los escenarios 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 Secretaría de Educación, el DAPD, el IDRD, el ACUEDUCTO y el IDU entre otros.

8.1.2 ALTERNATIVAS

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

Alternativa 1: Elusión (No hacer nada).

Obvia la puesta en marcha de cualquier tipo de obra sea civil o de paisajismo, de mitigación, control o estabilización, que interfiera con la evolución natural de las laderas. En contraprestación, se incorporan en el marco del riesgo aceptable las consecuencias futuras. Surge de la escasa o nula afectación de las edificaciones, aún las más deterioradas (entre ellas las aulas en la escuela, i.e. los predios 01C y 01D de la manzana 04), frente a procesos de remoción en masa. Tiene como lunares la desatención del núcleo social, y la desestimulación de la inversión tanto pública como privada, catalizadores de la vulnerabilidad social, y como responsabilidad la preservación de las rondas de los cuerpos de agua, de los nacimientos, y del ecosistema, cometidos que redundan en necesidades de inversión, y que excaservan la susceptibilidad de la comunidad ante emergencias. Panorama sintetizado en la *Figura 8.1*.

Alternativa 2: Drenaje, Subdrenaje y Protección Morfológica

Involucra la restricción a la expansión urbanística y la implementación de cuatro frentes específicos de trabajo, abocetados en la *Figura 8.2* y en la *Figura 8.3*, que simboliza su distribución espacial y el trabajo del conjunto, y en la *Figura 8.3*, integradora de los detalles. El primer frente, y tal vez el de mayor trascendencia, se centra en el manejo y control de las aguas superficiales y subsuperficiales, pretende despresurizar los espesos paquetes del residual, en especial los cuerpos susceptibles a movilizarse: regiones CEI-LSRT-I-1, CEI-LSRT-I-2, CEI-LSR-I-3, CEI-LSR-I-4, CEI-LSR-I-5, CEI-LSR-I-6, CENI-LSR-I-1 y CEI-TRAT-I-1 (del Plano 7), a través de la instalación de trincheras drenantes y subdrenes horizontales, conjunto diagramado en la *Figura 8.2*; las primeras serán de sección rectangular y profundidad entre un metro (1 m) y tres y medio metros (3.5 m), se dispondrán en arreglos de espina de pescado y descargarán en las quebradas San Juan 1 y San Juan 2; los segundos, tendrán una longitud aproximada de 7 metros y ángulos inferiores a los cinco (5) grados; unas y otros acompañadas por zanjas de coronación y cunetas perimetrales, algunas cimentadas sobre los filtros, bien de sección triangular, con base de 0.70 m, y pendientes 1H:3V y 3H:1V, o bien trapezoidal, configurada por una base mayor 0.70 m, una base menor de 0.30 m, y pendientes 1H:1V, . Incluye, además, la evacuación de un brazo de la quebrada San Juan de Sumapaz 2, mediante la construcción de un descole y un canal paralelo a la vía, que permita la continuidad del curso de agua interrumpido.

El segundo frente, pretende disminuir la vulnerabilidad del centro educativo en especial de los edificios de aulas (predios 01C y 01D de la manzana 4), y abatir la probabilidad condicional de falla en las unidades CENI-LSR-I-1, CEI-LSR-I-6, CEI-TRAT-I-1 y CEI-LSRT-I-1, tarea atendida por juegos de pantallas de pilotes, compuestas por elementos individuales de entre 0.30 m y 0.40 m de diámetro, fundidos en concreto de 21.1 Mpa, y reforzados con perfiles I. Sus funciones: inhibir la progresión y retrogresión de los cuerpos inestables (el DT-001A y el FT-001EC, véase el *Plano 5*), controlar la posibilidad de desplazamiento de los más potentes (i.e espesos) horizontes del cuaternario, adosados en las laderas del corredor sur del centro poblado, y coadyuvar a la red de subrenajes.

El tercer frente recae en la protección de los taludes de la vía con mallas y revegetalización (i.e con cespedones), con el fin de disminuir la generación de procesos erosivos y la descomposición del macizo, que

desencadena, con el tiempo, fenómenos de remoción en masa de mayor envergadura; en el control de los deslaves (es decir de las fallas planares infinitas forjadas en el macizo rocoso alterado) a fe de evitar daños en las viviendas de la manzana 06; y en el transporte controlado de uno de los brazos de la quebrada San Juan 1, hoy día tributario de la San Juan 2, cometido entregado a un descole escalonado, a una poceta y a una cuneta rectangular.

Y el cuarto frente, prioritariamente de orden ambiental, propende por la conservación de la riqueza hídrica, por las mejoras del medio y por el fortalecimiento del centro poblado como modelo ambiental de la localidad. Es ante todo un esquema a mediano plazo, cuyo eje es la población de San Juan. Está compuesto por la delimitación y protección de las rondas y nacimientos de los cuerpos de agua, y por la consolidación del centro nucleado, gracias a la rectificación y protección de la vía hacia el cementerio.

Alternativa 3: Reconformación Morfológica

Busca reducir los empujes activos en (o las masas activas) en los cuerpos y laderas potencialmente inestables. Tarea compuesta por el terraceo de las regiones CEI-Lsr; CENI-Lsr, CEI-Lsrt, y CEI-Trat, gracias a cortes con buzamientos de 1.7H:1.0V y 1.9H:1.0V, y bermas de hasta 3.0m de ancho; y por el perfilado de los taludes viales, con pendientes únicas de 1.5H:1.0V; todos protegidos con cespedones. Panorámica esbozada en planta en la ***Figura 8.4***, y en cortes y detalles en la ***Figura 8.5***.

Comparte con la alternativa 2, las pantallas de pillotes en el extremo sur de la escuela y en las regiones CEI-LSR-I-6 y CENI-LSR-I-1, el descole para la conducción del brazo de la quebrada San Juan 1, el muro en la base de los cortes viales, y el programa de apropiación ambiental, condensado en el cuarto frente de trabajo (véase la ***Figura 8.4***).

Cualquiera sea el camino a seguir (entendido como el esquema de mitigación: alternativa) es pertinente acometer una serie de medidas no estructurales, que si bien no modifican los escenarios de amenaza, están encaminadas a ser participe a la comunidad en la conservación del medio, en la reducción del riesgo ambiental y físico, y a menguar la creación de focos futuros de inestabilidad. Este paquete de acciones comprende: la implementación de campañas de limpieza y retiro de los residuos sólidos (basuras y escombros) de los cauces de las quebradas San Juan 1 y 2; la puesta en marcha de jornadas de sensibilización sobre la importancia de preservar, respetar y proteger los cuerpos de agua, sus rondas y sus nacimientos; máxime que estos últimos se encuentran en inmediaciones al centro poblado, lo que compromete de manera directa a la población con su sostenibilidad; y el reforzamiento estructural de la escuela, en sensu stricto de los dos edificios de aulas.

Tarea última que va más allá de las modificaciones estructurales, y que involucra la reconstrucción de las dos unidades bien en el mismo espacio que hoy día ocupan o en un predio contiguo, posiblemente el adosado al polideportivo, decisión que haría inviable la descentralización administrativa, en otras palabras aboliría la nueva sede de la alcaldía local. En el caso en que se reasiente en el sitio (es decir se mantenga la ubicación actual), el estudio geotécnico requerirá de una minuciosa investigación del subsuelo, con amplio cubrimiento en profundidad (de entre ocho y doce metros) y en extensión superficial; un rico abanico de ensayos de laboratorio, que integre, entre otros, cortes directos, expansiones, consolidaciones (rápidas y lentas), compresiones inconfinadas y pruebas de clasificación; una generosa investigación de las causas del reblandecimiento del suelo; y una fina modelación, que acoja temas como: capacidad portante (con parámetros de resistencia esperados y reblandecidos), asentamientos, respuesta sísmica local, colapsibidad, y evaluación de la estabilidad local y general.

FIGURA 8.1 ALTERNATIVA 1

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.2 ALTERNATIVA 2

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.3 DETALLES – ALTERNATIVA 2

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.4 ALTERNATIVA 3

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.5 DETALLES – ALTERNATIVA 3

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.6 RESTRICCIONES AMBIENTALES

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

Por último, es conveniente precisar que la ampliación del centro poblado es solo posible, bien por las restricciones ambientales ligadas a la protección de los cuerpos de agua (cauces y nacimientos) y al destino de uso fijado en el POT, o bien por el veto marcado por la amenaza, cortapisas plasmadas en la *Figura 8.6*, al sur del área de estudio, en una franja plana adosada en la base de las laderas y contigua al carreteable que conduce al cementerio, y al occidente en el predio destinado a las futuras instalaciones de la alcaldía de la localidad. La urbanización de estos espacios estará supeditada a la puesta en marcha y ejecución (y aprobación) de estudios de riesgo por fenómenos de remoción en masa.

8.2 AMENAZA FUTURA (AMENAZA CON OBRAS)

Las condiciones de amenaza futura, oscilantes entre alta y media, pero con preponderancia de esta última (sentencia clara diagramada en el *Plano 8*), son el reflejo de las particulares condiciones topográficas, estructurales, estratigráficas, hidrológicas e hidrogeológicas. Las laderas están labradas al centro y sur de San Juan en espesas masas de suelos residuales, morfológicamente irregulares, subyacidas en potentes bancos de lodolitas (Pglf-Ld), y al norte de la población en secuencias de areniscas (Pglf-A) y lodolitas (Pglf-Ld), parcialmente cubiertos por mantos irregulares de residuales, 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. La acentuada riqueza hídrica, las importantes recargas hidrogeológicas, y la marcada (pero no desenmarañada) influencia tectónica y sismológica, 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, al poco número de habitantes, a los retos constructivos, operativos y logísticos (ejemplificados en el distanciamiento de los centros de comercio y distribución de materiales para construcción), y a las implicaciones de intervenir predios privados hacen del tratamiento de San Juan 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 (con pilotes) y los subdrenes horizontales 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 del reasentamiento, requerimiento por demás de difícil (y por momentos de casi improbable) cumplimiento.

En este contexto, la estimación de la probabilidad de falla implica conocer 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; esquema 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, la evaluación de la amenaza futura se centro, unidireccionalmente, en la determinación de la respuesta esperada para las alternativas 2 y 3, específicamente la remoción de los residuales, las pantallas ancladas con pilotes, y el drenaje y el subdrenaje (con o sin otros componentes, i.e pantallas o anclajes). La elusión, como sintetiza la convivencia con el problema, revive el análisis de amenaza plasmado en el capítulo 6, y en el *Plano 8* y lo mantiene vigente.

Los valores de probabilidad obtenidos permiten exponer de manera gráfica los niveles de amenaza y de riesgo de las Alternativas 2 y 3 en la *Figura 8.7* y en la *Figura 8.8*, respectivamente. En la alternativa 2, los niveles de Amenaza, vulnerabilidad (Física) y riesgo (Físico) son bajos, en consonancia con el generoso abanico de sistemas de contención y mitigación. Y en la Alternativa 3, los cuerpos de mayor potencial de

daño se sustraen o se minimizan, y las distancias de viaje de las masas potencialmente inestable, con repercusión en las edificaciones, se controlan gracias a estructuras de gravedad o pantallas con pilotes, estrategias que reducen las probabilidades de falla (i.e la amenaza) y de pérdida esperada (el riesgo) a bajas.

En este orden de ideas, la participación del drenaje y el subdrenaje (sin dejar de lado las pantallas de pilotes y los anclajes), esboza una generosa mejoría en la estabilidad, en especial en las regiones Cei-Lsr-I-3, Ceni-Lsr-I-1 y Cei-Lsr-I-5. Las posibilidades de detonación para los horizontes de suelo descienden desde el 56% (sección 1-1', véase la *Tabla 6.9*) hasta niveles inferiores al 24%, patrón propio de la superficie crítica SJS1_1_Pl2, o al 13.7% marco de las demás unidades, v.g. la S-7, la S.2, la S-9, la S-3 y la S-4 (véase la *Tabla 8.1* y la *Tabla 8.2*), en otras palabras la amenaza trasiega desde alta hasta baja para 10 años o media a 50 años. La falla puede tener cabida en las instancias más adversas, es decir toda vez que participen los dos agentes exógenos, y uno o los dos coeficientes efectivos de resistencia mínimos, tal y como lo sugiere la *Tabla 8.1* y la *Tabla 8.2*; 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 se acotan en el intervalo [0.82 -3.71], estadios confirmados en la *Tabla 8.5* y en la *Tabla 8.6*.

Empero, a pesar del halagüeño panorama revelado por esta estrategia, sus réditos, a la luz de la resolución 227 de 2006, parecen insuficientes; la participación de mecanismos adicionales a lo largo de la vida útil, en especial toda vez que se acerque a los cincuenta años, en los cuerpos de deslizamiento (regiones CEI-LSRT-I-1 y CEI-TRAT-I-1, véase el *Plano 7*) es, a priori, incuestionable. El retiro parcial de la masa activa despunta como la más probable. Prédica que deja en evidencia algunas de las debilidades de la resolución: la disonancia entre la vida útil de la estructura y el tiempo de exposición, y entre los escenarios de análisis con y sin obras, y las exigencias en el factor de seguridad en el largo tiempo, son algunas de ellas.

La reconformación morfológica, fundada en el retiro de gran parte del cuaternario, y la fractada contribución de las pantallas pilotes, es sin lugar a dudas la medida más generosa de estabilización, la probabilidad condicional divaga del 0.01% al 8.60% (véase la *Tabla 8.3* y la *Tabla 8.4*) indistinto de la zona homogénea y toda vez que el período de exposición sea inferior a 10 años, el escenario más crítico es la ladera SJS1_1 (unidad CEI-TRAT-I-1 del *Plano 7*), su movilización, representada en las masas potenciales SJS1_O_1 y SJS1_O_2 (Tabla 8.3), acaecería bajo estimulación sísmica o con participación de los dos agentes exógenos (lluvia y sismo). Los factores de seguridad, en las demás superficies libres (laderas) se posicionan entre el 1.36 y 4.31 (Tabla 8.7) en ausencia de cualquier agente exógeno; la activación tendría lugar sólo si se conjugan la lluvia, el sismo y los parámetros de resistencia mínimos.

Los beneficios se mantienen en el tiempo, la posibilidad modal máxima es del 3%, si el escenario temporal de análisis toca los 50 años; sólo el plano SJS1_O_1 exhibe respuesta anómala, su probabilidad condicional bordea el 14% (según se expresa en la *Tabla 8.3*), sin embargo el cuerpo potencial móvil es pequeño, y poco compromete el entorno general, en especial el cauce de la quebrada San Juan 1. De esta forma, la alternativa 3, apunta desde ya a ser la más favorable (i.e. viable) técnicamente, calificativo realzado en medida y proporción a que el destino final de uso recaiga en el urbano (categoría equivalente al nivel de construcciones del Sistema de Clasificación del CIAF, 1992). Su selección como la propuesta recomendada será función exclusiva de su beneficio económico frente a las otras alternativas. El drenaje y el subdrenaje a pesar de su aparente debilidad parece encajar menores costos que la reconformación morfológica, por menor que por una parte inhibe descartarla desde ahora, particularidad inobjetablemente ligada a la relación beneficio-costo, y que por otra abre la posibilidad de sofisticar (o reducir) las medidas de mitigación a emprender (plan de acción). Temas que se tratan en adelante.

TABLA 8.1 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 2

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL								
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS - ALTERNATIVA 2								
Sección				S-1	S-1	S-2	S-2	S-3	S-3	S-4	S-4	S-4
Superficie de Falla				SJS1_1_PI3	SJS1_1_PI3	SJS2_1_PI3	SJS2_1_PI4	SJS3_1_PI1	SJS3_1_PI2	SJS4_O_1	SJS4_O_2	SJS4_O_3
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,089	2,089	2,168	1,925	4,584	3,550	1,746	1,707	2,236
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,783	1,783	1,811	1,619	3,476	2,464	1,401	1,367	1,777
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,319	1,319	1,438	1,628	3,936	2,813	1,424	1,396	1,851
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,007	1,007	1,080	1,317	2,828	1,712	1,079	1,057	1,393
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,456	1,456	1,407	1,284	2,303	1,971	1,192	1,150	1,386
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,242	1,242	1,176	1,071	1,746	1,358	0,961	0,926	1,103
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,921	0,921	0,934	1,087	1,982	1,530	0,968	0,936	1,144
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,703	0,703	0,702	0,081	1,422	0,899	0,736	0,711	0,863
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,963	1,963	2,049	1,754	4,584	3,550	1,602	1,652	2,179
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,699	1,699	1,733	1,498	3,476	2,464	1,303	1,329	1,738
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,191	1,191	1,318	1,461	3,936	2,813	1,279	1,341	1,794
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0,922	0,922	1,000	1,205	2,828	1,712	0,981	1,018	1,354
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,367	1,367	1,329	1,170	2,303	1,971	1,089	1,112	1,351
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,183	1,183	1,124	1,001	1,746	1,358	0,892	0,900	1,079
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,830	0,830	0,855	0,980	1,982	1,530	0,865	0,897	1,109
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,643	0,643	0,649	0,810	1,422	0,899	0,666	0,685	0,839
			ru	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	**0,22**	0,22	0,22	0,22	**0,22**
Material				Qco	Qco	Qco	Qco	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qco	Qco	Qco
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			23,0	23,0	23,0	23,0	31,7	31,7	23,0	23,0	23,0
	ϕ_{min}			15,8	15,8	15,8	15,8	23,0	23,0	15,8	15,8	15,8
	C_{max} (ton/m²)			1,50	1,50	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	1,50	1,50
	C_{min} (ton/m²)			0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0945	0,0945	0,0624	0,0031	0,0000	0,0059	0,0424	0,0474	0,0032
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,1256	0,1256	0,0868	0,0156	0,0001	0,0081	0,0820	0,0699	0,0090
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,1498	0,1498	0,1090	0,0326	0,0002	0,0116	0,1186	0,0964	0,0183
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,1707	0,1707	0,1324	0,0583	0,0003	0,0171	0,1576	0,1316	0,0328

TABLA 8.2 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 2 (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL							
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS - ALTERNATIVA 2							
Sección				S-7	S-7	S-8	S-8	S-9	S-9	S-10	S-11
Superficie de Falla				SJS7_1_ANC	SJS7_2_ANC	SJS8_O_1	SJS8_O_3	SJS9_3	SJS9_4	SJS10_1	SJS11_1
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,214	2,480	1,872	2,717	2,217	3,176	1,869	5,672
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,667	1,956	1,492	2,168	1,810	2,604	1,628	4,394
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,969	2,078	1,554	2,251	1,667	2,369	1,317	4,720
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,430	1,554	1,174	1,702	1,261	1,797	1,031	3,442
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,358	1,577	1,210	1,621	1,435	1,862	1,326	2,466
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,029	1,247	0,969	1,293	1,174	1,526	1,134	1,904
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,204	1,316	1,000	1,344	1,073	1,389	0,899	2,066
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,877	0,987	0,758	1,016	0,814	1,053	0,708	1,503
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1,652	1,960	1,730	2,590	1,808	2,700	1,656	4,797
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,288	1,599	1,394	2,080	1,529	2,277	1,449	3,793
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,407	1,556	1,412	2,124	1,259	1,894	1,057	3,846
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	1,044	1,196	1,076	1,615	0,981	1,469	0,852	2,841
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,007	1,240	1,116	1,546	1,167	1,583	1,139	2,099
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0,789	1,015	0,904	1,241	0,990	1,334	1,007	1,651
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,855	0,981	0,908	1,268	0,807	1,111	0,713	1,701
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,636	0,755	0,693	0,964	0,630	0,862	0,579	1,252
			ru	W1	W1	W2	W2	W1	W1	W1	W1
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			2,50	2,50	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50	2,50
	C_{min} (ton/m²)			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1 año Método PEM			N	0,0078	0,0023	0,0184	0,0004	0,0218	0,0018	0,0824	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0471	0,0164	0,0422	0,0023	0,0752	0,0080	0,1665	0,0002
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0896	0,0366	0,0705	0,0056	0,1181	0,0161	0,2230	0,0005
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,1375	0,0629	0,1071	0,0107	0,1547	0,0263	0,2249	0,0010

TABLA 8.3 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 3

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL								
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS								
Sección				S-1	S-1	S-1	S-2	S-3	S-3	S-3	S-4	S-4
Superficie de Falla				SJS1_O_1	SJS1_O_2	SJS1_O_3	SJS2_O_2	SJS3_O_1	SJS3_O_2	SJS3_O_3	SJS4_O_1	SJS4_O_2
Fricción	Cohesión (T/m^2)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	2,264	2,964	3,264	1,995	2,450	2,373	2,416	2,665	2,578
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1,902	2,639	2,489	1,558	1,930	1,977	2,111	2,247	2,140
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1,477	1,828	2,804	1,434	2,058	1,813	1,697	2,002	1,989
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	1,116	1,497	2,099	0,988	1,537	1,425	1,391	1,583	1,551
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,388	1,819	1,795	1,287	1,556	1,545	1,722	1,713	1,711
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,167	1,620	1,366	1,028	1,225	1,291	1,511	1,448	1,422
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0,903	1,116	1,585	0,952	1,309	1,180	1,198	1,282	1,319
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0,683	0,913	1,156	0,633	0,978	0,926	0,988	1,016	1,029
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	2,102	2,957	2,462	1,816	2,052	2,167	2,296	2,530	2,334
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	1,794	2,634	1,938	1,469	1,656	1,835	2,029	2,154	1,973
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1,315	1,822	2,072	1,301	1,659	1,614	1,575	1,866	1,743
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	1,008	1,493	1,548	0,954	1,263	1,283	1,308	1,490	1,383
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,287	1,815	1,362	1,201	1,302	1,408	1,633	1,624	1,546
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,101	1,617	1,069	0,970	1,051	1,196	1,451	1,387	1,310
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0,804	1,112	1,153	0,861	1,054	1,042	1,109	1,193	1,153
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0,617	0,910	0,860	0,634	0,803	0,832	0,927	0,955	0,916
			ru	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2	W2
			a(g)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Material				Qco	Qco	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			23,0	23,0	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			15,8	15,8	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	C_{min} (ton/m²)			0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0056	0,0179	0,0002	0,0822	0,0018	0,0045	0,0102	0,0020	0,0020
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0859	0,0206	0,0041	0,1045	0,0109	0,0126	0,0166	0,0048	0,0068
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,1119	0,0250	0,0132	0,1285	0,0251	0,0234	0,0231	0,0088	0,0123
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,1387	0,0318	0,0269	0,1579	0,0448	0,0376	0,0304	0,0145	0,0201

TABLA 8.4 RESUMEN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD Y DE LA PROBABILIDAD CONDICIONAL DE FALLA - ALTERNATIVA 3 (CONTINUACIÓN)

VARIABLES DE ANÁLISIS				DISTRIBUCIÓN NORMAL							
				CONDICIÓN DE ANÁLISIS							
Sección				S-4	S-8	S-8	S-9	S-9	S-10	S-10	S-11
Superficie de Falla				SJS4_O_3	SJS8_O_2	SJS8_O_3	SJS9_2_PI1	SJS9_2_PI2	SJS10_1_PI1	SJS10_1_PI3	SJS11_O_1
Fricción	Cohesión (T/m²)	Lluvia	Sismo	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.	F.S.
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	3,855	2,280	2,859	1,937	2,435	2,433	2,379	4,314
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	3,048	1,910	2,347	1,586	2,112	2,135	1,993	3,498
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	3,219	1,732	2,247	1,532	2,156	2,072	1,811	3,462
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	2,411	1,362	1,736	1,180	1,833	1,772	1,422	2,646
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	1,987	1,496	1,757	1,370	1,667	1,729	1,679	2,446
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	1,567	1,259	1,443	1,123	1,450	1,523	1,407	1,977
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	1,664	1,130	1,380	1,080	1,479	1,476	1,277	1,973
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	1,244	0,892	1,066	0,834	1,262	1,268	1,003	1,504
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	3,279	2,074	2,602	1,761	2,313	2,193	2,128	3,846
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	2,652	1,768	2,171	1,465	2,028	1,968	1,819	3,174
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	2,642	1,526	1,989	1,354	2,036	1,836	1,562	3,000
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	2,014	1,220	1,559	1,058	1,750	1,609	1,250	2,326
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	1,692	1,358	1,597	1,242	1,585	1,561	1,501	2,196
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	1,365	1,163	1,334	1,036	1,394	1,406	1,284	1,803
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	1,369	0,992	1,220	0,954	1,399	1,312	1,102	1,729
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	1,042	0,797	0,957	0,746	1,207	1,154	0,884	1,334
			ru	W2	W2	W2					
			a(g)	0,22	0,22	0,22					
Material				Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr	Qpglf-Ld-sr
Valores paramétricos empleados en cada sección	ϕ_{max}			31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
	ϕ_{min}			23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0
	C_{max} (ton/m²)			2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	C_{min} (ton/m²)			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Probabilidad de falla (Pf) a 1año Método PEM			N	0,0000	0,0070	0,0006	0,0189	0,0000	0,0000	0,0049	0,0000
Probabilidad de falla (Pf) a 10 años Método PEM			N	0,0008	0,0189	0,0029	0,0444	0,0000	0,0001	0,0135	0,0001
Probabilidad de falla (Pf) a 25 años Método PEM			N	0,0025	0,0330	0,0067	0,0682	0,0001	0,0003	0,0225	0,0003
Probabilidad de falla (Pf) a 50 años Método PEM			N	0,0051	0,0507	0,0122	0,0938	0,0001	0,0007	0,0324	0,0005

TABLA 8.5 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 2

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS_{prom} (ESPERADOS)	FS_{Total} (ESPERADOS) - ACTUAL	FS_{Total} (ESPERADOS) - 50 AÑOS
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO			
1	SJS1_1_Pl1	Qco	19.00	1.00	No	No	1.78	1.61	1.42
					No	Si	1.25		
					Si	No	1.72		
					Si	Si	1.21		
	SJS1_1_Pl2				No	No	1.28	1.24	1.19
					No	Si	0.89		
					Si	No	1.28		
					Si	Si	0.89		
	SJS1_1_Pl3				No	No	1.55	1.45	1.33
					No	Si	1.08		
					Si	No	1.44		
					Si	Si	1.01		
2	SJS2_O_2				No	No	2.97	2.40	2.05
					No	Si	1.61		
					Si	No	2.85		
					Si	Si	1.54		
	SJS2_1_Pl1				No	No	1.36	1.28	1.16
					No	Si	0.90		
					Si	No	1.27		
					Si	Si	0.84		
	SJS2_1_Pl3				No	No	1.13	1.50	1.36
					No	Si	0.74		
					Si	No	1.01		
					Si	Si	0.67		
	SJS2_1_Pl4				No	No	1.62	1.68	1.39
					No	Si	1.06		
					Si	No	1.53		
					Si	Si	0.99		
3	SJS3_O_1	Qpglf-Ld-Sr	29.50	1.90	No	No	1.44	1.37	1.28
					No	Si	0.99		
					Si	No	1.43		
					Si	Si	0.98		
	SJS3_O_2				No	No	1.62	1.50	1.34
					No	Si	1.04		
					Si	No	1.61		
					Si	Si	1.03		
	SJS3_O_3				No	No	3.39	2.72	2.37
					No	Si	1.74		
					Si	No	3.44		
					Si	Si	1.74		
	SJS3_O_4				No	No	2.85	2.51	2.35
					No	Si	1.84		
					Si	No	2.85		
					Si	Si	1.84		
	SJS3_1_Pl1				No	No	3.71	2.97	2.61
					No	Si	1.86		
					Si	No	3.71		
					Si	Si	1.86		
	SJS3_1_Pl2				No	No	2.64	2.28	2.08
					No	Si	1.44		
					Si	No	2.64		
					Si	Si	1.44		

TABLA 8.6 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 2 (CONTINUACIÓN)

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS_{prom} (ESPERADOS)	FS_{Total} (ESPERADOS) - ACTUAL	FS_{Total} (ESPERADOS) - 50 AÑOS
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO			
4	SJS4_O_1	Qpglf-Ld-Sr	29.50	1.90	No	No	1.41	1.32	1.19
					No	Si	0.96		
					Si	No	1.29		
					Si	Si	0.88		
	SJS4_O_2				No	No	1.38	1.31	1.21
					No	Si	0.93		
					Si	No	1.34		
					Si	Si	0.90		
	SJS4_O_3				No	No	1.81	1.64	1.43
					No	Si	1.12		
					Si	No	1.77		
					Si	Si	1.09		
7	SJS7_1_ANC				No	No	1.82	1.49	1.22
					No	Si	1.12		
					Si	No	1.35		
					Si	Si	0.82		
	SJS7_2_ANC				No	No	2.02	1.68	1.37
					No	Si	1.28		
					Si	No	1.58		
					Si	Si	1.00		
8	SJS8_O_1				No	No	1.52	1.40	1.24
					No	Si	0.98		
					Si	No	1.40		
					Si	Si	0.91		
	SJS8_O_2				No	No	1.33	1.25	1.13
					No	Si	0.90		
					Si	No	1.21		
					Si	Si	0.82		
	SJS8_O_3				No	No	2.21	1.91	1.63
					No	Si	1.32		
					Si	No	2.10		
					Si	Si	1.26		
9	SJS9_O_1	Qarm	32.00	0.25	No	No	1.40	1.31	1.17
					No	Si	0.95		
					Si	No	1.27		
					Si	Si	0.86		
	SJS9_O_2				No	No	1.41	1.32	1.18
					No	Si	0.94		
					Si	No	1.29		
					Si	Si	0.86		
	SJS9_O_3	Qpglf-Ld-sr	29.50	1.90	No	No	1.76	1.59	1.39
					No	Si	1.12		
					Si	No	1.68		
					Si	Si	1.06		
	SJS9_O_4	Qpglf-Ld-sr	29.50	1.90	No	No	2.54	2.15	1.85
					No	Si	1.45		
					Si	No	2.46		
					Si	Si	1.41		
10	SJS10_1	Qpglf-Ld-sr	29.50	1.90	No	No	1.46	1.37	1.17
					No	Si	1.02		
					Si	No	1.25		
					Si	Si	0.86		

TABLA 8.7 ESPERANZA DEL FACTOR DE SEGURIDAD – ALTERNATIVA 3

SECCIÓN	SUPERFICIE DE FALLA	MATERIAL	VARIABLES DE ANÁLISIS				FS_{prom} (ESPERADOS)	FS_{Total} (ESPERADOS) - ACTUAL	FS_{Total} (ESPERADOS) - 50 AÑOS
			f_{prom}	c (T/m²)	LLUVIA	SISMO			
1	SJS1_O_1	Qco	19,00	1,00	No	No	1,69	1,53	1,36
					No	Si	1,04		
					Si	No	1,56		
					Si	Si	0,95		
	SJS1_O_2				No	No	2,23	1,99	1,87
					No	Si	1,37		
					Si	No	2,23		
					Si	Si	1,36		
	SJS1_O_3	Qpglf-Ld-Sr	29,50	1,90	No	No	2,66	2,01	1,55
					No	Si	1,48		
					Si	No	2,01		
					Si	Si	1,11		
2	SJS2_O_1	Qco	19.00	1.00	No	No	1,08	1,03	0,90
					No	Si	0,70		
					Si	No	0,82		
					Si	Si	0,55		
3	SJS3_O_1	Qpglf-Ld-Sr	29,50	1,90	No	No	1,99	1,70	1,40
					No	Si	1,27		
					Si	No	1,66		
					Si	Si	1,05		
	SJS3_O_2				No	No	1,90	1,69	1,48
					No	Si	1,24		
					Si	No	1,73		
					Si	Si	1,12		
	SJS3_O_3				No	No	1,90	1,76	1,61
					No	Si	1,36		
					Si	No	1,80		
					Si	Si	1,28		
4	SJS4_O_1				No	No	2,12	1,89	1,67
					No	Si	1,37		
					Si	No	2,01		
					Si	Si	1,29		
	SJS4_O_2				No	No	2,07	1,83	1,59
					No	Si	1,37		
					Si	No	1,86		
					Si	Si	1,23		
	SJS4_O_3				No	No	3,13	2..39	1,91
					No	Si	1,62		
					Si	No	2,65		
					Si	Si	1,37		
8	SJS8_O_1				No	No	1,72	1,56	1,37
					No	Si	1,16		
					Si	No	1,55		
					Si	Si	1,04		
	SJS8_O_2				No	No	1,82	1,64	1,42
					No	Si	1,19		
					Si	No	1,65		
					Si	Si	1,08		
	SJS8_O_3				No	No	2,30	1,98	1,68
					No	Si	1,41		
					Si	No	2,08		
					Si	Si	1,28		
9	SJS9_2_Pl1				No	No	1,56	1,44	1,29
					No	Si	1,10		
					Si	No	1,41		
					Si	Si	1,00		
	SJS9_2_Pl2				No	No	2,13	1,80	1,62
					No	Si	1,47		
					Si	No	2,03		
					Si	Si	1,40		
10	SJS10_1_Pl1				No	No	2,10	1,82	1,59
					No	Si	1,50		
					Si	No	1,90		
					Si	Si	1,36		
	SJS10_1_Pl3				No	No	1,90	1,72	1,51
					No	Si	1,34		
					Si	No	1,69		
					Si	Si	1,19		
11	SJS11_O_1	Qpglf-Ld-sr	29,50	1,90	No	No	4,28	2,71	2,35
					No	Si	1,97		
					Si	No	3,33		
					Si	Si	1,56		
	SJS11_O_2				No	No	3,48	2,80	2,41
					No	Si	1,98		
					Si	No	3,09		
					Si	Si	1,77		

FIGURA 8.7 AMENAZA POR FRM CON OBRAS – ALTERNATIVA 2

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.8 RIESGO POR FRM – ALTERNATIVA 2

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

8.3 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA: 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, en el que 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 adopta 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 los numerales 6.3 y 8.2. Por su parte, el costo de falla, se considera 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 (incluida la compra de los predios para su emplazamiento), 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 los *Anexos H.1* y *H.3*, y en los estimativos compilados en los *Anexos H.4* y *H.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-administrativos. El costo de falla se fija, 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 que integran el mantenimiento, el rediseño, etc. En el caso de no deslizamiento (no falla) el monto de inversión se estima como un porcentaje del valor de la alternativa (cercano al 20%) por labores de mantenimiento.

La convolución de los elementos descritos, esquematizada en la *Figura 8.9*, en la *Figura 8.10* y en la *Figura 8.11* revela que el convivir con el problema (i.e. la elusión) supone ser el camino más razonable a seguir, cualquiera sea la región o zona homogénea en consideración, a pesar de que obliga a la compra de los predios afectados para salvaguardar la vida de los habitantes y para garantizar el crecimiento seguro del centro poblado. La reconformación morfológica, contraria a sus notables dividendos en la estabilización de las laderas, entrelaza la más exigua relación beneficio-costo, ámbito realzado en la medida en que el destino de uso sea distinto al urbano; los montos de inversión y de falla de ninguna manera equiparan la reducción en

la probabilidad condicional de falla. Circunstancia similar acontece con el drenaje y el subdrenaje (Alternativa 2), pero en menor escala: el riesgo esperado disminuye y la relación beneficio-costo aumenta, aunque permanece distante de la de elusión; sus réditos emergerán toda vez que esquemas de uso urbano (recreativo o educativo) o rurales nucleados tengan asidero en las laderas sur (del centro poblado).

Este particular contexto acotado por los costos de inversión, excesivos hoy día para la alternativas 2 y 3, máxime si se compara con el valor de los inmuebles, revela la necesidad de plantear una salida técnica que no caiga en la desatención a la comunidad, marco propio de la elusión, y que se distancie de los elevados presupuestos de las opciones 2 y 3. Salida denominada *Plan de Acción (o alternativa 4)*, y configurada por el tratamiento de los cuerpos de inestabilidad; la rectificación de la vía al cementerio; la protección de los taludes de la vía San Juan-La Unión, el reforzamiento estructural de la escuela, específicamente de las aulas (construcciones 01C y 01D de la manzana 04); el encauzamiento del tributario oriental de la quebrada San Juan 1 (gracias a un descole y a una caja de inspección), y la implantación de parte del sistema básico de drenaje y subdrenaje, configurado por cunetas y trincheras drenantes de hasta 3.50 m de profundidad. Componentes extraídos de los planteamientos 2 y 3, y reproducidos en la *Figura 8.12*.

Si bien el papel del *Plan de acción* como agente transformador de los escenarios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, función desenmarañada en concordancia con los lineamientos planteados en los capítulos 6 y 7, es por momentos nimio, tal y como lo revela la *Figura 8.13* y la *Figura 8.14*, adquiere especial trascendencia en la consolidación del centro poblado, en la reducción de la vulnerabilidad social y ambiental, y en la integración de la comunidad a la dinámica institucional del distrito capital. Es, en escencia, un instrumento de planificación, a través del ajuste del POT, y derrotero para las decisiones de expansión de San Juan.

Los costos directos de inversión en ningún caso superan los trescientos setenta y dos millones (como lo ilustra la *Tabla 8.8*), y su ejecución tendría cabida en un plazo cercano a los setenta y un días (véase la *Figura 8.15*), pero sin incluir el programa ambiental y el reforzamiento estructural de la escuela, responsabilidades inaplazables que involucran a la alcaldía local, a la comunidad (de San Juan), a la Secretaría Distrital de Educación, a la Secretaria Distrital de Ambiente y a la CAR.

Finalmente, el monitoreo de las laderas forjadas en las masas de suelo residual, a través de piezómetros abiertos, al menos cuatro alineados en dos secciones (sin dejar de lado los registros estratigráficos), la deducción de las cabezas de presión máximas, y la contrastación de las respuestas mecánicas (pronósticos), es decir la revisión de los factores de seguridad a la luz del seguimiento de la instrumentación, son tareas inaplazables. El refinamiento de los estados operativos es el primer paso para disminuir el riesgo y para refinar las medidas de mitigación, en especial si se pretende darle destino de uso al corredor sur.

8.4 BENEFICIOS: INFRAESTRUCTURA Y POBLACIÓN

Los frutos del plan de mitigación son tan abundantes como diversos; recorren el campo ambiental, los espacios institucional y político, y los órdenes social y de riesgo (incluida la vulnerabilidad), habida cuenta se acometa la protección de los cuerpos de agua, el reforzamiento sísmico de la escuela (requisito ineludible para garantizar los programas de educación básica), y los pormenores del plan de acción (eslabón para la consolidación del centro poblado). No obstante, los más de sesenta (60) residentes, los veinte (20) niños, con edades entre 4 y 13 años, que reciben clases en la escuela, y las 3,9 hectáreas son los principales receptores. Los dos primeros grupos en el contexto de la población beneficiada; y las últimas en el entorno del polígono de afectación (véase la *Figura 8.12*).

TABLA 8.8 CANTIDADES DE OBRA Y PRESUPUESTO COMPARATIVO ENTRE LAS ALTERNATIVAS

Nº	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT ALT 1	CANT ALT 2	CANT ALT 3	CANT PLAN DE ACCIÓN	V/UNIT	Alt 1	Alt 2	Alt 3	PLAN DE ACCIÓN
1	PRELIMINARES Y MOVIMIENTO DE TIERRA										
1-1	Localización y replanteo	m2		25350,0	28949,0	6224,2	$ 425	$ -	$ 10.784.598	$ 12.315.713	$ 2.647.949
1-2	Campamento e Instalaciones Provisionales	Glb		1,0	1,0	1,0	$ 1.491.324	$ -	$ 1.491.324	$ 1.491.324	$ 321.000
1-3	Cerramiento en poli sombra	m		1600,0	1680,0	394,7	$ 1.818	$ -	$ 2.909.088	$ 3.054.543	$ 717.636
1-4	Descapote	m2		1351,6	10504,3	280,5	$ 5.656	$ -	$ 7.645.368	$ 59.416.603	$ 1.586.622
1-5	Perfilado de taludes (incluye comision de topografia)	m3			51585,4	2124,0	$ 18.339	$ -	$ -	$ 946.042.061	$ 38.952.753
1-6	Entibado Horizontal / Vertical tipo 1	m2		767,0	842,0		$ 21.253	$ -	$ 16.300.828	$ 17.894.781	$ -
1-7	Compra de lotes	m2	15489,0	15489,0	15489,0	6251,4	$ 6.545	$ 101.375.505	$ 101.375.505	$ 101.375.505	$ 40.915.609
1-8	Excavación manual en suelo a profundidad variable	m3		3523,2	4078,4	918,7	$ 22.530	$ -	$ 79.379.077	$ 91.887.844	$ 20.698.179
1-9	Relleno con material común	m3		1057,0	530,2	125,2	$ 3.711	$ -	$ 3.922.804	$ 1.967.769	$ 464.756
1-10	Retiro y disposición de escombros/sobrantes a sitio autorizado	m3/Km		3206,1	71709,7	787,9	$ 20.000	$ -	$ 64.122.786	$ 1.434.193.146	$ 15.757.600
2	PANTALLA DE PILOTES										
2-1	Pilotes preexcavados (incluye concreto de 21 Mpa, perfil tubular en acero de 16" y perfil IPE240)	m		899,0	1089,0		$ 716.966	$ -	$ 644.552.434	$ 780.775.974	$ -
3	MURO DE CONTENCIÓN										
3-1	Muro de contención en cantilever. Incluye excavación, suministro e instalación de concreto de 3000PSI, acero de refuerzo, tubería PVC de 2" ranurada, geotextil no tejido NT-1400, material para filtro y relleno común.	Und		1,0	1,0	1,0	$ 41.028.629	$ -	$ 41.028.629	$ 41.028.629	$ 41.028.629
4	ANCLAJES										
4-1	Pernos (incluye perforación, inyección y materiales)	m		420,0	0,0		$ 214.046	$ -	$ 89.899.174	$ -	$ -
5	OBRAS DE DRENAJE										
5-1	Trinchera drenante. Incluye tubería PVC-L de 6", geotextil NT-1400, material seleccionado y material filtrante	m		1244,0	1142,0	410,4	$ 236.979	$ -	$ 294.811.355	$ 270.625.278	$ 97.256.182
5-2	Subdrén horizontal. Incluye excavación, suministro e instalación de tubería PVC-L 6" y geotextil	m		993,7	258,0	33,9	$ 162.732	$ -	$ 161.711.670	$ 41.984.856	$ 5.516.615
5-3	Alcantarilla	Und		1,0	1,0	1,0	$ 720.000	$ -	$ 720.000	$ 720.000	$ 720.000
5-4	Descole	m		36,1	57,8	40,8	$ 60.849	$ -	$ 2.197.866	$ 3.518.898	$ 2.480.205
5-5	Construcción de caja de inspección (sección 1.00 m x 1.00 m y profundidad de 0.70 m, en mampostería pañetada al interior y tapa de concreto.	Und		2,0	2,0	1,0	$ 732.961	$ -	$ 1.465.922	$ 1.465.922	$ 732.961
5-6	Cuneta triangular en concreto. Incluye suministro de concreto de 2500 PSI, acero de refuerzo y formaleta.	m		205,6	1072,6	150,7	$ 102.557	$ -	$ 21.084.603	$ 110.002.166	$ 15.455.274
5-7	Cuneta trapezoidal en concreto. Incluye suministro de concreto de 2500 PSI, acero de refuerzo y formaleta.	m		686,9	1495,7	232,2	$ 109.782	$ -	$ 75.405.962	$ 164.200.937	$ 25.491.380
6	BIO INGENIERIA										
6-1	Geomalla Biaxial Fortgrid BX35	m2		2479,3	0,0	2479,0	$ 6.773	$ -	$ 16.792.570	$ -	$ 16.790.267
6-2	Suministro e instalación de anclajes para geomalla	Und		185,0	0,0	185,0	$ 146.177	$ -	$ 27.042.655	$ -	$ 27.042.655
6-3	Empradizacion con cespedón	m2		3183,7	13903,0	3183,7	$ 5.448	$ -	$ 17.345.781	$ 75.746.695	$ 17.345.519
		COSTOS DIRECTOS						$ 101.375.505	$ 1.681.990.000	$ 4.159.708.644	$ 371.921.791
		AIU (25%)						$ 25.343.876	$ 420.497.500	$ 1.039.927.161	$ 92.980.448
		COSTO TOTAL ALTERNATIVA						$ 126.719.381	$ 2.102.487.500	$ 5.199.635.805	$ 464.902.239

FIGURA 8.9 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (10 AÑOS) - ZONA CEI-LSRT-I-1 Y CEI-TRAT-I-1 (SECCIONES 1-1 Y 2-2)

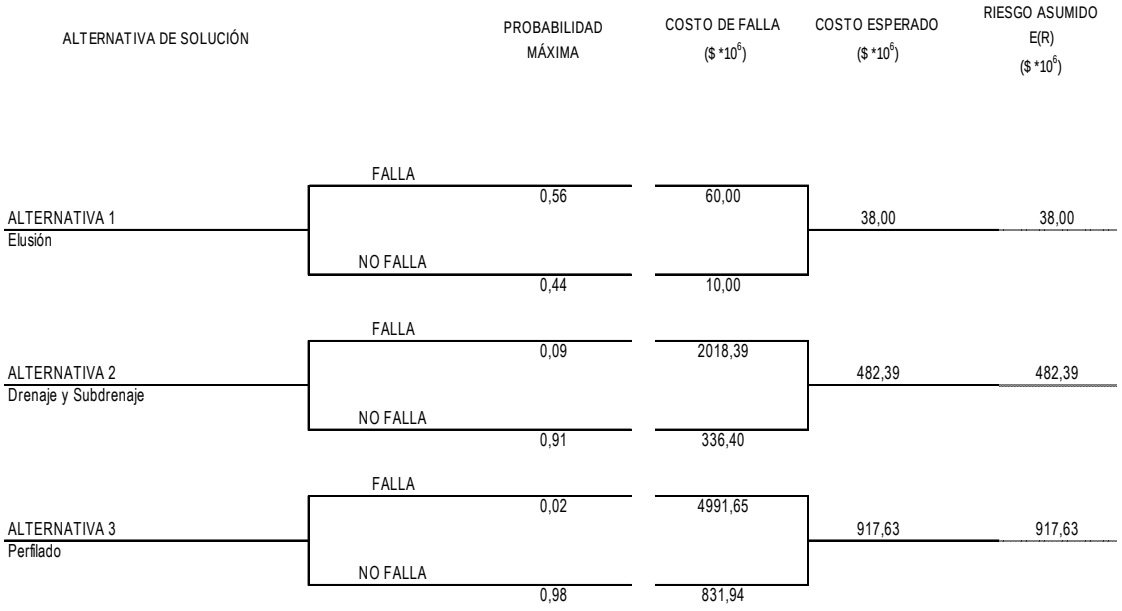


FIGURA 8.10 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (50 AÑOS) - ZONA CEI-LSRT-I-1 Y CEI-TRAT-I-1 (SECCIONES 1-1 Y 2-2)

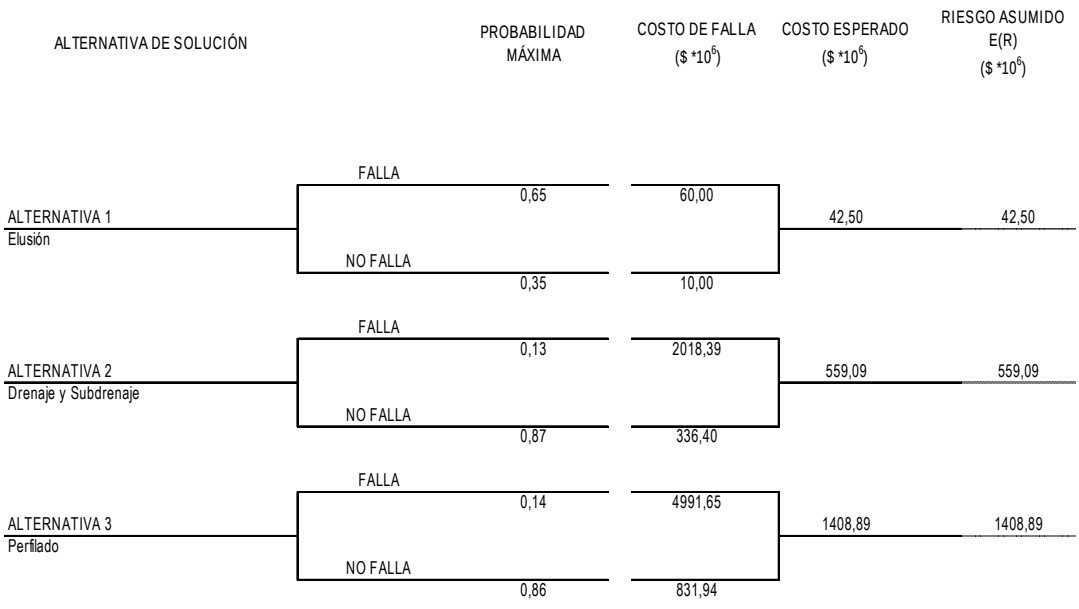


FIGURA 8.11 ÁRBOL DE DECISIÓN PARA MITIGACIÓN (10 AÑOS) - REGIONES CEI-LSR-I-3, CEI-LSR-I-4, CEI-LSR-I-5, CEI-LSR-I-6 Y CENI-LSR-I-1 (SECCIONES 3-3, 4-4, 7-7, 8-8, 9-9 Y 10-10)

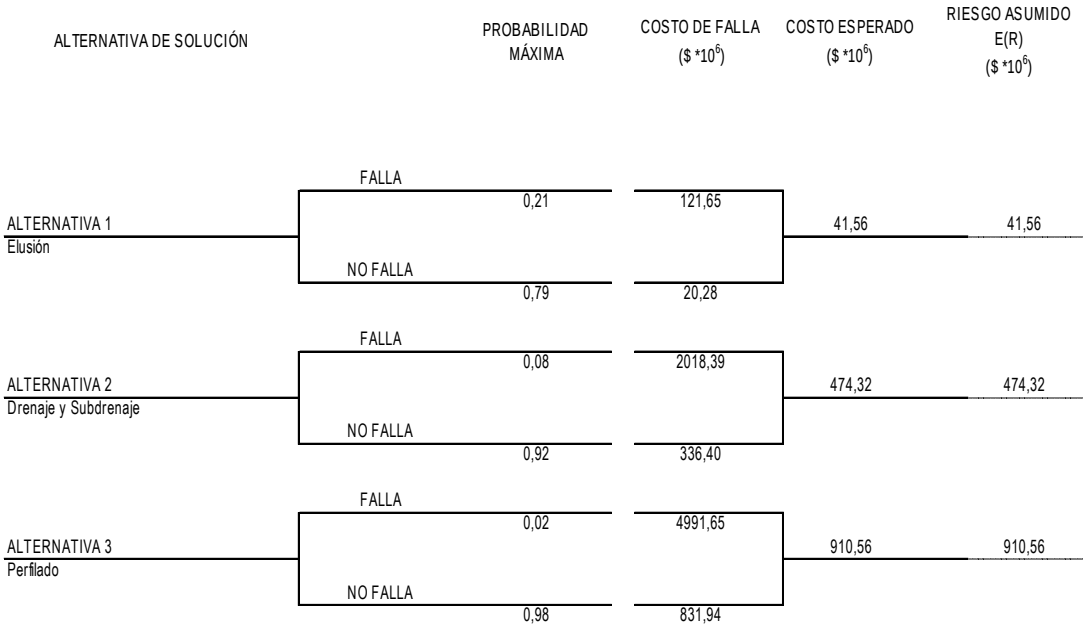


FIGURA 8.12 PLAN DE ACCIÓN

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.13 AMENAZA POR FRM CON OBRAS - PLAN DE ACCIÓN

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

FIGURA 8.14 RIESGO POR FRM - PLAN DE ACCIÓN

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

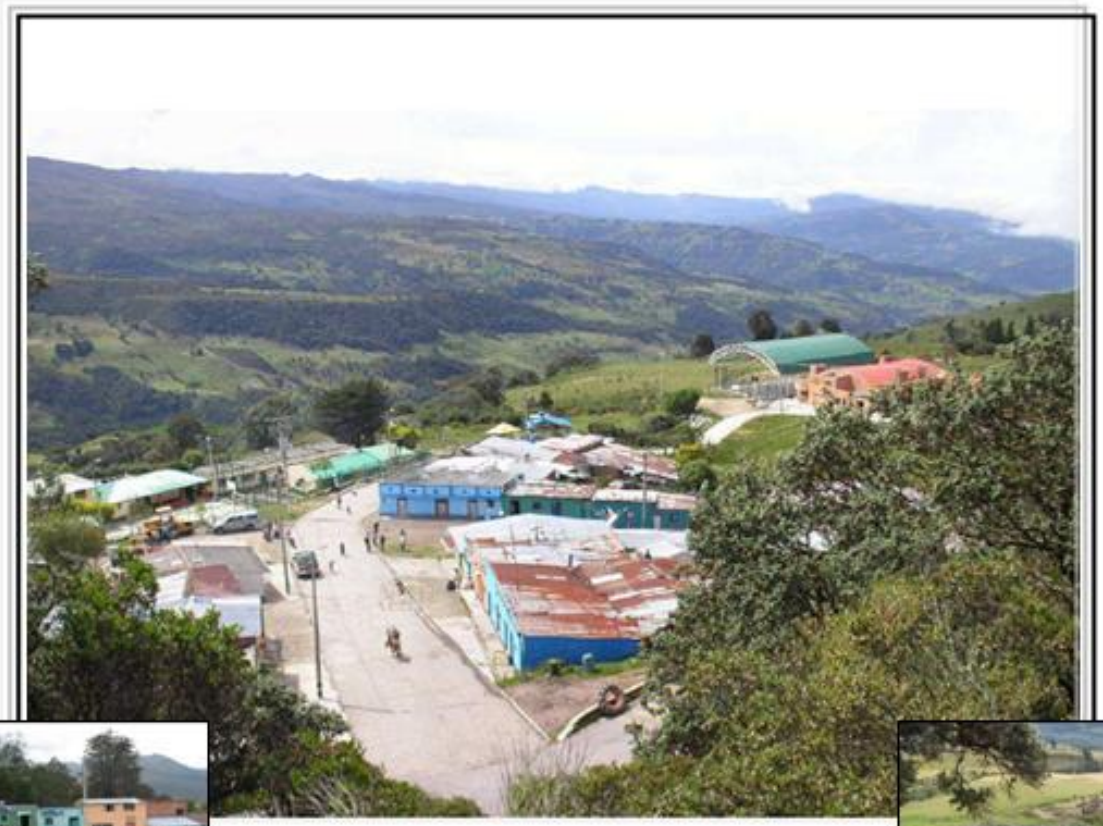
FIGURA 8.15 CRONOGRAMA DEL PLAN DE ACCIÓN

ESTA FIGURA SE ENTREGA EN PAPEL Y EN MEDIO MAGNÉTICO

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

CLASIFICADO

ESTUDIO DE RIESGOS POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN PARA EL CENTRO POBLADO SAN JUAN DE SUMAPAZ, DE LA LOCALIDAD DE SUMAPAZ, EN BOGOTÁ D.C.







GIA - 062- 09

CONTRATO No. Cons. 749 - 2009

PARTE 2 (pp. 201 – 400) DE 5 PARTES

ORIGINAL

TEXTO, PLANOS Y ANEXOS

JULIO DE 2010

GIA CONSULTORES LTDA

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La comunidad de San Juan de Sumapaz aunque pequeña en número (pues no supera las veintiún familias) y distante del perímetro de la capital (a cerca de 70 kilómetros) exhibe como una de sus mayores fortalezas la organización, reflejada en agremiaciones como el sindicato agrícola y la junta de acción comunal; Organizaciones que con trabajo mancomunado han logrado dotar al centro poblado de los servicios públicos, y del Centro de Salud (UPA). Dinámica posiblemente ligada a la conformación por edades: los adultos (mayores a 25 años) y los niños son los grupos poblacionales por excelencia, los adolescentes y la tercera edad son los núcleos minoritarios.

Los materiales que sirven de basamento al poblado son areniscas, limolitas y arcillolitas (particularmente), expuestos en el corredor norte y noroccidente, y en parte del cauce de la Quebrada San Juan 2, y casi totalmente cubiertos por potentes suelos residuales, sobre los que yace la infraestructura física de San Juan: los espesores de los suelos divagan entre los 2 y los 11m, y alcanzan su máximo al centro y sur de San Juan. Escenarios enmarcados, el primero, por el desarrollo urbano, y el segundo por las laderas con mayores pendientes (de hasta 40°), y proclives a la gestación de procesos de inestabilidad, al punto de ser los de mayor condición de amenaza, al corto, mediano y largo plazo, y que se encumbran en media y alta para los dos últimos estadios.

La morfología es el resultado de la acción de pequeños plegamientos que dan lugar a sucesiones de contrapendientes y laderas estructurales; que provocan no solo las variaciones en el plano de estratificación sino que a su vez demarcan 4 subdominios estructurales (I a IV); el primero y cuarto subdominio descansan en posición E1=300/10; el segundo esta dibujado por secuencias cuasi horizontales, en el que el plano de estratificación está orientado E2=284/02, y el tercero enmarca laderas estructurales con bajo ángulo de buzamiento (la estratificación exhibe como orientación media E3=145/10). No obstante, y contrario a tan generosa subdivisión la posibilidad cinemática de falla, por los planos de discontinuidad, en los macizos carece de asidero; y los escenarios de amenaza en ningún caso involucran espesos cuerpos rocosos.

Las expresiones morfodinámicas entrelazan, entre otras, caída de bloques, los deslaves y tres deslizamientos, dos de estos últimos merecen especial interés. El primero, ocurrido años atrás, se circunscribe en la vertiente oriental de la Quebrada San Juan1 contiguo al camino que conduce al cementerio, su origen está ligado a la rotura de la línea de conducción de aguas negras (que discurría por allí), causante de la saturación y reblandecimiento de las capas de suelo (el residual y el lleno antrópico); el segundo, abarca parte de la ladera al sur de la escuela, tallado en los horizontes residuales arcillosos, su gestación encierra como factores condicionantes y desencadenantes, la meteorización, las altas pendientes (superiores al ángulo de fricción básico) y la saturación. Pueden llegar a afectar parte de la infraestructura de San Juan – el carreteable al cementerio, y la escuela – por lo que su intervención con sistemas de despresurización y estabilización es inaplazable.

En San Juan como en muchos otros centros poblados del país y de la capital, la alta vulnerabilidad social simbolizada por las escasas oportunidades de trabajo bien remunerado, por el déficit en educación superior y en inversión en servicios hospitalarios de primer nivel, y en programas de saneamiento público, refiere un estado de deterioro en el que la subsistencia y hasta el desarrollo personal se tornan difíciles. La falta de instrumentos para superarla, prolongan la permanencia en tal posición tanto de las generaciones presentes como de las futuras. Su reflejo patente, en la precaria calidad constructiva de las edificaciones de vivienda, que a falta de recursos económicos y técnicos, se han erigido al margen de la protección a la vida. Particularidades que contrastan con la baja vulnerabilidad física (por lo menos desde el orden de la remoción en masa), que permanece inconunme a lo largo de los diferentes escenarios temporales (1, 10,

25 y 50 años), y con el riesgo (por remoción en masa), que su peor cara es medio para el marco de los 50 años. En contraposición, las edificaciones institucionales de reciente aparición (década 2000), rescatan la construcción formal, y la importancia de que estas inversiones se gesten con mayor intensidad, de manera que se estimule el mejoramiento de las condiciones de habitabilidad.

Una de las peculiaridades que caracteriza al centro poblado es la homogeneidad en las construcciones, específicamente en el sistema constructivo utilizado, forjado en muros de carga sin amarres, que dista de norma alguna (incluida la NSR-98): es el fruto de la percepción, del conocimiento y del esfuerzo de los mismos propietarios. En las cubiertas y los muros interiores predominan la madera y el zinc, que ofrecen baja resistencia ante casi cualquier inclemencia del clima o de los fenómenos naturales: los sismos y los procesos de inestabilidad, pormenor que hace a las edificaciones sísmicamente muy vulnerables.

San Juan está ubicado en una privilegiada zona, desde la que se divisa parte del páramo de Sumapaz, su extensión y morfología, disectada por dos cuerpos de agua sin dañina repercusión (de ninguna manera tienen capacidad de inundación y desbordamiento, si el periodo de retorno es inferior a los 100 años y las avalanchas solo podrían tener repercusión aguas debajo de San Juan), que invitan a reflexionar acerca de la importancia de conservar y preservar las riquezas hídricas y ambientales del páramo y del país. Sin embargo, y contradictoriamente, el agua (específicamente la subsuperficial) es uno de los más importantes agentes contribuyentes y detonantes de los fenómenos de remoción en masa, por menor que fundamenta como eje central las alternativas de mitigación del control de los efluentes superficiales y subsuperficiales, pero sin detrimento del entorno

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. Bogotá D.C.

- 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.

- CONSORCIO SUMAPAZ (2008), "Construcción del Sistema de Acueducto para la Vereda de Mochuelo Alto Sector Lagunitas de la localidad de Ciudad Bolívar, y el Diseño y Construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales para el Sistema de Alcantarillado de la Vereda de San Juan y el Diseño y Construcción de la Captación Nueva para el Sistema de Acueducto para las Veredas de Animas Altas, Auras y Nazareth, Sobre la Quebrada Taque Grande en la Localidad de Sumapaz". Acueducto, Agua y alcantarillado de Bogotá. Bogotá D.C.

- CONSORCIO SUMAPAZ (2007). "Estudio de Suelos y Cimentaciones – Sede Administrativa Local de Sumapaz – Localidad de Sumapaz". Informe Final. Bogotá D.C.

- 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.

- DAPD (2009) "Proyecto Borrador de Decreto UPR Sumapaz". DAPD, Unidad de Planeamiento Rural, Bogotá D.C.

- DE PORTA J. Léxico Estratigráfico. París : Centre National de la Recherche Scientifique, 1974

- DUNCAN J. M. and Wright S. G. (2005). "Soil Strength and Slope Stability". Wiley and Sons Inc. New Jersey.

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

- GEOCING (2005), "Estudios y Elaboración de Mapas de Riesgo Físico y Red de Comunicaciones para los Asentamientos de Betania, Nazareth y la Unión de la Localidad de Sumapaz". Secretaría de Gobierno. Bogotá D.C.

- HOYOS E.O. (2007), "Diseños Detallados, Presupuestos y Especificaciones Técnicas de las Obras de Mitigación de Riesgo en los Asentamientos Betania 1, Betania 2, La Unión 1 y La Unión 2 de la Localidad de Sumapaz en Bogotá D.C.". FOPAE, Bogotá D.C.

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

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

- 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..

- INGEOMINAS (1999), "Plancha 265 Icononzo - Esc 1:100.000". Bogotá D.C.

- 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.

- LESMES M. C. (2009). "Diagnóstico Técnico DI-4183, Finca La Esperanza, en La Vereda Tunal Bajo - Corregimiento de San Juan". FOPAE – DPAE. Bogotá D.C.

- (_____). Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá: Boletín de Geología No. 7:5-36, Bucaramanga (1961).

- MONTENEGRO L.F. (1997), "Usme, Ciudad Bolívar, Sumapaz. Instrumentos de Manejo Administrativo y Urbanístico de las Áreas Rurales". DAPD, Santafé de Bogotá.

- SARACHE E. (2007), "Asesorar, Ajustar y Articular la Propuesta de los Planes de Mejoramiento Integral de los Centros Poblados Rurales San Juan y La Unión y los Asentamientos Menores Santo Domingo, Concepción, Capitolio y Granada de la Unidad de Planeamiento Rural del Río Sumapaz que Viabilice la Formulación del Proyecto de Decreto de Reglamentación". DAPD, Bogotá D.C.

- 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).

- VAN DER Hammen T. (1955) Plioceno y Pleistoceno del Altiplano de Bogotá y Alrededores : Análisis geográficos No. 24. Bogotá : Publicación IGAC.

- (_____). Memoria Explicativa de los Mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá: Revista Análisis geográficos No. 24. Bogotá: IGAC (1995)

- VAN ZUIDAM R. (1985). Aerial Photo-Interpretattion in Terrain Analysis and Geomorfhologic Mapping. Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).

- TURNER A. K. AND SCHUSTER L R. (1996). "Landslides Investigation and Mitigation". Special Report 247. Transportation Research Borrad. Nacional Research Council. USA.