
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

CONTRATO No: 0286 de 2014

**PROYECTO “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE
PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE
MEDELLÍN”**

**INFORME DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR
MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS
TORRENCIALES
POLÍGONO ESFUERZOS DE PAZ**

MAYO DE 2018

VERSIÓN 8

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
--	---	--

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	16/07/2015	No Aplica	Documento Inicial
1	20/09/2015	Todos	Documento Final
2	30/10/2015	Todos	Correcciones documento final
3	27/11/2015	Fueron incluido dos nuevos capítulos, uno con análisis de redes de servicios públicos y otro con las zonas de retiro y fueron modificados los de vulnerabilidad y conclusiones y recomendaciones	Revisión del documento final
4	03/12/2015	Se hicieron ajustes menores a Capítulos 19 y 20	Revisión del documento final
5	17/12/2015	Se actualizó el mapa de riesgo total por movimientos en masa y se incluyó la tabla de inventario de las estructuras en alto riesgo en el Capítulo 17. Se actualizó el mapa de retiro hidrológico y geológico en el Capítulo 20	Revisión del documento final
6	16/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
7	21/12/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA	Revisión del documento Final
8	18/05/2018	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de La Interventoría con base en requerimientos del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final

	<p align="center"> SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ </p>	
--	---	--

CONTROL DE DISTRIBUCIÓN		
No.	Destinatario	Responsable
1	EDU	Ing. Rafael Tobías Álvarez (Supervisor)

Elaboró	Revisó	Aprobó
Geol. Pedro De Greiff Gautier Director Proyecto SIGA	INGEOCILCON Interventoría	Ing. Rafael Tobías Álvarez Supervisor EDU
Fecha: 30/11/2017	Fecha:	Fecha:

TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE VERSIÓN	2
CONTROL DE DISTRIBUCIÓN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	5
3. UNIDAD MORFODÍNAMICA INDEPENDIENTE	7
3.1 GENERALIDADES.....	7
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	10
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	19
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	19
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)	19
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv).....	21
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)	21
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)	21
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)	21
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	22
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)	22
4.2 GEOLOGÍA LOCAL	23
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)	28
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ.....	31
4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)	31
4.2.4 Depósito de talus (Qt)	32

4.2.5	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)	33
4.2.6	Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	35
4.2.7	Dunitas de Medellín (JKuM)	37
4.2.8	Anfibolitas de Medellín (TRaM)	40
5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	43
5.1	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	43
5.1.1	Macrounidades geomorfológicas	43
5.1.2	Unidades Geomorfológicas.....	46
5.2	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	49
5.2.1	Unidad de Altiplano AP	53
5.2.2	Unidad de Escarpe de Altiplano EAP	53
5.2.3	Unidad Peldaño Alto PÑA	54
5.2.4	Unidad Peldaño Bajo PÑB	54
5.2.5	Unidad Peldaño Tectónico PÑT	55
5.2.6	Unidad Lomeríos Amplios LRA	56
5.2.7	Unidad de Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF	56
5.2.8	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF	57
5.2.9	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM	57
5.2.10	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	58
5.2.11	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS	59
5.2.12	Unidad de Lomo de Gancho LG.....	59
5.2.13	Unidad de Lomo de Obturación LO.....	60
5.2.14	Unidad de Escarpe Corto Semicircular ECSC.....	61
5.2.15	Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC.....	61
5.2.16	Unidad de Superficie Antrópica SA	61
5.2.17	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI	61
5.2.18	Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	62
5.2.19	Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI.....	62

5.2.20	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI.....	63
5.2.21	Unidad de Vertiente Escarpada VE.....	63
5.2.22	Unidad de Vertiente Moderada VM.....	64
5.2.23	Unidad de Vertiente Suave VS	65
5.2.24	Unidad de dolinas	65
5.2.25	Unidad de Karren o Lapiaz	67
5.3	MORFODINÁMICA REGIONAL	68
5.4	MORFODINÁMICA LOCAL	73
6.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	81
6.1	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	81
6.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....	82
6.2.1	Orientación y buzamiento	85
6.2.2	Espaciamiento	92
6.2.3	Continuidad.....	93
6.2.4	Abertura.....	93
6.2.5	Relleno	94
6.2.6	Alteración.....	95
6.2.7	Rugosidad	96
6.2.8	Agua	97
6.2.9	Resistencia de las Paredes.....	98
6.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	99
7.	EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA.....	106
7.1	ASPECTOS GENERALES	106
7.2	MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS.....	107

7.3	MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA	112
7.4	MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA.....	114
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	119
8.1	ASPECTOS GENERALES	119
8.2	LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG	121
8.3	EL GRADIENTE OROGRÁFICO	125
8.4	EL GRADIENTE NULO	128
8.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	133
8.5.1	Zonas de recarga.....	133
8.5.2	Caracterización del acuífero	134
8.5.3	Flujo regional y flujo local.....	134
8.5.4	Zonas de descarga	135
8.6	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	135
8.6.1	Piezómetros P-EP-PZ-17B y P-EP-PZ-17D	138
8.6.2	Piezómetros P-EP-PZ-19B y P-EP-PZ-19D	139
8.6.3	Piezómetros P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D	139
8.6.4	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	140
8.7	AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	141
9.	ASPECTOS SÍSMICOS.....	146
10.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	150
10.1	SONDEOS EXPLORATORIOS	150
10.1.1	Perforaciones.....	150

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
--	---	--

10.1.2	Líneas geofísicas	170
10.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	193
10.2.1	Ensayos de clasificación	194
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	201
10.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES.....	204
10.3.1	Aspectos generales	204
10.3.2	Lleno antrópico	204
10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros	206
10.3.4	Depósitos coluviales	207
10.3.5	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)	209
10.3.6	Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	210
10.3.7	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte	211
11.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	213
11.1	GENERALIDADES.....	213
11.2	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	213
11.3	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN.....	215
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa	218
11.3.2	Estación Mazo	218
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga.....	219
11.4	DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS	220
11.4.1	Parámetros morfométricos de las cuencas	223
11.4.2	Usos del suelo	223
11.4.3	Tiempos de concentración	226
11.5	CAUDALES MÁXIMOS.....	227
11.5.1	Intensidades de Diseño	227

	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
--	---	--

11.5.2	Método Racional	228
11.5.3	Hidrogramas sintéticos	229
11.5.4	Regionalización de caudales	233
11.5.5	Resumen de caudales	236
12.	ASPECTOS HIDRÁULICOS	238
12.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	238
12.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES	238
12.2.1	Quebrada La Castro	240
12.2.2	Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2	250
12.2.3	Quebrada San Antonio	252
12.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES	255
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D	255
12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	256
12.3.3	Información topográfica	257
12.3.4	Tamaño de la malla	257
12.3.5	Condiciones de frontera.....	257
12.3.6	Condiciones iniciales	257
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica.....	258
12.3.8	Coeficiente de rugosidad	258
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	258
12.3.10	Resultados en la Quebrada La Castro (Condiciones Actuales)	259
12.3.11	Resultados drenaje Afluente La Castro 1 (Condiciones Actuales).....	262
12.3.12	Resultados drenaje Afluente La Castro 2 (Condiciones Actuales).....	263
12.3.13	Resultados en la Quebrada San Antonio (Condiciones Actuales)	263
13.	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	266
13.1	METODOLOGÍA.....	266

13.1.1	Objetivo y aspectos generales	266
13.1.2	Escenarios de análisis	266
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad	268
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla	271
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)	273
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza	276
13.2	RESULTADOS	277
14.	AMENAZA POR INUNDACIONES	291
14.2	ASPECTOS GENERALES	291
14.3	METODOLOGÍA.....	291
14.4	RESULTADOS	294
15.	AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	297
15.1	ASPECTOS GENERALES	297
15.2	AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA	297
15.3	AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL LECHO	298
15.4	METODOLOGÍA.....	300
15.5	RESULTADOS	304
15.5.1	Resultados generales	304
15.5.2	Resultados en puentes o pasos peatonales sobre la Quebrada La Castro	304
15.6	COMPARACIÓN ENTRE AMENAZA POR INUNDACIONES Y POR AVENIDAS TORRENCIALES	309
16.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	310

16.1	ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL.....	310
16.2	VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....	312
16.2.1	Metodología de análisis	312
16.2.2	Calibración de la metodología.....	318
16.2.3	Levantamientos de campo y análisis de la información.....	327
16.2.4	Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas.....	340
16.3	VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES.....	351
16.4	SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS.....	363
17.	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	366
17.1	ASPECTOS GENERALES	366
17.2	CÁLCULO DEL RIESGO	366
17.3	RESULTADOS	367
18.	RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	377
18.1	METODOLOGÍA.....	377
18.2	RESULTADOS	377
19.	ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....	383
19.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES.....	383
19.2	SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA	383
19.3	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES	388

	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
--	---	--

19.3.1	Tubería en concreto no reforzado (Clase 1).....	388
19.3.2	Tubería en Policloruro de Vinilo (PVC)	388
19.3.3	Tubería en Hierro Dúctil (HD).....	388
19.3.4	Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes	388
19.4	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES	388
20.	ZONAS DE RETIRO HIDROLÓGICO Y GEOLÓGICO.....	390
20.2	JUSTIFICACIÓN	390
20.3	ASPECTOS METODOLÓGICOS	390
20.4	RESULTADOS	392
21.	PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO.....	395
21.1	OBRAS PARA MOVIMIENTOS EN MASA	395
21.2	OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	412
21.2.1	Análisis de resultados en condiciones actuales	412
21.2.2	Análisis de resultados en condiciones proyectadas	414
22.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	423
23.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	432
24.	LIMITACIONES	439

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de la UMI del polígono al interior del Barrio Esfuerzos de Paz.	10
Figura 2.	Panorámica general de la UMI en la parte alta de la Zona 1	14
Figura 3.	Panorámica general de la UMI en la parte alta de la Zona 2	14
Figura 4.	Panorámica general de la zona baja polígonos de Esfuerzos de Paz y Villa Turbay.....	16
Figura 5.	Ocupación de la Quebrada La Castro en el Polígono Esfuerzos de Paz	17
Figura 6.	Panorama de las condiciones de los afluentes de la Quebrada La Castro al interior del Polígono Esfuerzos de Paz.....	18
Figura 7.	Zona del lleno de perforación P-SA-PR-14 en cartografía del año 1998.....	29
Figura 8.	Lleno antrópico reportado en la Perforación P-EP-PR-22.....	29
Figura 9.	A) Lleno antrópico Estación de Campo MAD08-EP.B) Margen izquierda Qda La Castro (MAD72-U-EPVT), cerca al Colegio Gabriel García Márquez	30
Figura 10.	Lleno antrópico Estaciones de Campo SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA.....	30
Figura 11.	Capa de cenizas volcánicas removilizadas.....	31
Figura 12.	Depósito aluviotorrencial parte baja del Polígono Esfuerzos de Paz	32
Figura 13.	Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Castro 4.....	32
Figura 14.	Depósito de talus compuesto de fragmentos de anfibolitas	33
Figura 15.	Depósito de flujo de lodos y/o escombros estaciones MAD08-EP y MAD12-EP	34
Figura 16.	Depósito de flujos de lodos y/o escombros.....	35
Figura 17.	Suelo saprolítico del cuerpo granítico con estructura bandeada (Brecha de intrusión)	36
Figura 18.	Horizonte IC-Gruss del cuerpo granítico en la perforación P-EP-PR-22	36
Figura 19.	A) Suelo saprolítico con cuarzo lechoso. B) Meteorización esferoidal	37
Figura 20.	Cuerpo de dunitas cizalladas.....	38
Figura 21.	Brecha tectónica de Dunitas-Anfibolitas sobre la Quebrada La Castro 4.....	38
Figura 22.	Horizonte IB de meteorización con costra de óxidos de hierro localizado en la parte alta de la UMI	39
Figura 23.	Horizonte IC de meteorización sobre talud	39

Figura 24.	Bloques en superficie por erosión superficial en el Horizonte IIA de meteorización.....	40
Figura 25.	Grado de fracturamiento en Horizonte IIA de las dunitas.....	40
Figura 26.	A) Brecha Dunitas-Anfibolitas.B) Horizonte IC de meteorización	41
Figura 27.	Horizonte IC de brecha tectónica en las Anfibolitas de Medellín.....	41
Figura 28.	Horizonte IIA de las Anfibolitas de Medellín sobre la Quebrada La Castro	42
Figura 29.	Perfil geomorfológico A-A'	53
Figura 30.	Perfil geomorfológico B-B'	53
Figura 31.	Perfil geomorfológico C-C'	53
Figura 32.	Unidad de Altiplano AP y Escarpe de Altiplano EAP	54
Figura 33.	Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA	55
Figura 34.	Unidad de Peldaño Bajo PÑB, y Vertiente Suave VS	55
Figura 35.	Unidad de Peldaño Tectónico PÑT y Lomeríos Amplios LRA.....	56
Figura 36.	Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF, Metro Cable Alejandro Echavarría.....	57
Figura 37.	Unidad de Vertiente Escarpada VE, Peldaño Alto PÑA, Vertiente Escarpada VE, Vertiente Moderada VM y Vertiente Moderada Colinada	58
Figura 38.	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM, margen izquierda Quebrada La Castro.....	58
Figura 39.	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF, Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS y Depósitos Sin Incisión DSI.....	59
Figura 40.	Unidad de Lomo Morfotectónico LMT.....	60
Figura 41.	Lomo de Obturación LO y Vertiente Escarpada VE.....	60
Figura 42.	Unidad de Escarpe Corto Semicircular ECSC y Depósitos de Sin Incisión DSI	61
Figura 43.	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI.....	62
Figura 44.	Unidad de Superficie Antrópica SA, Superficies con Baja Incisión SBI y Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF	63
Figura 45.	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI	63
Figura 46.	Unidad de Vertiente Escarpada VE	64
Figura 47.	Unidad de Vertiente Moderada VM, Peldaño Alto PÑA y al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA	64

Figura 48.	Unidad de Vertiente Suave.....	65
Figura 49.	Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007).....	66
Figura 50.	Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales.....	67
Figura 51.	Unidad de Dolina parte alta de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay.....	67
Figura 52.	Geoforma pseudokárstica Karren sobre las Dunitas de Medellín	68
Figura 53.	Unidad de Karren exhibiendo planos de discontinuidad	68
Figura 54.	Distribución de los fenómenos.....	70
Figura 55.	Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos.....	71
Figura 56.	Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987 (Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987).....	73
Figura 57.	Proceso inactivo sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro	77
Figura 58.	Deslizamientos activos sobre brecha de Dunitas en Polígono Esfuerzos de Paz SFJ06-EP.....	78
Figura 59.	Bloques en superficie sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro	78
Figura 60.	Escarpes de roca con alto grado de fracturamiento.....	79
Figura 61.	A) Surcos sobre suelo saprolítico del granito. B) Zonas húmedas.....	79
Figura 62.	Erosión en montículos sobre el Horizonte IB de las Dunitas.....	80
Figura 63.	En amarillo la zona de estudio y las fallas presentes (Restrepo, J., 2008) ..	81
Figura 64.	Falla La Aguadita y Falla La Castro (Restrepo, J., 2008).....	84
Figura 65.	Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	87
Figura 66.	Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	88
Figura 67.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las estaciones KGL02-U-EP, KGL09-U-EP y KGL10-U-EP	89
Figura 68.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones KGL11-U-EP y SFJ21-EP.....	90
Figura 69.	Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades.....	92
Figura 70.	Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.....	93
Figura 71.	Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades	94
Figura 72.	Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades	95

Figura 73.	Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades	96
Figura 74.	Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de González de Vallejo, 2002)	97
Figura 75.	Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades	97
Figura 76.	Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.....	98
Figura 77.	Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	99
Figura 78.	Secciones analizadas en partes alta y baja de la UMI.	100
Figura 79.	Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	102
Figura 80.	Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	103
Figura 81.	Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	104
Figura 82.	Análisis cinemático Sección 4 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	105
Figura 83.	Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica.....	106
Figura 84.	Esquema de localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)	120
Figura 85.	Recta Meteórica para Colombia	121
Figura 86.	Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio	123
Figura 87.	Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental...	125
Figura 88.	Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	127
Figura 89.	Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	127
Figura 90.	Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	128
Figura 91.	Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	128
Figura 92.	Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012).....	131

Figura 93.	Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá.....	134
Figura 94.	Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil	137
Figura 95.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-17B y P-EP-PZ-17D.....	138
Figura 96.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-19B y P-EP-PZ-19D.....	139
Figura 97.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D.....	140
Figura 98.	Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono Esfuerzos de Paz	141
Figura 99.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica	143
Figura 100.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica	144
Figura 101.	Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)	146
Figura 102.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay	155
Figura 103.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	156
Figura 104.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	157
Figura 105.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	158
Figura 106.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	159
Figura 107.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	160
Figura 108.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	161
Figura 109.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	162
Figura 110.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	163
Figura 111.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	164

Figura 112.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	165
Figura 113.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	166
Figura 114.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	167
Figura 115.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	168
Figura 116.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación) ..	169
Figura 117.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-01	173
Figura 118.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-01	173
Figura 119.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-01	173
Figura 120.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) ...Línea P-EP-LG-01.....	174
Figura 121.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-02	175
Figura 122.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-02	175
Figura 123.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-02	175
Figura 124.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) ...Línea P-EP-LG-02.....	176
Figura 125.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-03	177
Figura 126.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-03	177
Figura 127.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-03	177
Figura 128.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-03	178
Figura 129.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-01	179
Figura 130.	Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-01	179
Figura 131.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-01	179
Figura 132.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-01.....	180

Figura 133.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-02	181
Figura 134.	Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-02	181
Figura 135.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-02	181
Figura 136.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-02	182
Figura 137.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-03	183
Figura 138.	Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-03	183
Figura 139.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-03	183
Figura 140.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) ...Línea P-VT-LG-03.....	184
Figura 141.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-04	185
Figura 142.	Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-04	185
Figura 143.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-04	185
Figura 144.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) ...Línea P-VT-LG-04.....	186
Figura 145.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-03	187
Figura 146.	Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-03.....	187
Figura 147.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-03.....	187
Figura 148.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) ...Línea U-EPVT-LG-03.....	188
Figura 149.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-06	189
Figura 150.	Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-06.....	189
Figura 151.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EPVT-LG-06.....	189
Figura 152.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-07	190
Figura 153.	Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-07.....	190
Figura 154.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-07.....	191
Figura 155.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-08	192

Figura 156.	Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-08.....	192
Figura 157.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-08.....	192
Figura 158.	Curva de resistividad vs profundidad (AB/2), P-EP-SEV-03.	193
Figura 159.	Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande.....	199
Figura 160.	Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad	199
Figura 161.	Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad	200
Figura 162.	Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad	200
Figura 163.	Resultados corte directo Muestra UEP1-M1 a 1.0 m de profundidad.....	203
Figura 164.	Resultados corte directo Muestra U-EP-PP-02-M4 a 4.2 m de profundidad	203
Figura 165.	Resultados corte directo Muestra U-EP-PP-03-M3 a 1.1 m de profundidad	204
Figura 166.	Resultados corte directo Muestra P-EP-PR-20-M2 a 1.5 m de profundidad	204
Figura 167.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico	205
Figura 168.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente	207
Figura 169.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos.....	208
Figura 170.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas	209
Figura 171.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados del Batolito Antioqueño	211
Figura 172.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa.....	218
Figura 173.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo	218
Figura 174.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga	219
Figura 175.	Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)	220

Figura 176.	Quebrada La Castro aguas arriba de la intercepción del cauce con límite del Polígono Esfuerzos de Paz	240
Figura 177.	Inicio canal abierto de paredes de concreto y fondo natural con presencia de viviendas cercanas y cámaras de inspección.	241
Figura 178.	Canal con paredes en concreto y fondo natural. Presencia de viviendas cercana al cauce	241
Figura 179.	Cambio de sección en cauce, talud natural margen izquierda y muro de contención margen derecha.	242
Figura 180.	Cambio de sección con márgenes en fragmentos de roca y presencia de viviendas	242
Figura 181.	Invasión parcial del fondo del cauce.....	243
Figura 182.	Cambio de dirección en cauce con canal de paredes en concreto y fondo natural.....	244
Figura 183.	Quebrada La Castro - Tramo 2 y descarga del afluente AF La Castro 1 ...	244
Figura 184.	Reducción gradual de ancho en canal con paredes en concreto y fondo natural.....	245
Figura 185.	Tramo 3 Canal con paredes en concreto y fondo natural	245
Figura 186.	Puentes peatonales 1, 2, 3 y 4 ubicados en el Tramo 1 de la Quebrada La Castro	246
Figura 187.	Puente PTE 5 ubicado en el Tramo 1 y puentes PTE 6 y 7 ubicados en el Tramo 2 de la Quebrada La Castro	247
Figura 188.	Puente PTE 8 ubicado en Tramo 2 y Puentes PTE 9 a PTE 13 ubicados en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro	248
Figura 189.	Puentes PTE 14 a PTE 25 en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro	249
Figura 190.	Parte baja del afluente AF La Castro 1	251
Figura 191.	Parte media del afluente AF La Castro 2.....	251
Figura 192.	Vaguada Afluente AF La Castro 2	252
Figura 193.	Parte inicial del tramo analizado de la Quebrada San Antonio correspondiente a un canal en concreto.....	253
Figura 194.	Parte media del tramo analizado de la Quebrada San Antonio que corresponde a un canal natural con presencia de viviendas.....	254
Figura 195.	Parte final del tramo analizado de la Quebrada San Antonio que corresponde a un canal en concreto	255
Figura 196.	Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar.....	269

Figura 197.	Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa	275
Figura 198.	Esquema con localización de los focos de inestabilidad que afectan el Polígono Esfuerzos de Paz	287
Figura 199.	Esquema de localización en planta de la sección analizada.....	288
Figura 200.	Análisis de estabilidad en condiciones actuales en la Quebrada La Castro	289
Figura 201.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Castro	289
Figura 202.	Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo	292
Figura 203.	Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al. (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)	293
Figura 204.	Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada Af. La Castro 1.....	300
Figura 205.	Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes lo largo de la Quebrada Af. La Castro 2	300
Figura 206.	Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno.....	303
Figura 207.	Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa	313
Figura 208.	Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables.....	317
Figura 209.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa	318
Figura 210.	Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo...	319
Figura 211.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías	320
Figura 212.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973.....	321
Figura 213.	Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	323

Figura 214.	Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	326
Figura 215.	Zonificación esquemática del Polígono Esfuerzos de Paz.....	329
Figura 216.	Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras....	345
Figura 217.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales	353
Figura 218.	Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	377
Figura 219.	Localización en planta de los Perfiles 1 a 5 cercanos a los Focos 2, 3, 5, 7 y 10 incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles	396
Figura 220.	Zonificación Polígono Esfuerzos de Paz	397
Figura 221.	Análisis de estabilidad pseudoestáticos del Perfil 1 en condiciones naturales	398
Figura 222.	Análisis de estabilidad pseudoestáticos del Perfil 2 en condiciones naturales	398
Figura 223.	Análisis de estabilidad pseudoestáticos del Perfil 3 en condiciones naturales	399
Figura 224.	Análisis de estabilidad pseudoestáticos del Perfil 4 en condiciones naturales	399
Figura 225.	Análisis de estabilidad pseudoestáticos del Perfil 5 en condiciones naturales	400
Figura 226.	Imagen asociada al Perfil 1 (Foco 5) mostrando erosión.....	401
Figura 227.	Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución en pantalla de pilas.....	402
Figura 228.	Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución en pantalla de pilas.....	403
Figura 229.	Imágenes asociadas a Perfiles 2 y 3 (Focos 2 y 3) mostrando erosión y alta pendiente	403
Figura 230.	Análisis de estabilidad del Perfil 4 implementando solución en pantalla de pilas.....	405
Figura 231.	Análisis de estabilidad del Perfil 4, implementando solución con una sola pantalla de pilas	405
Figura 232.	Imágenes asociadas a Perfil 4 (Foco 10)	406

Figura 233. Análisis de estabilidad del Perfil 5 implementando solución con pantalla de pilas.....	407
Figura 234. Imágenes asociadas a Perfil 5 (Foco 7)	407
Figura 235. Imágenes asociadas a Foco 11	408
Figura 236. Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente.....	410
Figura 237. Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros	411
Figura 238. Localización de inclinómetros propuestos para monitoreo de Polígono Esfuerzos de Paz incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles	412
Figura 239. Estructura general de la información entregada	431

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local	49
Tabla 2.	Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles	70
Tabla 3.	Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio	72
Tabla 4.	Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor	73
Tabla 5.	Colores definidos para los procesos según año	77
Tabla 6.	Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006.....	82
Tabla 7.	Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas	85
Tabla 8.	Familias de discontinuidades considerando todos los datos.....	86
Tabla 9.	Familias de discontinuidades en la Estación de Campo KGL02-U-EP.....	90
Tabla 10.	Familias de discontinuidades en la estación KGL09-U-EP	90
Tabla 11.	Familias de discontinuidades en la estación KGL10-U-EP	91
Tabla 12.	Familias de discontinuidades en la estación KGL11-U-EP	91
Tabla 13.	Familias de discontinuidades en la estación SFJ21-EP	91
Tabla 14.	Descripción del espaciamiento de las discontinuidades	92
Tabla 15.	Descripción de la continuidad de las discontinuidades	93
Tabla 16.	Descripción de la abertura de las discontinuidades	94
Tabla 17.	Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas.....	100
Tabla 18.	Resumen resultados análisis cinemático.....	101
Tabla 19.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas	107
Tabla 20.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas ..	108
Tabla 21.	Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica.....	112
Tabla 22.	Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio.....	123
Tabla 23.	Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá.....	124

Tabla 24.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	126
Tabla 25.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás.....	129
Tabla 26.	Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10	148
Tabla 27.	Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños....	149
Tabla 28.	Exploración geotécnica utilizada en la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay	153
Tabla 29.	Tabla de Valores de Resistividad eléctrica (Arias, 2011)	171
Tabla 30.	Coordenadas de las líneas ReMi realizadas en la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay y de la Línea SEV realizada en el Polígono Esfuerzos de Paz	172
Tabla 31.	Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio.....	194
Tabla 32.	VARIABLES DE ESTADO DE ALGUNAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	198
Tabla 33.	VARIABLES DE ESTADO DE ALGUNAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	202
Tabla 34.	Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales	211
Tabla 35.	Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual	216
Tabla 36.	Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca.....	223
Tabla 37.	Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Esfuerzos de Paz	223
Tabla 38.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en Esfuerzos de Paz.....	226
Tabla 39.	Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración.....	226
Tabla 40.	Tiempos de concentración calculados para las cuencas	227
Tabla 41.	Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)	228
Tabla 42.	Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca	228
Tabla 43.	Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca	229
Tabla 44.	Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización	234
Tabla 45.	Resultados de regionalización de caudales máximos.....	234
Tabla 46.	Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años	236
Tabla 47.	Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años	236

Tabla 48.	Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años	237
Tabla 49.	Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años	237
Tabla 50.	Características y coordenadas de los puentes peatonales, ubicados en la Quebrada La Castro.....	250
Tabla 51.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales.....	261
Tabla 52.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales	262
Tabla 53.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales	262
Tabla 54.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el del Afluente La Castro 1. Condiciones actuales	263
Tabla 55.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el del Afluente La Castro 2. Condiciones actuales	263
Tabla 56.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en La Quebrada San Antonio. Condiciones actuales	264
Tabla 57.	Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad	276
Tabla 58.	Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años....	277
Tabla 59.	Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones	292
Tabla 60.	Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones	293
Tabla 61.	Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Esfuerzos de Paz	299
Tabla 62.	Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales ...	303
Tabla 63.	Verificación de las condiciones hidráulicas de los puentes o pasos peatonales en la Quebrada La Castro por Avenidas Torrenciales para un Tr=100 años. Condiciones Actuales.....	305
Tabla 64.	Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996).....	314
Tabla 65.	Factor por tipo de estructura.....	315
Tabla 66.	Factor por altura de la estructura.....	315
Tabla 67.	Factor de estado de la estructura	316
Tabla 68.	Tipo de ocupación – Movimiento en Masa.....	332
Tabla 69.	Tipo de estructura – Movimiento en Masa	332
Tabla 70.	Estado de la estructura – Movimiento en Masa	332

Tabla 71.	Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa	333
Tabla 72.	Tipo de Cubierta – Movimiento en Masa	333
Tabla 73.	Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa	341
Tabla 74.	Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa	346
Tabla 75.	Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono Esfuerzos de Paz	348
Tabla 76.	Factor de vulnerabilidad por calidad de la edificación para inundaciones y avenidas torrenciales	351
Tabla 77.	Cálculo Índice de vulnerabilidad residencial (RvI) y la vulnerabilidad física a partir de BuV	352
Tabla 78.	Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	354
Tabla 79.	Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	354
Tabla 80.	Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	355
Tabla 81.	Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales	355
Tabla 82.	Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz	363
Tabla 83.	Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz (Continuación)	364
Tabla 84.	Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz (Continuación)	365
Tabla 85.	Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total	371
Tabla 86.	Categorización del riesgo total	371
Tabla 87.	Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	374
Tabla 88.	Estructuras en alto riesgo no mitigable por retiro geológico de la Quebrada La Castro	393

LISTA DE MAPAS

Mapa 1.	Localización general del polígono dentro del Barrio Esfuerzos de Paz.....	6
Mapa 2.	UMI asociada al Polígono Esfuerzos de Paz	9
Mapa 3.	Usos generales del suelo rural UMI Esfuerzos de Paz- Villa Turbay (POT, 2014).....	13
Mapa 4.	Usos generales del suelo urbano UMI Esfuerzos de Paz- Villa Turbay (POT, 2014).....	15
Mapa 5.	Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006)	20
Mapa 6.	Geología local de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay	25
Mapa 7.	Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'	26
Mapa 8.	Perfil estratigráfico C-C'	27
Mapa 9.	Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	45
Mapa 10.	Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	48
Mapa 11.	Análisis de pendientes UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay.....	50
Mapa 12.	Unidades geomorfológicas de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay.....	52
Mapa 13.	Procesos morfodinámicos UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay.....	75
Mapa 14.	Procesos morfodinámicos UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay (Continuación).....	76
Mapa 15.	Estructuras encontradas en la UMI Esfuerzos de Paz	83
Mapa 16.	Criticidad geomorfológica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay	110
Mapa 17.	Criticidad de zonas homogéneas UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay.....	111
Mapa 18.	Criticidad morfodinámica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay	113
Mapa 19.	Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)	116
Mapa 20.	Clasificación del suelo (POT, 2014).....	117
Mapa 21.	Aptitud Geológica - Geotécnica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay	118
Mapa 22.	Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	136
Mapa 23.	Localización de la exploración directa e indirecta	151
Mapa 24.	Localización de la exploración directa e indirecta (Continuación)	152
Mapa 25.	Información cartográfica empleada en el estudio.....	214

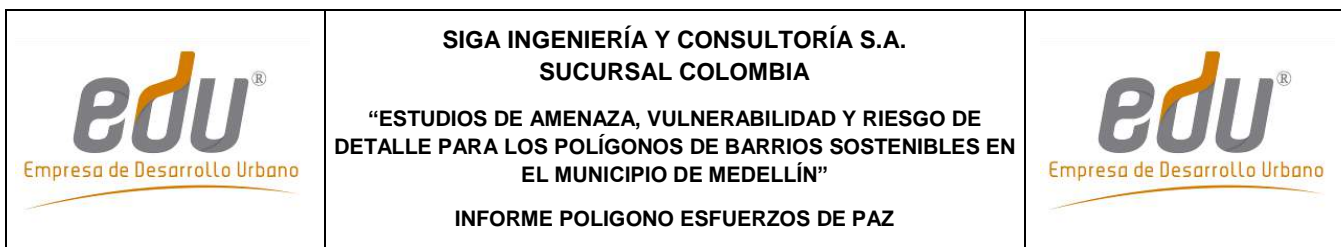
	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
--	---	--

Mapa 26.	Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	217
Mapa 27.	Red hídrica de la UMI Esfuerzos de Paz	221
Mapa 28.	Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI Esfuerzos de Paz	222
Mapa 29.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI Esfuerzos de Paz Modificado del POT (2014).....	225
Mapa 30.	Cuencas consideradas en el método de regionalización	235
Mapa 31.	Localización obras hidráulicas y puentes en condiciones actuales para el Polígono Esfuerzos de Paz	239
Mapa 32.	Manchas de inundación para las Quebradas La Castro y San Antonio y Afluentes La Castro 1 y La Castro 2 en condiciones actuales	260
Mapa 33.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono Esfuerzos de Paz.....	265
Mapa 34.	Análisis del factor de seguridad de la UMI Esfuerzos de Paz en condiciones estáticas.....	279
Mapa 35.	Análisis del factor de seguridad de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones pseudoestáticas con sismo de 0.25g	280
Mapa 36.	Probabilidad de falla de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones actuales y naturales.....	281
Mapa 37.	Probabilidad de falla de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones pseudoestáticas con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años	282
Mapa 38.	Probabilidad de falla anualizado de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones pseudoestáticas con un sismo 0.25g	283
Mapa 39.	Zonificación de la amenaza total de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g.....	284
Mapa 40.	Zonificación de la amenaza del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (Continuación)	285
Mapa 41.	Zonificación de la amenaza de la UMI Esfuerzos de Paz por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (Continuación)	286
Mapa 42.	Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en quebradas La Castro y Afluentes La Castro 1 y 2 del Polígono Esfuerzos de Paz.	295

Mapa 43.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundación. Condiciones actuales	296
Mapa 44.	Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3)	306
Mapa 45.	Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3)	307
Mapa 46.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales	308
Mapa 47.	Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	322
Mapa 48.	Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono Esfuerzos de Paz	330
Mapa 49.	Localización espacial del tipo de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	334
Mapa 50.	Localización espacial del desplante de fundaciones por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	335
Mapa 51.	Localización espacial del estado de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	336
Mapa 52.	Localización espacial del tipo de cubierta por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	337
Mapa 53.	Localización espacial de la altura de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	338
Mapa 54.	Parámetro de resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa	339
Mapa 55.	Factor intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Esfuerzos de Paz	342
Mapa 56.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa del Polígono Esfuerzos de Paz	343
Mapa 57.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono Esfuerzos de Paz	344
Mapa 58.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa del Polígono Esfuerzos de Paz	347
Mapa 59.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	349



Mapa 60.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	350
Mapa 61.	Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz	356
Mapa 62.	Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz	357
Mapa 63.	Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz	358
Mapa 64.	Localización espacial la densidad de la población en el Polígono Esfuerzos de Paz.....	359
Mapa 65.	Análisis de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz	360
Mapa 66.	Análisis de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz con el nuevo proyecto Barrios Sostenibles	361
Mapa 67.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las Vías de Acceso y Equipamientos .	362
Mapa 68.	Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	368
Mapa 69.	Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz	369
Mapa 70.	Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa	370
Mapa 71.	Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz.....	373
Mapa 72.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para viviendas y construcciones	379
Mapa 73.	Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para viviendas y construcciones	380
Mapa 74.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las vías de acceso y equipamientos	381
Mapa 75.	Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las vías de acceso y equipamientos	382
Mapa 76.	Redes de servicios públicos sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g	385

Mapa 77.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones. Condiciones actuales.	386
Mapa 78.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.	387
Mapa 79.	Retiro hidrológico y geológico planteado en la Quebrada La Castro dentro del Polígono Esfuerzos de Paz	394
Mapa 80.	Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono Esfuerzos de Paz	409
Mapa 81.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno. Polígono Esfuerzos de Paz. Condiciones Proyectadas	416
Mapa 82.	Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas la Castro y San Antonio y los Afluentes La Castro 1 y La Castro 2. Polígono Esfuerzos de Paz	417
Mapa 83.	Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas	418
Mapa 84.	Mancha de avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3). Condiciones Proyectadas.....	419
Mapa 85.	Amenaza por avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3). Condiciones Proyectadas	420
Mapa 86.	Análisis de riesgo por torrencialidad para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono Esfuerzos de Paz.....	421
Mapa 87.	Retiro POT y retiro hidrológico para la quebrada La Arenera	422



LISTA DE MAPAS DEL ATLAS

- 01_EDPLocalizacionGeneral_Medellin_T
- 02_EDPLocalizacionUMI_Medellin_T
- 03_EDPGeomorfologiaRegional_Medellin_T
- 04_EDPGeologiaLocalUMI_Medellin_T
- 05_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 06_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 07_EDPMacroUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 08_EDPUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 09_EDPPendientes_Medellin_T
- 10_EDPGeomorfologiaLocal_Medellin_T
- 11A_EDPProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 11_EDPProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 12_EDPGeologiaEstructural_Medellin_T
- 13A_EDPExploracion_Medellin_T
- 13_EDPExploracion_Medellin_T
- 14_EDPClasificaciondelSuelo_Medellin_T
- 15_EDPCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T
- 16_EDPUsosdelSueloUrbano_Medellin_T
- 17_EDPUsosdelSueloRural_Medellin_T
- 18_EDPAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

19A_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T

19B_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T

19_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T

20_EDPRedHidricaUMI_Medellin_T

21_EDPManchaInundaciones_Medellin_T

22_EDPManchaInundacionesCondProyecto_Medellin_T

23_EDPManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_T

24_EDPManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T

25_EDPAmenazaInundaciones_Medellin_T

26_EDPAmenazaInundacionesCondProyecto_Medellin_T

27_EDPAmenazaAvenidasTorrenciales_Medellin_T

28_EDPAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T

29_EDPTipodeEstructura_Medellin_T

30_EDPDesplantedeFundaciones_Medellin_T

31_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_T

32_EDPTipodeCubierta_Medellin_T

33_EDPAlturadelaConstruccion_Medellin_T

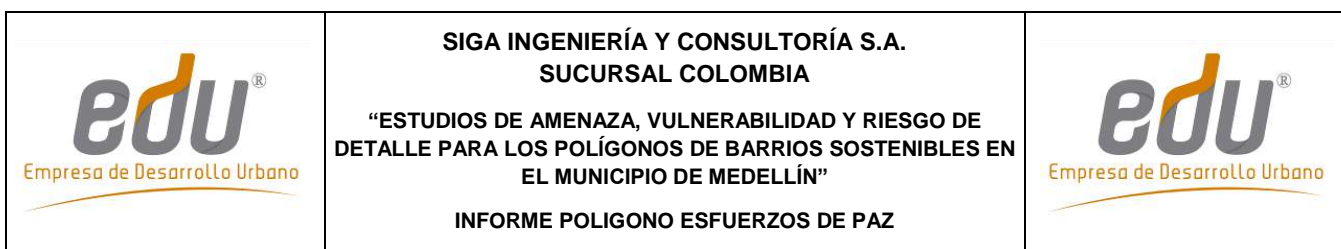
34_EDPMapadeResistencia_Medellin_T

35_EDPTipodeEstructura_Medellin_T

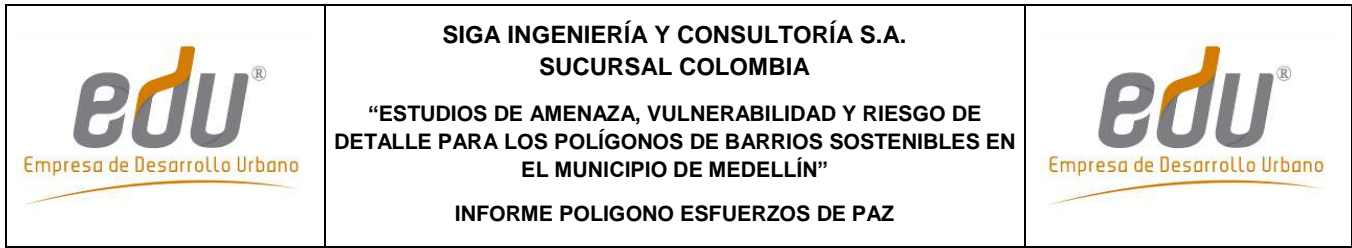
36_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_T

37_EDPAlturadelaConstruccion_Medellin_T

38_EDPDensidaddePoblacion_Medellin_T

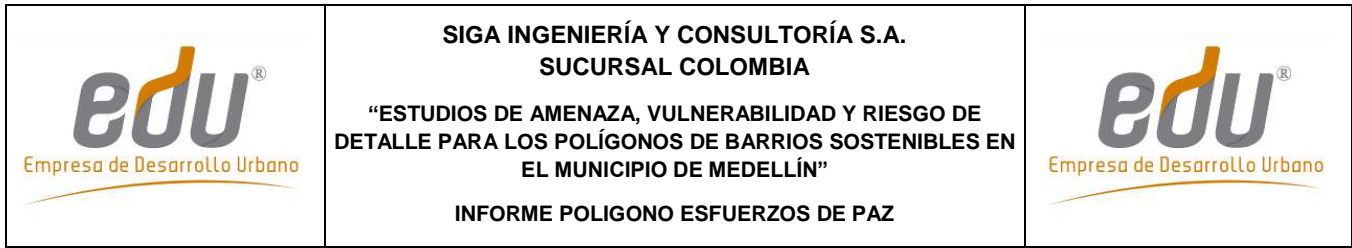


- 39_EDPViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T
- 40_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 41_EDPVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 42_EDPVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales_Medellin_T
- 43_EDPRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 44_EDPRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 45_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T
- 46_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T
- 47_EDPRiesgoInundaciones_Medellin_T
- 48_EDPRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T
- 49_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_T
- 50_EDPRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T
- 51_EDPRetiroHidrologicoyGeologico_Medellin_T
- 52_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T
- 53_EDPVulnerabilidadInunyAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_T
- 54_EDPRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T
- 55_EDPRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T
- 56_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_T





LISTA DE PLANOS

P-2445-EP-OM-01	Obras de Mitigación-Planta
P-2445-EP-OM-02	Obras de Mitigación-Perfiles
P-2445-EP-OM-02A	Detalles
P-2445-EP-OM-03	Detalles estructurales
P-2445-EP-OM-04	Obras Qda. San Antonio
P-2445-EP-OM-05	Detalles Estructurales



LISTA DE ANEXOS

- Anexo 01. Formatos con levantamientos de campo
- Anexo 02. Registros de la exploración de campo
- Anexo 03. Ensayos de laboratorio
- Anexo 04. Memorias hidrológicas
- Anexo 05. Memorias hidráulicas
- Anexo 06. Fichas de vulnerabilidad estructural
- Anexo 07. Fichas análisis de alternativas obras de mitigación
- Anexo 08. Memorias de diseño obras de mitigación
- Anexo 09. Planos de diseño obras de mitigación
- Anexo 10. Actas de instrumentación
- Anexo 11. Cantidades de obra, Presupuesto y Especificaciones
- Anexo 12. Geodatabase

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---



1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Contrato 286 de 2014, que la Empresa Ingeniería y Consultoría S.A. Sucursal Colombia (SIGA) firmó con la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU), SIGA fue contratada para llevar a cabo los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los polígonos del “Proyecto Barrios Sostenibles”. Se trata de polígonos en los Barrios La Cruz, Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay del municipio de Medellín.

En este informe se presentan los resultados de los estudios del polígono correspondiente al Barrio Esfuerzos de Paz. El alcance final que se pretende es la definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del Polígono Esfuerzos de Paz, por medio de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al interior de las zonas con riesgo mitigable se pretende llegar hasta el establecimiento de las medidas de estabilización estructural y no estructural, que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo.

Es importante aclarar que esta Versión 9 del estudio atiende todas las observaciones que finalmente se acordaron con La Interventoría y La EDU que se harían a las versiones iniciales entregadas en mayo de 2016. Se tienen en cuenta observaciones de entidades tales como Planeación Municipal, Secretaría del Medio Ambiente y el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo (DAGR). Si se consultan versiones anteriores, se podrá verificar que existen diferencias en los resultados, algunas mayores y otras menores. Todo esto obedece al hecho de que la ejecución de varias versiones del estudio de todos los polígonos que hacen parte del Proyecto Barrio Sostenibles, ha permitido una depuración y perfeccionamiento de la metodología. Los resultados que finalmente deben tenerse en cuenta son los de esta Versión 9 del informe, de tal manera que los de otras versiones no son válidos ni comparables con los acá presentados. Si se revisan en conjunto las entregas finales de los ocho polígonos estudiados, se puede ver incluso que hay una total coherencia en las metodologías de uno y otro sitio de estudio y que se han solucionado problemas de versiones anteriores tales como la excesiva importancia que sobre los mapas finales de riesgo de algunos polígonos tenían variables tales como la vulnerabilidad.

La metodología empleada para el estudio es la presentada de forma detallada en el Informe I-2445-01-Rev7, entregado como parte de este mismo contrato a la Empresa de Desarrollo Urbano. En dicho informe se presentan los pasos generales y específicos que se siguen para la evaluación tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad y el riesgo en la zona del Proyecto Barrios Sostenibles. La idea principal sobre la que se desarrolla la metodología es la implementación de teorías básicas de equilibrio límite, flujo de agua y flujo de detritos y la probabilidad de ocurrencia de los mismos, que permitan determinar condiciones críticas de factor de seguridad, velocidades de flujo y niveles de agua y establecer con estas las condiciones de amenaza regional y local de la zona de estudio. Las condiciones de amenaza por los diferentes eventos antes descritos, se analizan a la



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

luz de la información de la infraestructura física presente en cada uno de los polígonos, determinándose para tal fin la vulnerabilidad física de las estructuras a través de la identificación de algunos aspectos específicos de la misma como son el tipo de estructura y sus materiales, el estado o mantenimiento y el nivel de fundación. Finalmente, los análisis de amenaza y vulnerabilidad por los diferentes escenarios, permiten obtener las zonas de riesgo y determinar si el mismo puede ser mitigable o no mitigable.

Con respecto a la metodología, es importante resaltar que los estudios de amenaza se enmarcan dentro de las directrices y lineamientos metropolitanos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos para la prevención del riesgo en construcciones en ladera, consignadas en el Decreto Metropolitano 09 del 25 de mayo de 2012, conocido en el medio como Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012). Mediante este último documento, se exige el estudio para nuevos proyectos en zonas de ladera dentro de la denominada Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) en que se localice. Así las cosas, realmente se incluyen los estudios de amenaza partiendo de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) dentro de la cual se ha incluido este polígono. Se consideraron tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles y en este caso en particular el del Polígono Esfuerzos de Paz.

- ✓ Amenaza por movimientos en masa, considerada como la probabilidad de que se presente este tipo de eventos, con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.
- ✓ Amenaza por inundación, consistente en la probabilidad que tiene una zona de ser afectada por un fenómeno de inundación. Las inundaciones son fenómenos propios de la dinámica natural de las corrientes, pero hay diferentes factores que pueden aumentarla, tales como modificación en el alineamiento de los cauces, obras hidráulicas, urbanización en retiros de quebradas, desecación de zonas inundables para proyectos de infraestructura y llenos artificiales y cambios en el uso del suelo, entre otros.
- ✓ Amenaza por avenidas torrenciales, consistente en la probabilidad que tiene una zona de ser afectada por fenómenos de crecientes súbitas que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca, están compuestas por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre y con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad. Estas pueden estar ocasionadas por movimientos en masa que ocurren en la parte superior de la cuenca y que son transportados por el drenaje.

Los estudios de vulnerabilidad se concentran en el análisis de la vulnerabilidad física, por medio de la cual se determinaron las características de los elementos expuestos a las



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

amenazas identificadas, considerando factores como tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras.

El análisis del riesgo integra los resultados de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad. La etapa final del proyecto considera la evaluación de las zonas que se encuentran en riesgo alto mitigable. Al interior de las mismas se establecen todas las medidas de estabilización estructural y no estructural, para mitigar el riesgo. Para esta fase del proyecto se implementaron análisis de estabilidad local en las zonas de interés, por medio de herramientas de análisis de estabilidad bidimensional. Se evaluaron los modelos de inestabilidad considerando la infraestructura propuesta y las medidas de estabilización que se requieren.



Los resultados del estudio se presentan en los 24 capítulos de este informe, distribuidos de la siguiente manera:

- ✓ Luego de la presente introducción, en los Capítulos 2 y 3 se presenta una breve descripción de la localización del sitio de estudio y de la delimitación de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) que tiene influencia sobre la zona de estudio.
- ✓ La geología regional y la geología local son presentadas en el Capítulo 4 y la descripción de las macrounidades y unidades geomorfológicas de las diferentes UMI's que influyen en los polígonos de estudio, haciendo énfasis en la correspondiente al polígono de este informe, se presentan en el Capítulo 5. El Capítulo 6 describe la geología estructural a nivel regional y local, detallando fallas, diaclasamientos, cizalladuras, etc., Los aspectos relacionados con la aptitud geológica se presentan en el Capítulo 7.
- ✓ La conceptualización de la hidrogeología de la zona de estudio se presenta en el Capítulo 8, donde se hace la debida conexión con el sistema de instrumentación instalado en la zona de estudio.
- ✓ En el Capítulo 9 se incluye un análisis de la zona a partir de los resultados de estudios existentes de la Microzonificación Sísmica de Medellín. Por su parte, el Capítulo 10 contiene los diferentes aspectos geotécnicos para la UMI en estudio, incluyendo la caracterización de los materiales a partir de ensayos de laboratorio.
- ✓ Los Capítulos 11 y 12 presentan los aspectos hidrológicos e hidráulicos, incluyendo una caracterización y los caudales máximos de las cuencas que influyen en el polígono, así como la evaluación del comportamiento hidráulico de las corrientes hídricas.
- ✓ Los análisis de amenaza por movimiento en masa, por inundaciones y por avenidas torrenciales se presentan en los Capítulos 13, 14 y 15, respectivamente. Se tienen en cuenta los resultados de análisis geológicos, geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos presentados en los capítulos anteriores a estos.
- ✓ El análisis de vulnerabilidad de los elementos físicos expuestos a los tres fenómenos en estudio (movimiento en masa, inundaciones y avenidas torrenciales)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

es presentado en el Capítulo 16. Este capítulo es de suma importancia no sólo por cuanto muestra en el Numeral 16.2 lo concerniente a vulnerabilidad por movimientos en masa, sino porque también en este capítulo, en el Numeral 16.2.2, se muestran resultados de aplicación de la metodología al deslizamiento Villatina como la manera más contundente de validación de la metodología.

- ✓ Luego de tenerse los resultados de la amenaza y la vulnerabilidad por movimiento en masa, éstos son procesados y en el Capítulo 17 se presenta el resultado para el riesgo por dicho evento para la zona de estudio. Por su parte, el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales se presenta en el Capítulo 18.
- ✓ En el Capítulo 19 se incluyen los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa, por inundaciones y por avenidas torrenciales para las líneas vitales asociadas a redes de servicio público. La amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo ante los tres fenómenos estudiados para las demás líneas vitales, como las vías y los equipamientos son analizados al interior de cada uno de los capítulos donde se expone cada fenómeno, es decir, en los Capítulos 13, 14 y 15 para la amenaza, en el Capítulo 16 para la vulnerabilidad y en los Capítulos 17 y 18 para el riesgo.
- ✓ El Capítulo 20, contiene la metodología y resultados para la zonificación del retiro hidrológico y geológico, a partir de los diferentes productos obtenidos en este estudio, solicitado para Quebrada La Castro.
- ✓ Los Capítulos 21 y 22 comprenden los diseños de obras de mitigación ante los diferentes fenómenos, así como las conclusiones y recomendaciones para el polígono de estudio.
- ✓ Finalmente, los Capítulos 23 y 24 contienen las referencias bibliográficas y las limitaciones del estudio.

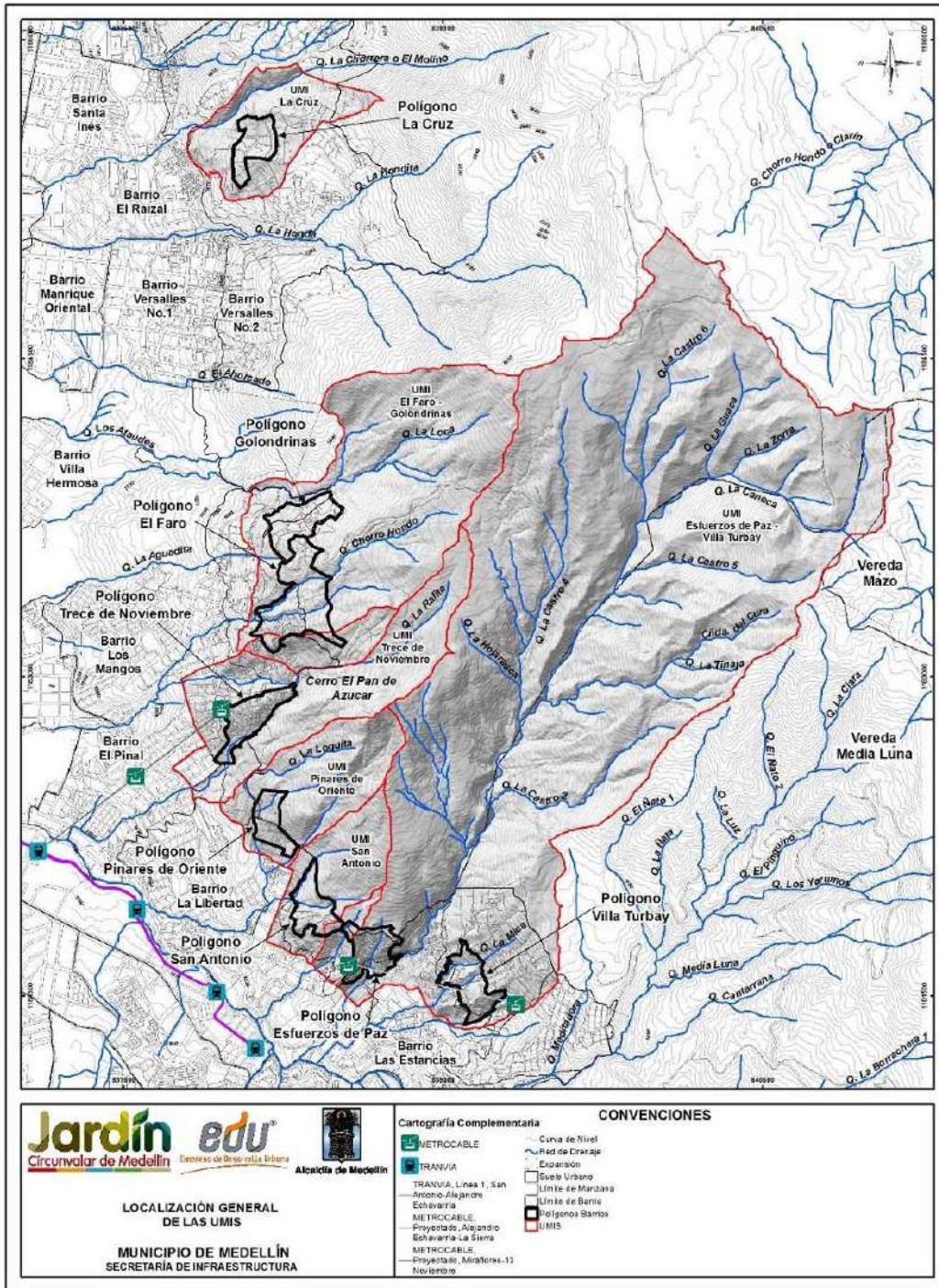
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO



La zona de estudio se localiza en la parte alta de la ladera centro oriental, entre los límites rurales y urbanos de la ciudad de Medellín. Los polígonos correspondientes al “Proyecto Barrios Sostenibles”, se encuentran ubicados en su mayoría en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique). Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los correspondientes a los Barrios Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. El polígono localizado al interior de la Comuna 3 corresponde al Barrio La Cruz.

En el Mapa 1 se presenta la localización general del polígono Esfuerzos de Paz, el cual tiene un área aproximada de 4.88 hectáreas.

El Polígono de Esfuerzos de Paz se encuentra localizado en la zona centro-sur limitando al Norte con el cerro Pan de Azúcar, al Sur con el Barrio Las Estancias y la Quebrada La Castro, al Oriente con el Barrio San Antonio y al Occidente con el Barrio Villa Liliam. El polígono Esfuerzos de Paz está conformado por los barrios conocidos como Esfuerzos de Paz I y Unión de Cristo, que según la división geopolítica de Medellín, pertenecen en la parte norte al Barrio San Antonio, y en sur a los barrios Villatina y Villa Liliam.



Mapa 1. Localización general del polígono dentro del Barrio Esfuerzos de Paz (01_EDPLocalizacionGeneral_Medellin_C y 01_EDPLocalizacionGeneral_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE

3.1 GENERALIDADES

Como punto de partida para la ejecución del estudio que se presenta en este informe, se requiere la delimitación de la conocida como Unidad Morfodinámica Independiente (UMI), entendiéndola a ésta como la unidad del territorio que enmarca el predio de interés o que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes. Se considera que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el exterior no afecta su interior e igualmente que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el interior de ésta no afecta las unidades adyacentes.



Se trata de un concepto de obligatorio cumplimiento para estudios de nuevos proyectos en las zonas de ladera Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es tratado de forma detallada en el Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012). Según el código, las evaluaciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas e hidráulicas deben extenderse a lo largo y ancho de la denominada Unidad Morfodinámica Independiente (UMI).

De acuerdo con lo anterior, se procedió a delimitar la UMI de los polígonos de estudio en las Comunas 3 y 8 que hacen parte del Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente la del Barrio Esfuerzos de Paz la cual es objeto de este informe. Siguiendo los lineamientos del Código de Laderas del Valle de Aburrá, se consideraron aspectos de tipo geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico.

La unión de todas las UMI de la Comuna 8 (Mapa 1) da lugar a un área aproximada de 700 hectáreas e involucra las cuencas y/o subcuencas de las Quebradas La Arenera, La Loca, La Rafita, La Gallinaza, Chorro Hondo, San Antonio, La Mica, El Saperó y La Castro con todos sus afluentes y cañadas como por ejemplo La Hojarasca, La Potrera, Juan Alberto, Los Moros, La Caneca, La Tinaja y La Paloma, entre otras.

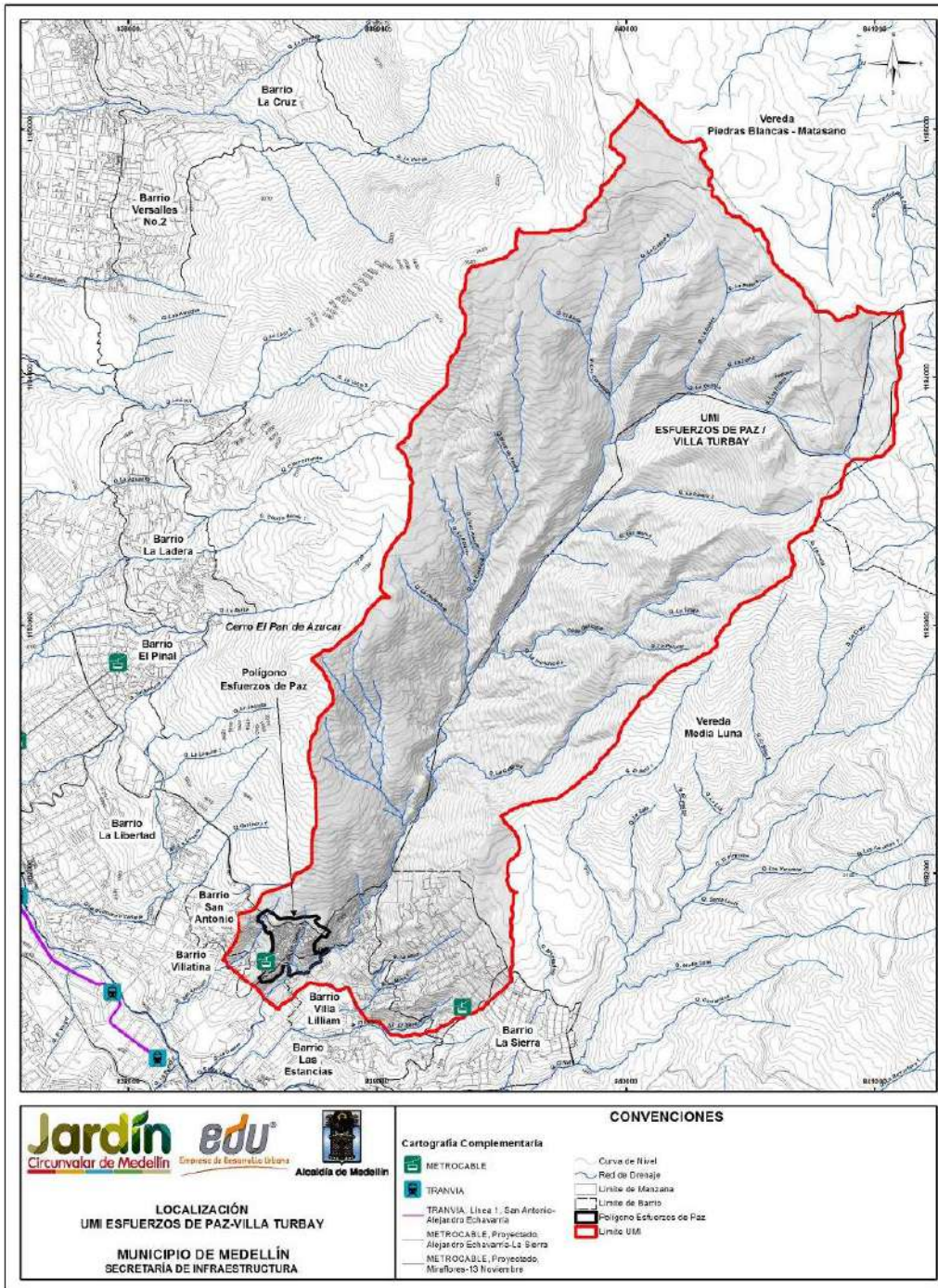
En el Mapa 2 se ilustra la UMI asociada al polígono de estudio del Barrio Esfuerzos de Paz. De forma resumida, puede decirse que se incluyó el área en la que cualquier proceso de inestabilidad, potencial o existente, pudiera afectar las estructuras existentes y programadas, bien fuera porque las impactara directamente o porque a través de las corrientes de agua pudiera llegar hasta la zona del proyecto.

La inclusión de los Polígonos Esfuerzos de Paz y Villa Turbay dentro de una misma UMI, resulta como consecuencia de su proximidad y de la afectación que podría existir en común consecuencia de la Quebrada La Castro. Para ambos polígonos, es importante la evaluación de la Quebrada La Castro en lo que respecta al análisis de amenazas por avenidas torrenciales, por lo que de manera independiente, ambas UMIs contenían la cuenca de dicho drenaje. La anterior situación generó que para ambos polígonos se presentara una intercepción mayor al 90 % en su área de influencia, es decir, más de la mitad del área de una UMI consideraba el área de la UMI vecina, por lo tanto existirían procesos en común para ambas UMI. Por lo anterior, para efectos de optimizar los trabajos de análisis, ambas UMIS se unificaron. Finalmente la UMI del Polígono

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Esfuerzos de Paz – Villa Turbay se convierte en la UMI más grande del Proyecto Barrios Sostenibles con un área aproximada de 448 hectáreas.

En el numeral siguiente, se hace referencia a la UMI correspondiente a los polígonos Esfuerzos de Paz y Villa Turbay, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono Esfuerzos de Paz, correspondiente al polígono en estudio dentro del barrio con este mismo nombre.



Mapa 2. UMI asociada al Polígono Esfuerzos de Paz
(02_EDPLocalizacionUMI_Medellin_C y 02_EDPLocalizacionUMI_Medellin_T)

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

La Figura 1 muestra la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay, destacándose la división de la misma en dos zonas diferentes (Zona 1 y Zona 2), delimitadas de acuerdo con sus pendientes, usos del suelo y condiciones de actividad morfodinámica. Se incluyen fotografías de cada una de estas zonas de interés.

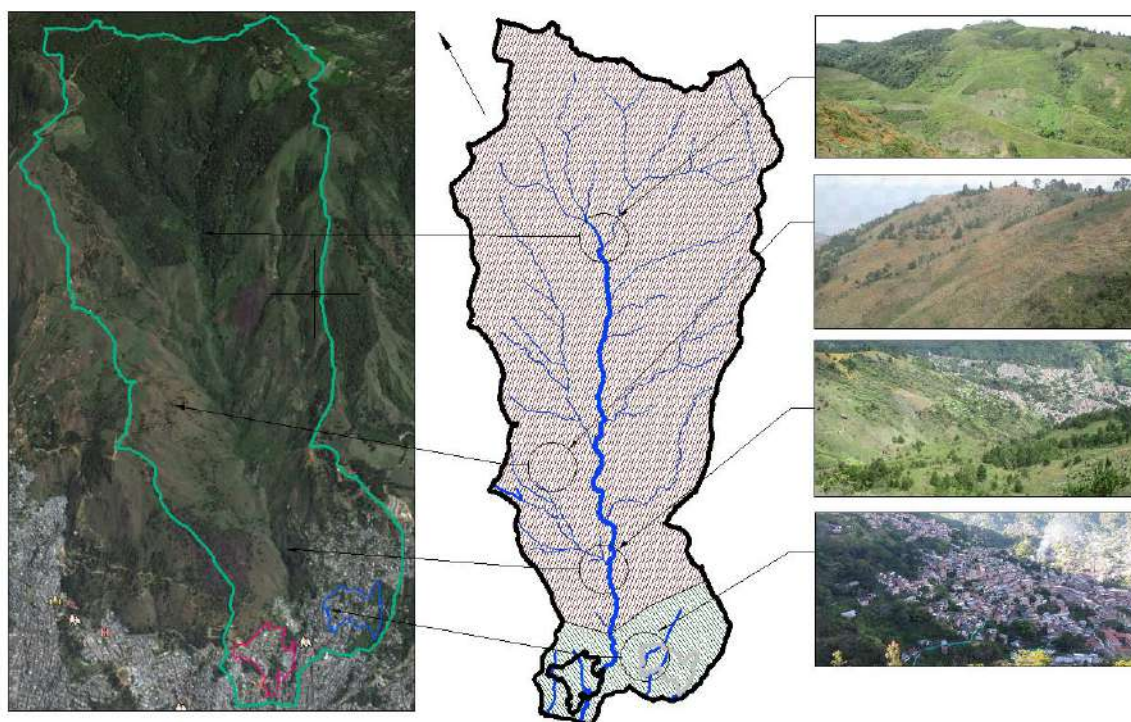




Figura 1. Zonificación de la UMI del polígono al interior del Barrio Esfuerzos de Paz (Sin Escala)



La selección de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay partió del análisis de las condiciones morfométricas, morfodinámicas, hidráulicas e hidrológicas de la zona. Se enfoca en atender las evaluaciones de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones que podrían afectar directamente las estructuras al interior del Polígono Esfuerzos de Paz.

De forma general, la UMI se localiza hacia el extremo sur oriental de la Comuna 8 y se posiciona hacia el costado oriental de la UMI San Antonio. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI está enmarcada principalmente por la cuenca de la Quebrada La Castro, siendo este el afluente principal y eje de la UMI objeto de estudio. La UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay limita con todas las UMI del Proyecto Barrios Sostenibles de la Comuna 8, desde la parte baja con la UMI San Antonio y la UMI Pinares de Oriente, en la parte media con la UMI Trece de Noviembre involucrando el flanco sur del Cerro Pan de Azúcar y finalmente en su parte alta con la UMI El Faro - Golondrinas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Se resalta que los límites escogidos se manifiestan estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales del Polígono Esfuerzos de Paz específicamente. Con respecto a los diferentes límites considerados se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- ✓ En el costado occidental, comenzando desde la parte baja, el límite de la UMI inicia tomando la margen derecha de la Quebrada San Antonio, la cual también fue involucrada en la UMI San Antonio. En esta margen derecha se evidenciaron cicatrices de movimientos en masa que se direccionan hacia el extremo sur del Polígono Esfuerzos de Paz, por lo que su inclusión es fundamental en el análisis de las amenazas sobre el proyecto. Este límite occidental asciende por la ladera, localizándose principalmente sobre la divisoria de aguas que define la cuenca de la Quebrada La Castro, en la parte superior la UMI se define sobre el límite de la ladera oriental con el altiplano de Santa Elena. Estos límites encierran todos aquellos procesos y evidencias morfodinámicas que se direccionan hacia el Polígono Esfuerzos de Paz, además involucran la totalidad de los cauces que drenan hacia La Castro como las Quebradas La Hojarasca, La Potrera, Juan Alberto, Muro de Piedra, El Ancón, Los Colorados, entre otros drenajes de la parte alta, todos ellos fundamentales desde el punto de vista hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones y avenidas torrenciales.
- ✓ El límite sur desciende igualmente por la divisoria de aguas de la Quebrada La Castro. Este límite se consideró en condiciones estables y al interior del mismo se concentran todos los procesos morfodinámicos que podrían afectar desde el punto de vista de la torrencialidad a los Polígonos Esfuerzos de Paz y Villa Turbay, al interactuar con los cauces que drenan hacia la Quebrada La Castro sobre su margen izquierda como son las Quebradas La Zorra, Los Uvitos, La Caneca, La Castro 5, Los Morros, La Tinaja, entre otros. Hacia la parte más baja, el límite sur se abre para involucrar las cuencas de las Quebradas La Mica y La Mica 1 y parte de la margen izquierda del Afluente El Saperó 1. Estos drenajes cruzan en este sector el Polígono Villa Turbay, por lo que la ampliación del límite es fundamental para considerar los efectos de inundaciones y movimientos en masa que podrían afectar al Polígono Villa Turbay.
- ✓ Finalmente, el límite inferior estuvo determinado principalmente por la Calle 55, la cual comunica las dos vertientes pasando sobre el cauce de la Quebrada La Castro, asciende por la Carrera 9A y la Calle 57A hasta ingresar a la zona de influencia del Polígono Villa Turbay sobre la Carrera 8 y la Calle 57A. La escogencia además de este límite inferior se hizo tratando de tomar las zonas de mayor consolidación urbana y las zonas de mayor estabilidad de tal forma que los mismos límites garantizaran su propia característica de estabilidad.
- ✓ Así entonces, además de enmarcar la totalidad de los procesos que podrían afectar el Polígono Esfuerzos de Paz, los límites de la UMI incluyen todas las posibles incidencias hidrológicas e hidráulicas de los drenajes que atraviesan dicho polígono.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Principalmente, se incluye el drenaje La Castro el cual tiene influencia directa sobre el Polígono Esfuerzos de Paz, objeto de este estudio. Así mismo, están todos aquellos procesos morfodinámicos que se identifican en las zonas de las márgenes, tanto de la Quebrada La Castro, como de las Quebradas San Antonio al suroeste y El Saperó 1 al sureste de la UMI.

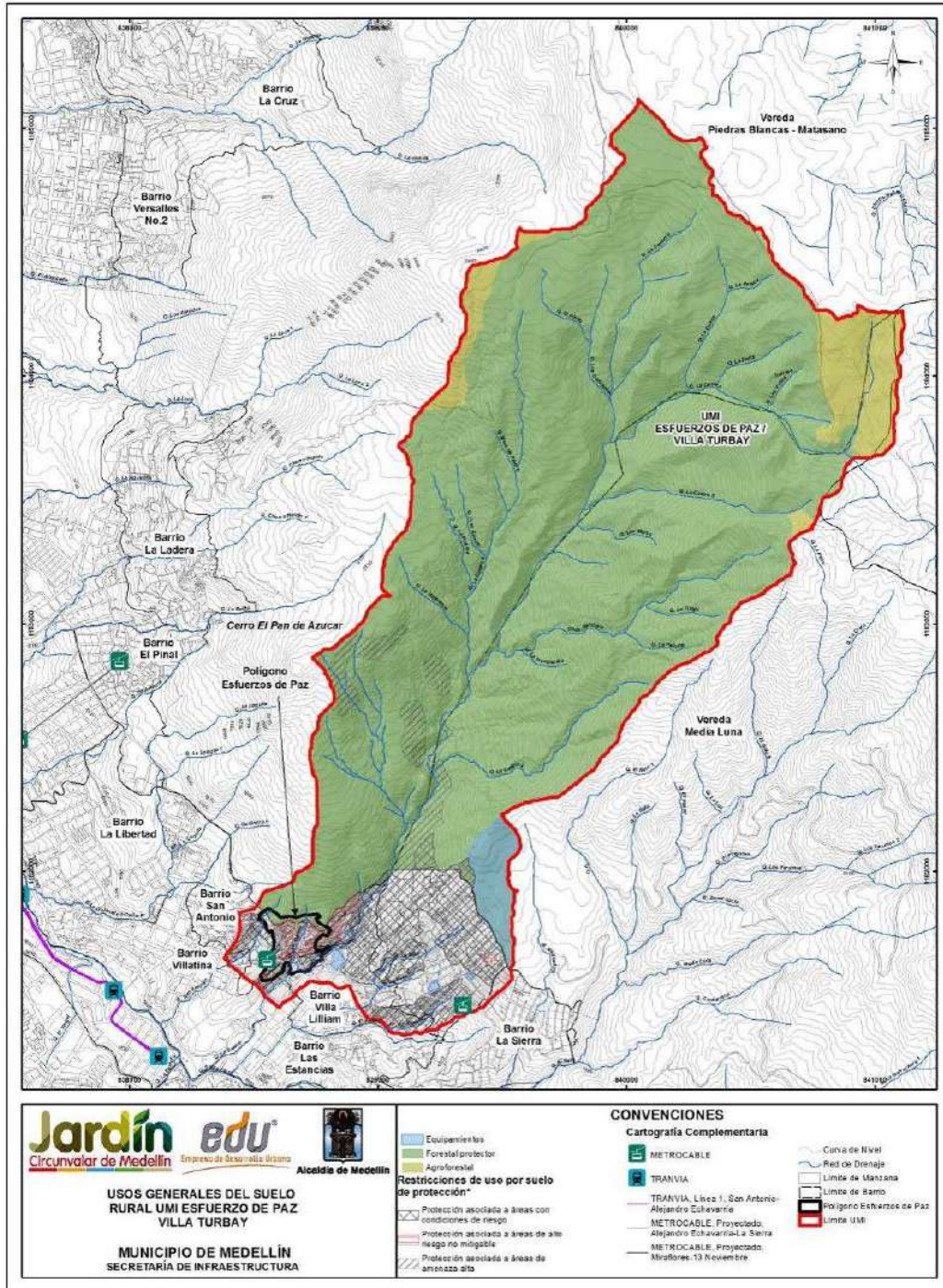
En la Figura 1 se mostró la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay, destacándose la división de la misma en dos zonas diferentes (Zona 1 y Zona 2), delimitadas de acuerdo con sus pendientes, usos del suelo y condiciones de actividad morfodinámica. Se trata de la zona alta y baja, de las cuales se hablará con mayor detalle a continuación:

La Zona 1 pertenece a la parte rural de la UMI. Esta zona presenta un uso del suelo de *Forestal protector* (Mapa 3), en el cual se destaca la presencia de áreas verdes boscosas en la parte alta y áreas verdes con cobertura vegetal y sin bosques en la parte baja. Se considera como área de interés estratégico al presentarse cuencas abastecedoras de acueductos y drenajes de orden cero. Sobre esta zona no se presentan grandes asentamientos humanos y sólo se ubican algunas viviendas y parcelaciones campesinas.

Desde el punto de vista de las pendientes, esta zona varía con laderas entre 5° a más de 30°, lo que corresponde a laderas con pendientes bajas a muy altas. Se destaca que la margen derecha de la Quebrada La Castro presenta laderas menos escarpadas cuando se compara con la margen izquierda, donde las laderas son principalmente muy altas.

La presencia de procesos morfodinámicos de la Zona 1, se evidenció principalmente sobre la parte media y baja donde se tienen áreas menos desprovistas de vegetación boscosa. Los procesos se presentan en ambas márgenes de la Quebrada La Castro y se direccionan hacia el mismo. No obstante, sobre la margen izquierda se evidencia una mayor actividad y los procesos se apreciaron de mayor magnitud. Esta condición es importante considerando que todos los procesos tienen su vector de desplazamiento hacia el cauce de la Quebrada La Castro, por lo que se debe contemplar la posibilidad de que estos puedan aportar en la amenaza por avenida torrencial de los polígonos que se encuentran aguas abajo.

En la Figura 2 y en la Figura 3 se presentan dos panorámicas generales de la Zona 1 en su parte alta y parte baja respectivamente. Se puede observar que en general es una zona desprovista de vegetación y mínimos asentamientos urbanos.



Mapa 3. Usos generales del suelo rural UMI Esfuerzos de Paz- Villa Turbay (POT, 2014) (17_EDPUsosdelSueloRural_Medellin_C y 17_EDPUsosdelSueloRural_Medellin_T)



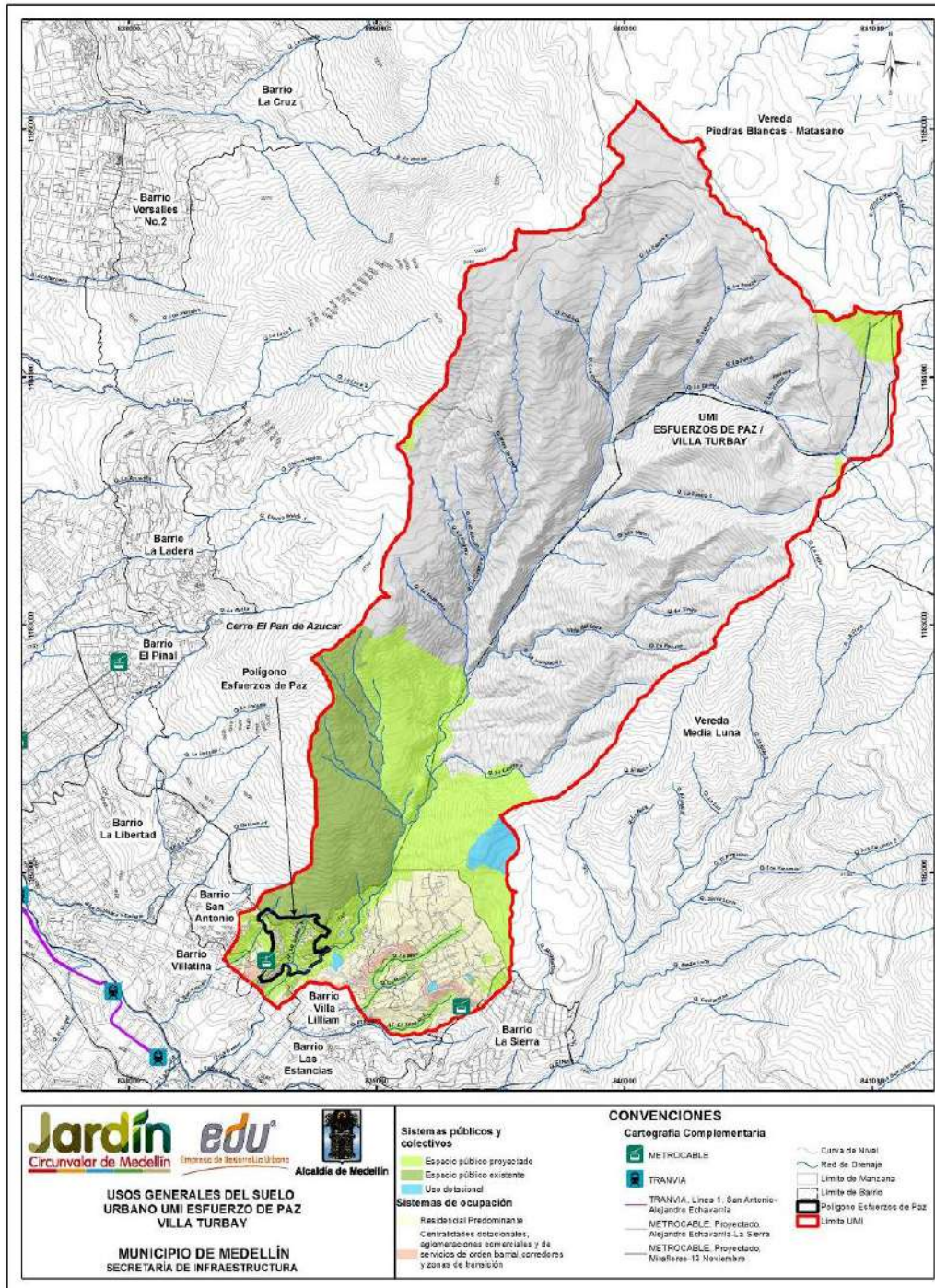
Figura 2. Panorámica general de la UMI en la parte alta de la Zona 1



Figura 3. Panorámica general de la UMI en la parte alta de la Zona 2

La Zona 2 se destaca por pertenecer a la zona urbana donde el uso del suelo está principalmente destinado al desarrollo urbanístico y residencial (Mapa 4). En esta zona, aproximadamente el 80% del área se encuentra ocupada por viviendas, incluso gran parte de este urbanismo se concentra en las zonas de drenajes que atraviesan el polígono como es el caso del cauce de la Quebrada La Castro, donde viviendas del Polígono Esfuerzos de Paz se encuentran sobre el mismo.

La zona baja presenta laderas de pendientes que varían predominantemente entre altas a muy altas con inclinaciones desde 15° hasta más de 30°. Específicamente en el Polígono Esfuerzos de Paz las mayores pendientes se concentran sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro afluente que atraviesa el polígono en su parte baja.



Mapa 4. Usos generales del suelo urbano UMI Esfuerzos de Paz- Villa Turbay (POT, 2014) (16_EDPUsosdelSueloUrbano_Medellin_C y 16_EDPUsosdelSueloUrbano_Medellin_T)

Desde el punto de vista morfodinámico, la UMI encierra en la zona de Esfuerzos de Paz una morfodinámica alta producto de las altas pendientes y de las intervenciones antrópicas que se han realizado en la zona con el urbanismo desordenado. Gran parte de los procesos evidenciados, se observan en dirección hacia el cauce de la Quebrada La Castro y su afluente que atraviesa el polígono y algunos otros hacia el cauce de la Quebrada San Antonio en el límite norte de la UMI.

La UMI finaliza finalmente muy cerca del límite occidental del Polígono Esfuerzos de Paz en un lomo alargado que corresponde a la divisoria de aguas de las Quebradas San Antonio y La Castro que no presenta ninguna influencia ni afectación al proyecto, cruza la Quebrada La Castro y se adentra al Polígono Villa Turbay igualmente por la zona de divisoria de aguas entre las Quebradas La Mica y La Sopera.



Figura 4. Panorámica general de la zona baja polígonos de Esfuerzos de Paz y Villa Turbay

Desde el punto de vista hidrológico e hidráulico, la UMI gana una alta relevancia en tanto que involucra uno de los drenajes más importantes como es la Quebrada La Castro. Adicionalmente sobre el flanco norte, en el Polígono Esfuerzos de Paz se tienen drenajes correspondientes a dos afluentes de la Quebrada La Castro. El costado occidental del Polígono Esfuerzos de Paz es atravesado por la Quebrada San Antonio y en el flanco sur, se tienen drenajes importantes como las Quebradas La Mica, La Mica 1 y La Sopera. Se destaca de casi todos los drenajes a excepción de La Castro su nacimiento en la parte alta de la Zona 2.

La mayor problemática de los drenajes de la UMI radica en el nivel de urbanismo localizado sobre sus márgenes, lo cual incrementa la amenaza y el riesgo en términos de movimientos en masa, inundaciones e incluso avenidas torrenciales. Adicionalmente, el problema se incrementa por el manejo que se le da a los residuos humanos, los cuales son depositados al interior y sobre las márgenes de los cauces, incrementando las zonas de lleno antrópico y modificando las condiciones de estos en algunos sectores. El nivel más crítico se concentra en la parte baja de la Quebrada La Castro, donde hay un

urbanismo asentado en ambas márgenes del drenaje. En la margen derecha se ubica el Polígono Esfuerzos de paz.

En la Figura 5 y en la Figura 6 se muestra un panorama general de las condiciones de los drenajes que se tienen actualmente en la zona específica de Esfuerzos de Paz. En la Figura 5 se observa la ocupación del cauce de la margen derecha de la Quebrada La Castro. En la Figura 6 se observan algunos puntos de interés de los afluentes que cruzan la zona de este polígono y donde el urbanismo y manejo de desechos sólidos se ha concentrado en sobre los drenajes.

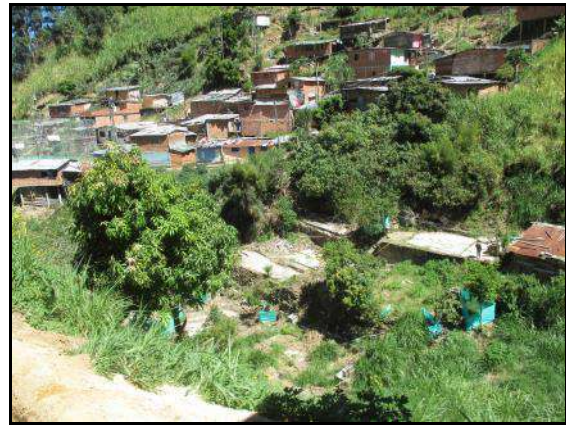




Figura 5. Ocupación de la Quebrada La Castro en el Polígono Esfuerzos de Paz



Figura 6. Panorama de las condiciones de los afluentes de la Quebrada La Castro al interior del Polígono Esfuerzos de Paz

Finalmente, la escogencia de la UMI pretende abarcar todos los escenarios de análisis de la amenaza por inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales que puedan afectar a ambos polígonos. Su extensión en relación con la cuenca, radica principalmente en la importancia hidrológica e hidráulica de la Quebrada La Castro y el interés de analizar la posible generación de movimientos en masa que podrían llegar a los drenajes y provocar avenidas torrenciales en la zona baja, afectando de forma indirecta a los polígonos, pues se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, principalmente en las márgenes de las Quebradas San Antonio y La Castro incluidos sus afluentes.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

De acuerdo con la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (Consortio Microzonificación, 2006), la geología de la zona se compone principalmente de rocas ígneas ultramáficas como las Dunitas de Medellín (JKuM), cuerpos plutónicos como el Stock de las Estancias (KcdE) y el Stock de Media Luna (KcdML), que para este informe se agrupan como la unidad denominada Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA). Estas unidades están suprayacidas por llenos antrópicos (QII), depósitos aluviotorrenciales (Qat), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII). Además, se encuentran cenizas volcánicas que no fueron reportadas por el Consortio Microzonificación (2006), debido a la escala del estudio. En el Mapa 5 se muestra la disposición en planta de estas unidades.

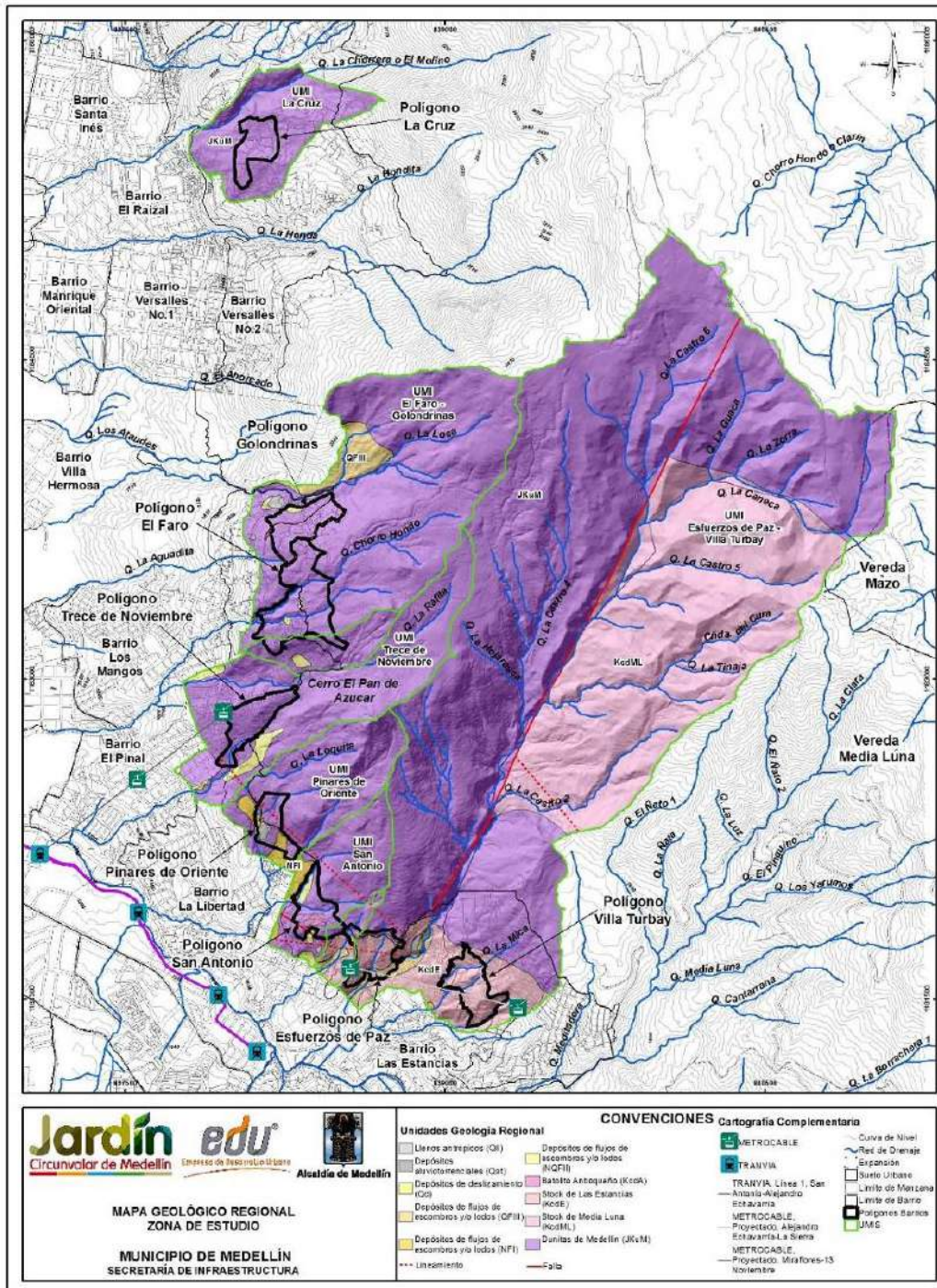
La UMI Esfuerzos de Paz se ubica sobre las unidades geológicas denominadas como Dunitas de Medellín (JKuM), Batolito Antioqueño (KcdA), depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NFI, NQFII) y llenos antrópicos (QII). A continuación, se describen en orden cronológico todas las unidades geológicas donde se ubican los polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, desde las más recientes hasta las más antiguas.

4.1.1 Llenos antrópicos (QII)



Se derivan de la actividad constructiva y urbanística en una región de crecimiento, la cual genera gran cantidad de escombros que se acumulan en ciertos lugares formando terraplenes. En el municipio de Medellín se encuentran principalmente hacia las zonas urbanas, otros corresponden a sitios de botaderos que se generan por la apertura de vías (Consortio Microzonificación, 2006).

Su composición es muy heterogénea, presentando desde materiales formados con normas técnicas, hasta basura, materia orgánica y escombros vertidos. Presentan extensión variable que permite cartografiarlos en escala 1:10.000 y espesores hasta de 10 m o más (Consortio Microzonificación, 2006).

Están presentes como cuerpos dispersos en toda el área de estudio, que se concentran en las zonas urbanas y centros poblados cerca al cerro Pan de Azúcar.



Mapa 5. Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006)
 (03_EDPGeologiaRegional_Medellin_C y 03_EDPGeologiaRegional_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)

Esta unidad no está reportada en la zona de estudio por el Consorcio Microzonificación (2006), pero fue encontrada durante los recorridos de campo en la parte alta de las vertientes que conforman las UMI, tanto in situ como removilizada.

Posada (2000) establece que las cenizas que se presentan en el oriente del departamento de Antioquia, aparecen como capas muy finas de carácter eólico, originadas en el Complejo Volcánico Ruiz Tolima de la Cordillera Central, las cuales abarcarían varios períodos eruptivos ocurridos en los últimos 350.000 años (Consorcio Microzonificación, 2006).

4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)

Se encuentran en los valles de quebradas, con formas alargadas o de abanicos, como producto de avenidas torrenciales ocurridas principalmente en periodos de alta pluviosidad. Están formados por clastos subredondeados a redondeados con variedad de tamaños, forma y litología, envueltos en matriz arenosa, de color gris. Se caracterizan por no presentar estratificación ni selección de los materiales (Consorcio Microzonificación, 2006).

En la zona de estudio se presentan principalmente en la Quebrada La Castro y la quebrada Chorro Hondo.

4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)



Estos depósitos son generados por procesos de inestabilidad o movimientos de masa en vertientes o zonas de alta pendiente. Se dan principalmente por la combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana. Generalmente se encuentran en zonas de baja pendiente o topografía suave seguidas de zonas con pendiente fuerte de la cual se desprendieron los materiales que los forman (Consorcio Microzonificación, 2006).

Se encuentran a lo largo de la zona de estudio como pequeños cuerpos asociados a procesos morfodinámicos.

4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)

Estos depósitos cubren la mayoría de las vertientes del municipio de Medellín con composición variable según los materiales que se encuentran en la parte alta de estas, reposando sobre el perfil de meteorización generado por las rocas del basamento (Consorcio Microzonificación, 2006).

Corresponden a diferentes eventos depositacionales de tipo flujo, que por su espesor, altura, grado de consolidación, madurez, grado de incisión, y dataciones realizadas en algunos, tienen asignadas edades variables entre el Neógeno y el Cuaternario (Consorcio Microzonificación, 2006).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse una saturación y pérdida de resistencia hacia las partes altas de las vertientes. Estos eventos en caso de ocurrir, le confieren a los suelos un carácter viscoso, debido a la mezcla del agua con los suelos arcillosos y limosos, de forma que pueden descender más o menos controlados por los cauces de las corrientes, arrastrando nuevos materiales y mezclándose caóticamente hasta encontrar unas condiciones de baja pendiente que permitan su deposición (Consortio Microzonificación, 2006).

Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, pueden dar lugar a depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de la fracción fina (en general arcilla o limo) en cuyo caso se llaman flujos de lodos. Sin embargo, dada la mecánica del fenómeno, que no permite una selección o clasificación del material, pueden existir dentro del mismo depósito zonas que correspondan a flujos de escombros y otras a flujos de lodos (Consortio Microzonificación, 2006).

Se encuentran principalmente en la parte baja de la zona de estudio, sobre el perfil de meteorización de la Dunita de Medellín y del Stock de Las Estancias, principalmente.

4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)



Son cuerpos intrusivos de composición granitoide, con características similares al Batolito Antioqueño (KcdA) y que por su posición hace suponer una relación genética con éste. Entre los cuerpos presentes en la zona se encuentran el Stock de Media Luna (KcdML) y el Stock de Las Estancias (KcdE).

El Stock de Media Luna presenta composición cuarzodiorítica con textura fanerítica media, aflora en la vereda Media Luna por la vía principal de Santa Elena-Medellín. En la zona de estudio se encuentra al sureste, en contacto con la Dunita de Medellín. Los suelos residuales desarrollados son generalmente limo arenosos de coloración amarilla y rojiza que conservan la textura original de la roca (Consortio Microzonificación, 2006).

El Stock de Las Estancias se encuentra en el extremo suroeste del área de interés, en la parte baja del cerro Pan de Azúcar y en los alrededores de la Quebrada La Castro. La composición y textura de la roca es similar al cuerpo anterior, al igual que el suelo residual (Consortio Microzonificación, 2006).

4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y atraviesa el Valle del río Aburra, encontrándose en las laderas oriental y occidental. Se extiende desde Las Palmas, en los límites con el municipio de Envigado, hasta el suroccidente del municipio de San Pedro de Los Milagros, como una franja de dirección NNW, pero que particularmente en el corregimiento de Santa Elena forma un cuerpo elongado con dirección N-S (Consortio Microzonificación, 2006).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

La presencia actual de esta secuencia ofiolítica, obedece a procesos tectónicos probablemente de cabalgamiento mediante una obducción de edad cretácea temprana (Restrepo y Toussaint, 1974). Lo anterior, genera una zona de esquistos cloríticos actinolíticos, replegados en el contacto con las Anfibolitas de Medellín, además de mostrar una fuerte expresión geomorfológica en el cambio de pendiente de la cima de las colinas a la parte distal de las mismas. La dunita está en contacto fallado de bajo ángulo con la Anfibolita de Medellín en la quebrada Rodas (autopista Medellín - Bogotá) (Consortio Microzonificación, 2006).

Se trata de una roca ígnea masiva, compuesta principalmente por olivino, con contenidos menores de magnetita y cromita, esta última con concentraciones mayores hacia la zona de Santa Elena. El olivino presenta alteraciones parciales a tremolita y ésta última a minerales del grupo de la serpentina, como talco y clorita. La roca es masiva de color gris oscuro a negro, con tonalidades verdes dadas por la alteración a minerales del grupo de la serpentina, meteorizada presenta variaciones de color entre diferentes tonalidades de pardo, gris y ocre fuerte dado el alto contenido de hierro (Consortio Microzonificación, 2006)

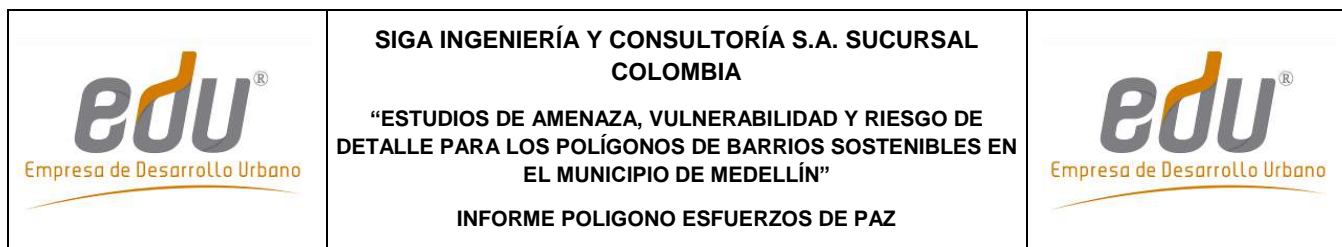
Este tipo de roca presenta un perfil de meteorización de espesor variable entre 6 m y 40 m, dependiendo de la pendiente de la zona, en el que se encuentra desde el horizonte IB hasta el IIA principalmente, y en ocasiones hasta el horizonte III, del perfil de meteorización según Deere, D.U. y Patton F.D. (1971). En el sector del altiplano de Santa Elena, el perfil es de bajo espesor con frecuentes salientes rocosas y geoformas de disolución como dolinas, cavernas, úvalas y valles kársticos (Consortio Microzonificación, 2006).

En el municipio de Medellín, el cuerpo de dunitas presenta muy pobres condiciones geotécnicas hacia las partes altas de la comuna nororiental, generadas por el alto grado de meteorización, además de la forma particular de meteorizar en bloques rocosos de abundante matriz que es fácilmente lavada por las aguas de escorrentías, esto ha generado importantes problemas geotécnicos en estas laderas (Consortio Microzonificación, 2006).

Es la unidad dominante y con mayor extensión en la zona de estudio. Hacia la parte sureste de la zona de estudio se encuentra en contacto con el Stock de Media Luna, y hacia el noroccidente con el Stock de Las Estancias, cubierta por parches de depósitos de vertiente a lo largo y ancho de las vertientes.

4.2 GEOLOGÍA LOCAL

Como base geológica para este estudio, se hizo una recopilación de información secundaria de estudios realizados por diferentes empresas en el área, tales como DEACIVIL (2014), INCIGAM (2015), TECNISUELOS (2010), INTEINSA (2011), entre otras. En el Numeral 10.1.1 se presenta la localización de las perforaciones de dichos estudios, las cuales fueron consultadas para la elaboración del modelo geológico y fueron

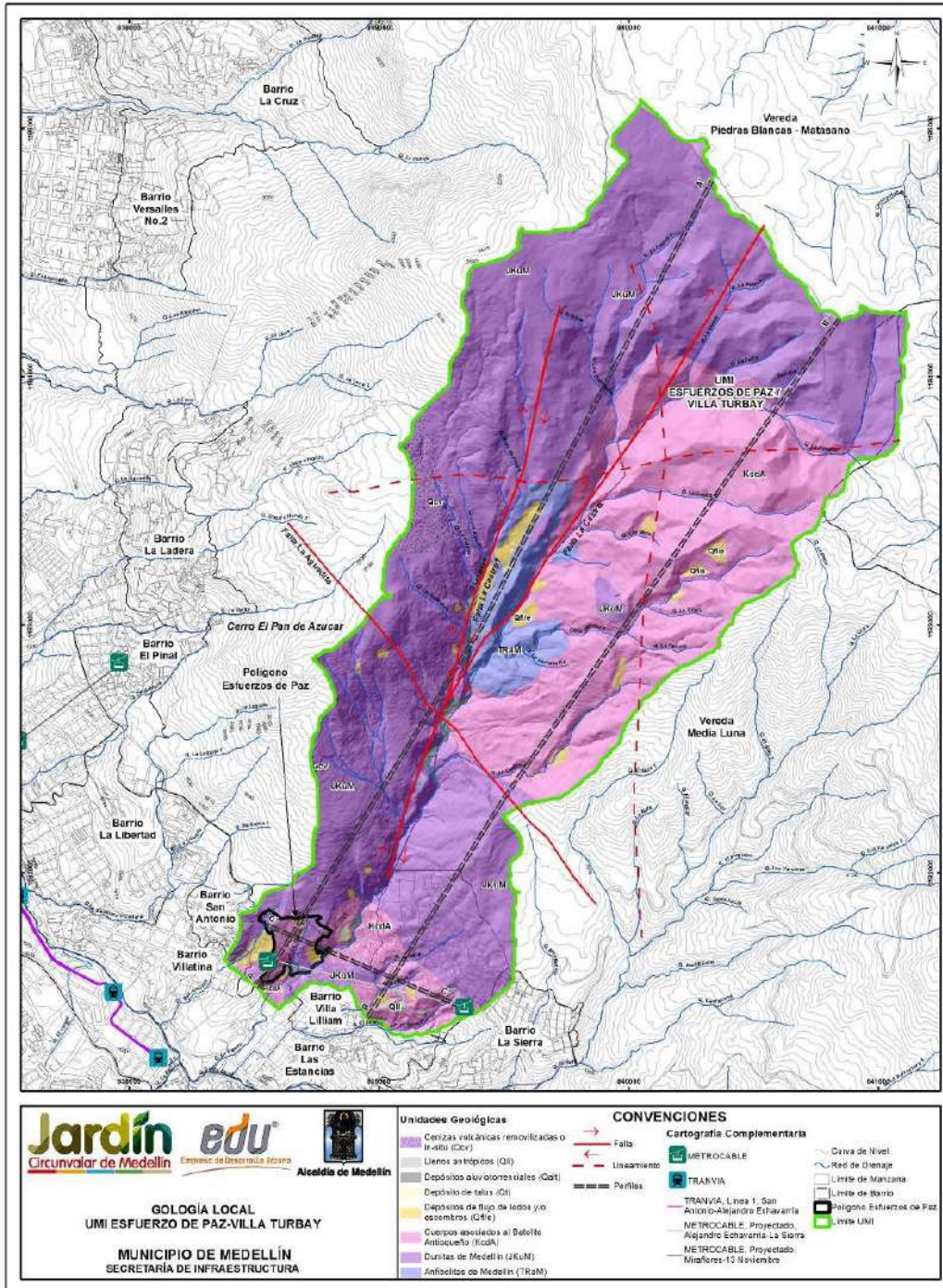


clasificadas en “Perforaciones Estudios Anteriores Utilizadas” y “Perforaciones Estudios Anteriores No Utilizadas” (Mapa 24).

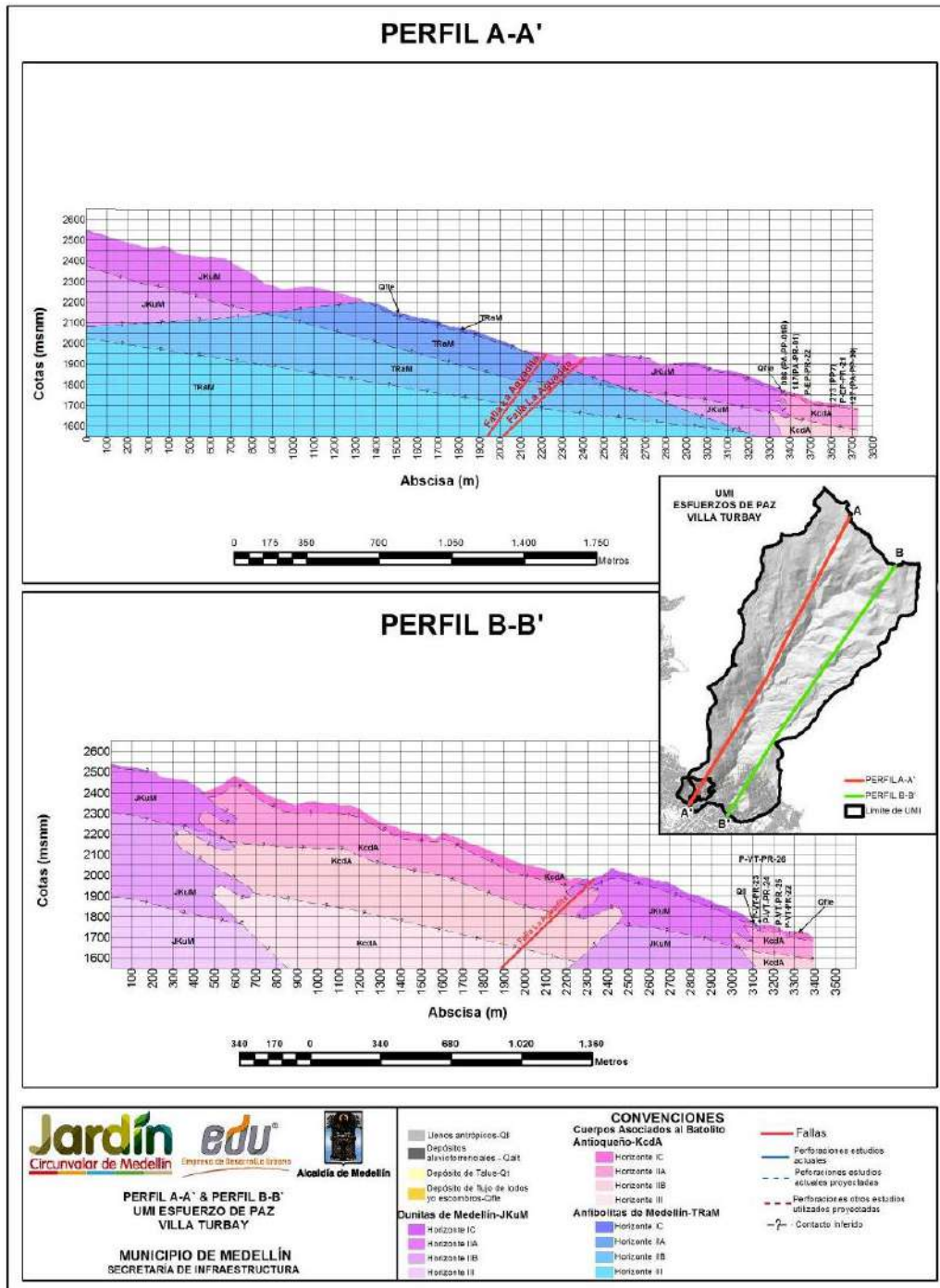
Después de correlacionar dichas perforaciones con la exploración directa e indirecta ejecutada para el presente estudio, de realizar los recorridos de campo y de utilizar herramientas como análisis multitemporal y geomorfológico, se obtuvo como resultado el modelo geológico de la UMI Esfuerzos de Paz, planteado en el Mapa 6. En el Anexo 01 se presentan los registros de los levantamientos realizados en campo.

Las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA) y de las Anfibolitas de Medellín (TRaM). Todas estas unidades son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos aluviotorrenciales (Qalt), depósito de talus (Qt) y depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En el Mapa 7 y en el Mapa 8 se presentan los perfiles estratigráficos representativos.

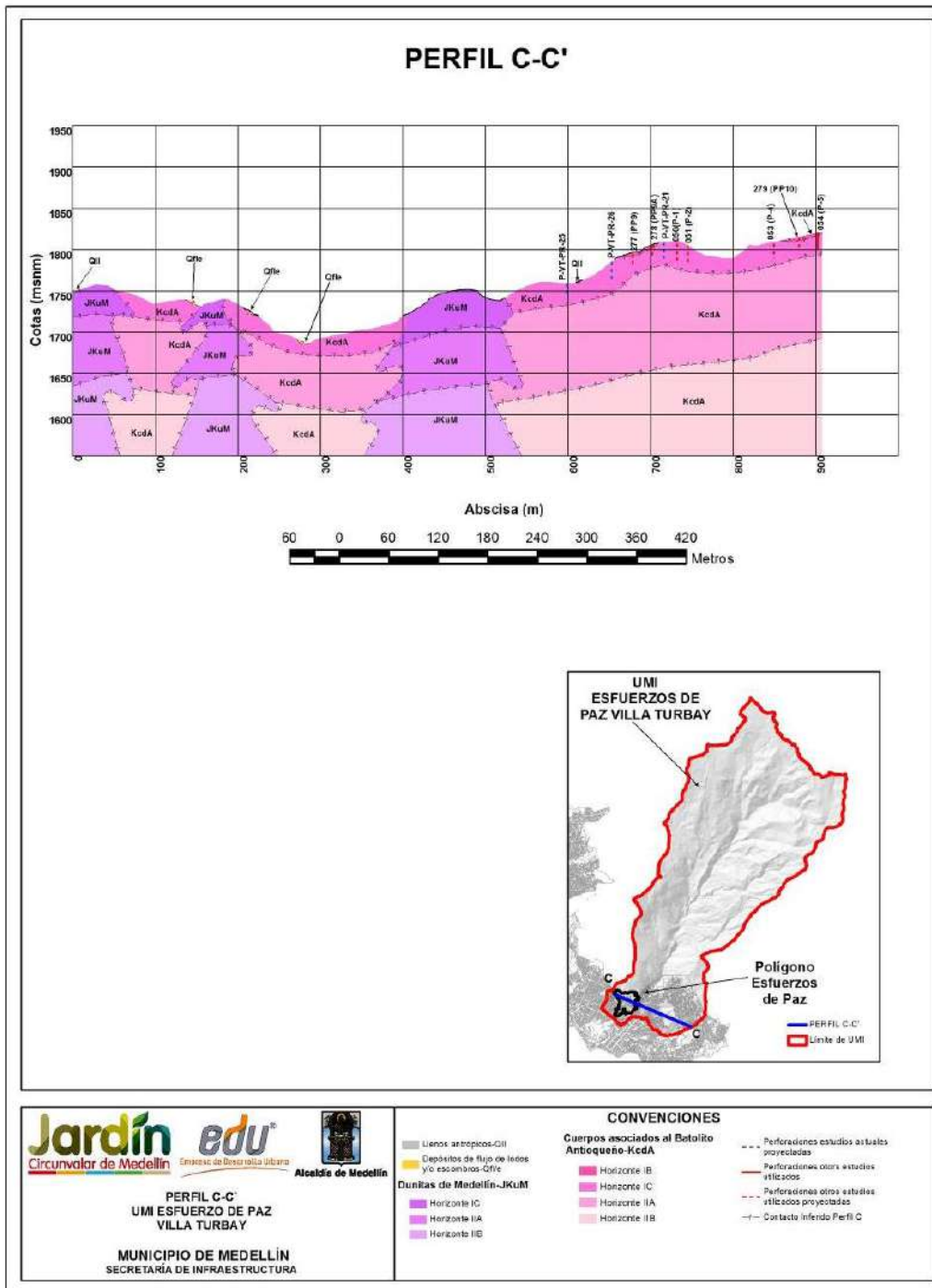
A continuación, se hace una breve descripción de cada una de estas unidades, desde la más reciente hasta la más antigua.





Mapa 6. Geología local de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay
(04_EDPGeologiaLocalUMI_Medellin_C y 04_EDPGeologiaLocalUMI_Medellin_T)



Mapa 7. Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'
 (05_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_C y 05_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_T)



Mapa 8. Perfil estratigráfico C-C'
(06_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_C y 06_EDPPerfilesGeologicos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

4.2.1 Llenos antrópicos (QII)

En la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay se encuentran cuerpos que en superficie abarcan longitudes entre 4 m y 113 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.5 m y 16.0 m, los cuales se concentran en la parte baja de la UMI en donde se encuentran los polígonos Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. Estos llenos fueron caracterizados en las perforaciones P-SA-PR-14, P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-21, P-EP-PR-22, P-VT-PR-20, P-VT-PR-21, P-VT-PR-22, P-VT-PR-23, P-VT-PR-24, P-VT-PR-26, P-VT-PP-02, 084(PA-PP-01), 085(PA-PP-01A), 086(PA-PP-01B), 119(PA-PP-25), 127(PA-PP-30), 273(PP7), 275(PP8), 280(PE-10), 051(P2) y 052(P3), suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín, de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizaron las líneas geofísicas P-VT-LG-01 y P-VT-LG-04 y las estaciones de campo MAD03-EP, MAD04-EP, MAD05-EP, MAD09-EP, SFJ01-EP, SFJ05-EP, MAD72-U-EPVT, MAD74-U-EPVT, MAD03-VT, MAD14-VT, AMD18-VT, MAD106-U-EPVT, SFJ09-U-SA y SFJ10-U-SA, como apoyo para determinar la extensión en superficie y en profundidad de algunos cuerpos.

Los llenos antrópicos en la UMI se concentran principalmente hacia el suroeste de la misma, dentro y cerca del polígono Esfuerzos de Paz, en donde se encuentran al menos 10 cuerpos de corta extensión en planta, los cuales se describen a continuación.

Hacia el extremo noroeste del polígono Esfuerzos de Paz se encuentra un lleno antrópico, caracterizado en las perforaciones P-SA-PR-14 y 085 (PA-PP-01A) con espesor variable entre 4.5 m y 6.0 m. Tiene una relación matriz/fragmentos de 95/5, está formado por material limoso de color café anaranjado y gris verdoso, húmedo, de consistencia blanda a firme y tenacidad media. Los fragmentos son de dunitas, subredondeados, levemente meteorizados, con tamaños entre 1 cm y 5 cm. Tiene una capa de materia orgánica entre 5.5 m y 6.0 m de profundidad. Durante los recorridos de campo en la zona, se observó que el lleno analizado se encuentra cubriendo la parte alta del antiguo cauce de la Quebrada San Antonio. Es probable que el lleno se haya conformado posterior al año 1998, dado que en las curvas de nivel de la cartografía de este mismo año se observa aún la geoforma característica de un drenaje en la zona, mientras que actualmente no se encontraron evidencias de su presencia de acuerdo con las observaciones realizadas (Figura 7).

Además, hacia el noroeste del Polígono Esfuerzos de Paz se halla el lleno antrópico identificado con la perforación P-EP-PR-22 con un espesor de 3 m (Figura 8). El material presenta un color pardo amarilloso, en ocasiones anaranjado. La matriz presenta un tamaño de grano limo con 30% – 40% de arenas, se encuentra húmeda a seca, de consistencia blanda y tenacidad baja. Se deshace fácilmente. Tiene trazas de fragmentos de dunitas, levemente meteorizados, subangulares y con tamaños cercanos a los 3 cm.

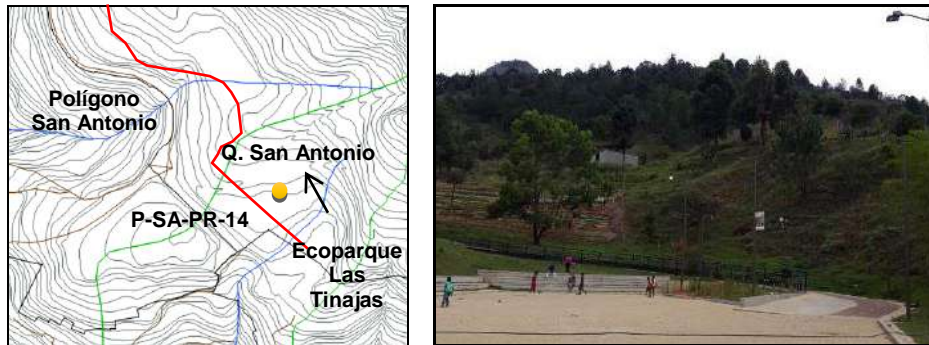


Figura 7. Zona del lleno de perforación P-SA-PR-14 en cartografía del año 1998



Figura 8. Lleno antrópico reportado en la Perforación P-EP-PR-22

Hacia el nororiente del Polígono Esfuerzos de Paz, se encuentra el lleno antrópico caracterizado en la Perforación P-EP-PR-17, el cual tiene un espesor de 4 m. Se compone de fragmentos de dunitas, inferiores a 10 cm de longitud, angulares a subredondeados, moderadamente meteorizados, con óxidos de hierro en algunas superficies. Se encuentra igualmente fragmentos de concreto de 7 cm de longitud.

Hacia el oeste del polígono Esfuerzos de Paz, por fuera del mismo, se encuentran también llenos antrópicos identificados en las estaciones SFJ09-U-SA, SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA, de los cuales uno tiene hasta 8.0 m de espesor, está dispuesto cerca de la canalización de la Quebrada San Antonio y está conformado por 20% de materiales antrópicos arrojados alrededor de ambas márgenes. Tiene relación matriz/fragmentos de 60/20, la matriz es limosa de color pardo, húmeda, consistencia blanda, tenacidad baja y los fragmentos son de dunita, subangulares que miden hasta 30 cm. El otro cuerpo tiene espesor de hasta 4 m, corresponde a materiales dispuestos para la construcción de viviendas, está formado por 60% de matriz limosa café, húmeda y de consistencia blanda, 30% de fragmentos subangulares de dunitas y 10% de materiales antrópicos.



También, dentro del Polígono Esfuerzos de Paz y en la parte central de la UMI, en cercanías a la Quebrada La Castro (Figura 9), se encuentran otros llenos antrópicos de dimensiones menores, los cuales fueron identificados durante los recorridos de campo en las estaciones MAD09-EP, MAD03-EP, MAD04-EP, MAD05-EP, MAD72-U-EPVT, MAD74-U-EPVT, SFJ-01, SFJ05-EP y en las perforaciones 275 (PP8), 127 (PA-PP-30) y 086 (PA-PP-01B). De manera general, estos materiales presentan un tamaño de grano limo arenoso, con color pardo anaranjado, el espesor varía ente 2 m – 5 m, húmedo, de consistencia blanda a muy blanda y de tenacidad baja. Los fragmentos corresponden a dunitas levemente meteorizadas, subangulares a subredondeados y con tamaños inferiores a 1 m. Los materiales antrópicos encontrados corresponden a plástico, costales, madera y ladrillos, como se ilustra en la Figura 9 y en la Figura 10.



Figura 9. A) Lleno antrópico Estación de Campo MAD08-EP. B) Margen izquierda Qda La Castro (MAD72-U-EPVT), cerca al Colegio Gabriel García Márquez



Figura 10. Lleno antrópico Estaciones de Campo SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Hacia el extremo sureste de la UMI se encuentra el lleno antrópico, identificado con la perforación P-EP-PR-18, cuyo espesor es de 3 m. La matriz tiene un tamaño de grano limo con arenas finas, de color café oscuro anaranjado, húmeda, de consistencia blanda a firme y tenacidad media. Los fragmentos corresponden a dunitas, subangulares, moderadamente meteorizados, con tamaños entre 3 cm y 8 cm.

4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ

Las cenizas volcánicas se encuentran como capas discontinuas removilizadas e in situ con espesores variables entre 50 cm a 1.5 m. Por lo general se encuentran mezcladas con suelo residual de dunita y materia orgánica, producto de la actividad agrícola y urbanística de la zona.

En la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay están localizadas en la unidad geomorfológica denominada como Vertiente Suave y Peldaño Alto e identificadas en la Perforación U-EP-PP-02 y en las Estaciones de Campo SFJ13-U-EPVT, AMD11-U-EFG, AMD12-U-EFG, AMD13-U-EFG, posteriormente corroboradas con las Líneas Geofísicas U-EPVT-LG-07 y U-EPVT-LG-08. Esta capa cubre el perfil de suelo de las dunitas, cuyo tamaño de grano es principalmente limo, de color pardo amarillento y generalmente se encuentra húmeda (Figura 11).



Figura 11. Capa de cenizas volcánicas removilizadas

4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)

Este depósito fue identificado en las Estaciones de Campo MAD13-EP, MAD22-U-EPVT, MAD71-U-EPVT, MAD77-U-EPVT, localizado en la parte baja del polígono de Esfuerzos de Paz (Figura 12) y en la confluencia de la Quebrada La Castro y La Castro 4 (Figura 13). Presentan relación matriz/ fragmentos de 30/70, la matriz es arenosa de color café pardo húmeda, los fragmentos presentan longitudes de hasta 2.0 m de dunitas y anfibolitas frescos.



Figura 12. Depósito aluviotorrencial parte baja del Polígono Esfuerzos de Paz

En la Figura 13, se ilustra una sección del depósito aluviotorrencial localizado en la Quebrada La Castro 4, reportado en la estación de campo MAD42-U-EPVT, en donde se encuentra la zona de influencia de la falla La Castro 1 y la brecha de la falla que marca el contacto entre las Dunitas y las Anfibolitas.



Figura 13. Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Castro 4

4.2.4 Depósito de talus (Qt)

Este depósito fue identificado en la estación MAD39-U-EPVT, localizado en la parte central de la UMI, sobre el cuerpo de anfibolitas, presenta un espesor de al menos 3 m, una longitud de 7 m y un ancho de 15 m. Es un depósito netamente clasto soportado, no presenta matriz. Los fragmentos corresponden a anfibolitas, angulares a subangulares, con tamaños inferiores a 1 m de diámetro (Figura 14).



Figura 14. Depósito de talus compuesto de fragmentos de anfibolitas

4.2.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)

Se encuentran distintos cuerpos distribuidos aleatoriamente en toda la UMI, especialmente en la parte baja, en algunos casos cubiertos de forma parcial por llenos antrópicos. Tienen espesores entre 2 m y 12 m y abarcan longitudes de hasta 200 m. Se encontraron en las perforaciones P-EP-PR-18, P-EP-PR-21, P-VT-PR-25, P-VT-PR-26, 236(P8), 405(P2), 406(P3), 407(P4), 409(P6), 410(P7), 411(P8), 412(P9), 413(P10), 414(P11), 415(P12), 416(P13), 417(P14), 084(PA-PP-01), 086(PA-PP-01B), 147(PA-PR-01), 108(PA-PP-16), 119(PA-PP-25), 127(PA-PP-30), 275(PP8), 600(P2), 602(P4), 603(P5), 604(P6), así como en las estaciones de campo MAD01-EP, MAD02-EP, MAD08-EP, MAD10-EP, MAD12-EP, MAD04-U-EP, SFJ03-EP, SFJ04-EP, SFJ11-EP y SFJ01-U-EPVT.

Es importante tener en cuenta que un depósito de flujo de lodos y/o escombros (de vertiente) puede presentar grandes variaciones en cuanto a su fábrica (relación matriz/fragmentos), tanto lateral como en profundidad, haciendo que existan diferencias en cuanto a la concentración de fragmentos y/o matriz (matriz soportado o clasto soportado) en un mismo cuerpo. Por lo anterior, de manera general se ha denominado a esta unidad litológica como depósitos de flujos de lodos y/o escombros a todos los cuerpos de este tipo encontrados en la zona de estudio.

En este estudio los depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) agrupan las unidades de depósitos cartografiados por el Consorcio Microzonificación (2006) como QFIII, NFI y NQFII, cuya subdivisión fue hecha con herramientas de apoyo como datación, grado de incisión y madurez (grado de meteorización), lo cual no es objeto del presente estudio. Debido a lo anterior y sumado a que los cuerpos identificados en la zona de estudio presentan el mismo grado de meteorización, todas estas unidades se agruparon de manera general como Qfl/e.

El depósito ubicado a ambos lados de la quebrada San Antonio fue caracterizado gracias a las perforaciones 406(P3), 407(P4), 408(P2), 412(P9), 409(P6), 410(P7), 415(P12), 417(P14) y 416(P16). Se trata de una material de color café anaranjado, con tamaño de

grano limo arenoso, compuesto por raíces, fragmentos milimétricos de cuarzos lechosos y micas, con fragmentos de roca granítica meteorizada. El material se encuentra seco, presenta tenacidad media y es fácilmente disgregable.

Los depósitos localizados sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro se caracterizan por estar compuestos de fragmentos de dunitas y anfibolitas principalmente y de matriz limosa, se encuentran localizados en media ladera, producto de fenómenos de inestabilidad generados por el desprendimiento del horizonte IIA de meteorización de las Dunitas y/o Anfibolitas (Figura 16A). En tanto que aquellos localizados sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro se caracterizan por estar compuestos por fragmentos de granitos y de matriz arenosa, esto debido a que sobre esta margen aflora uno de los cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño, convirtiéndose así en la principal fuente de aporte para los depósitos recientes sobre esta vertiente. Así como aquellos localizados en la parte baja del polígono Esfuerzos de Paz cumplen con estas características (Figura 15).



Figura 15. Depósito de flujo de lodos y/o escombros estaciones MAD08-EP y MAD12-EP

En el Mapa 6 se localizan dos cuerpos con forma ovalada-alargada sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro 4, que se caracterizan por una relación matriz/fragmentos de 40/60, la matriz es limosa mezclada con materia orgánica, levemente húmeda y consistencia muy blanda, los fragmentos presentan tamaños menores de 30 cm, frescos con formas angulares de anfibolitas principalmente, esto debido a que se encuentra sobre la parte baja de la vertiente occidental donde aflora el cuerpo de Anfibolitas de Medellín, convirtiéndose así en la principal fuente de aporte para la conformación de este depósito (Figura 16).



Figura 16. Depósito de flujos de lodos y/o escombros

4.2.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)

Se encuentran dos cuerpos asociados al Batolito Antioqueño denominados por el Consorcio Microzonificación (2006) como el Stock de Las Estancias (KcdE) y el Stock de Media Luna (KcdML). El Stock de las Estancias se localiza en la parte baja de la UMI, en los alrededores de los polígonos Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. El Stock de Media Luna se encuentra en la parte media de la UMI, sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro, comenzando desde la parte superior del centro de rehabilitación Hogares Claret (entre la quebrada. La Castro 2 y La Caneca).

Estos cuerpos presentan forma rectangular muy característica en sentido NE, el relieve en el que se desarrolla esta unidad se caracteriza por ser colinado, con desarrollo de lomos con vertientes suaves. Es evidente además, el fuerte control estructural que presenta esta unidad en la zona de estudio, ya que en la parte superior fueron encontradas un conjunto de geoformas de origen estructural tales como fallas, lineamientos y facetas triangulares. Asociados posiblemente a la influencia que ejercen las Fallas La Castro, La Castro 1 y La Aguadita sobre esta unidad litológica.

Fueron identificados en la zona de estudio, mediante los recorridos de campo y la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo del horizonte IC, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Este horizonte se halla en la perforación P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-19, P-EP-PR-20, P-EP-PR-21, P-EP-PR-22 y en las líneas geofísicas P-VT-LG-02, P-VT-LG-03. En la perforación P-EP-PR-22 se encontró la zona de contacto intrusivo Dunita de Medellín-Cuerpo granítico en suelo residual de color café moteado de gris con estructura ígnea fanerítica a bandeada (Figura 17).

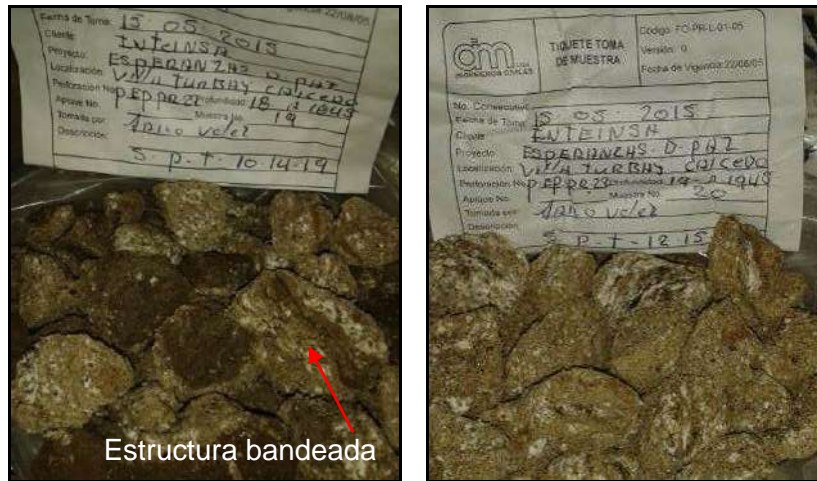


Figura 17. Suelo saprolítico del cuerpo granítico con estructura bandeada (Brecha de intrusión)

El Horizonte IC consiste en un suelo areno limoso blanco rojizo, con espesor mínimo de 10 m, donde se identifican minerales como cuarzo con longitudes de 5.0 mm, plagioclasa alterada a arcilla de color blanco y mica-biotita con longitudes de hasta 7.0 mm, conserva la estructura fanerítica del granito y en algunas partes se encuentra como gruss (Figura 18). Este saprolito tiene consistencia muy blanda y se encuentra húmedo.



Figura 18. Horizonte IC-Gruss del cuerpo granítico en la perforación P-EP-PR-22

En los recorridos de campo, específicamente en las Estaciones de Campo MAD92-U-EPVT y SFJ-07-EP, localizadas en la parte alta de la UMI (margen izquierda de la Quebrada La Castro) y en el Polígono Esfuerzos de Paz respectivamente, se evidenció que este cuerpo presenta formas ovaladas debido a la meteorización esferoidal (Figura 19B) fuertemente fragmentada y desarrolla un suelo saprolítico con alto contenido de cuarzo lechoso y minerales de hierro que le dan una coloración levemente rojiza como se ilustra en la Figura 19A.

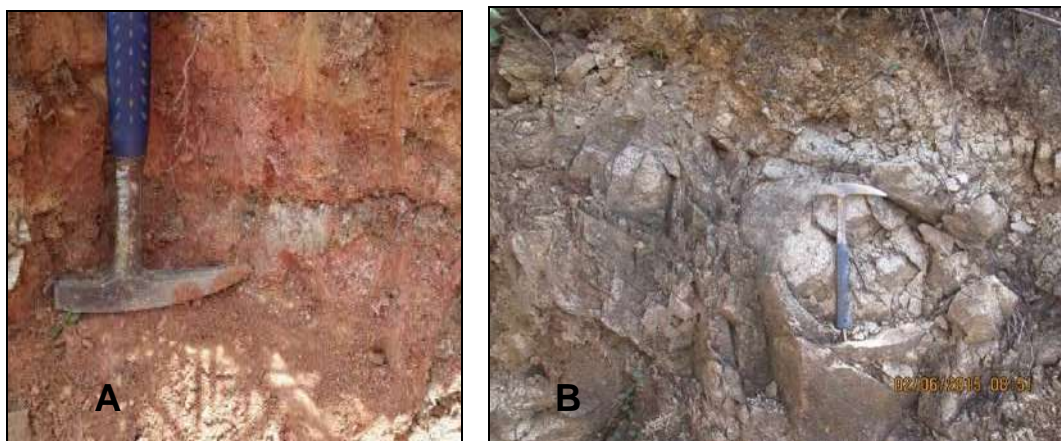


Figura 19. A) Suelo saprolítico con cuarzo lechoso. B) Meteorización esferoidal

4.2.7 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Se halla en las perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-20, P-VT-PR-24, U-EP-PP-02 y en las líneas geofísicas P-EP-LG-01, P-EP-LG-03, U-EP-LG-03 y U-EP-LG-06. En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos reportados en la estación KGL-11-U-EPVT, milonitas, salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunita cizallada (Figura 20).

Durante los recorridos de campo, se observó sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro 4, específicamente en las Estaciones de Campo MAD40-U-EPVT, MAD43-U-EPVT y MAD50-U-EPVT zonas de cizalla y brechas tectónicas de Dunitas-Anfibolitas, las cuales corresponden a la zona de influencia de la Falla La Castro 2 y estructuras asociadas al cabalgamiento, como se ilustra en la Figura 21.



Figura 20. Cuerpo de dunitas cizalladas



Figura 21. Brecha tectónica de Dunitas-Anfibolitas sobre la Quebrada La Castro 4.

El Horizonte IB se localiza en la parte alta y baja de la UMI, específicamente donde se tienen las zonas con pendientes suaves. De acuerdo con la Perforación U-EP-PP-02, tiene espesor entre 1.5 m y 6.0 m. Consiste en un suelo de color café parduzco, con tamaño de grano limo y arcilla, húmedo, consistencia firme a blanda y tenacidad baja, que contiene raíces, micas y nódulos de hierro con longitudes de hasta de 5.0 mm.

Además, en las Estaciones de Campo SFJ18-U-EPVT, SFJ20-U-EPVT, MAD56-U-EPVT, KGL01-U-EPVT, se identificó como un suelo limoso con alto contenido de nódulos de hierro con longitudes de hasta 6.0 mm, consistencia blanda y húmedo, como se ilustra en la Figura 22.



Figura 22. Horizonte IB de meteorización con costra de óxidos de hierro localizado en la parte alta de la UMI

El Horizonte IC se encuentra en la Perforación U-EP-PP-02 con espesor de hasta 8.0 m. En todos los casos observados de este horizonte se trata de un horizonte de meteorización de una brecha. El suelo es limo arcilloso, de color pardo anaranjado con manchas verdes, húmedo y con tenacidad media. Contiene bloques de dunita frescos y con textura esquistosa. En las Estaciones de Campo MAD100-U-EPVT y MAD99-U-EPVT, donde actualmente se encuentran construyendo la Institución Educativa Villa Turbay y parte del Jardín Circunvalar de Medellín (Inmediaciones del centro de rehabilitación Hogares Claret), se encuentra este horizonte en taludes de 2.0 m de altura en el cual se observa suelo residual exhibiendo estructura esquistosa y bloques angulosos de dunita como se ilustra en la Figura 23.



Figura 23. Horizonte IC de meteorización sobre talud

El Horizonte IIA se cartografió con base en las estaciones de campo KGL11-U-EP, AMD17-U-EPVT, AMD11-U-EPVT, AMD08-U-EPVT, SFJ10-U-EPVT, SFJ04-U-EPVT, MAD49-U-EPVT, MAD28-U-EPVT, MAD29-U-EPVT, entre otras y en las líneas geofísicas U-EP-LG-03 y U-EP-LG-06, con espesores inferidos superiores a 15 m. Consiste en bloques de dunitas y dunitas milonitizadas con longitudes inferiores a 30 cm en promedio.

La roca se encuentra moderadamente meteorizada, altamente fracturada y diaclasada, presenta alteraciones a serpentina y talco, con pátinas de oxidación negras y pardas. Se observan igualmente espejos de falla y zonas de cizalla (Figura 25). Es común encontrar zonas donde el suelo ha sido lavado quedando bloques de roca frescos con tamaños menores de 50 cm fuertemente diaclasados en la superficie, como se ilustra en la Figura 24.



Figura 24. Bloques en superficie por erosión superficial en el Horizonte IIA de meteorización

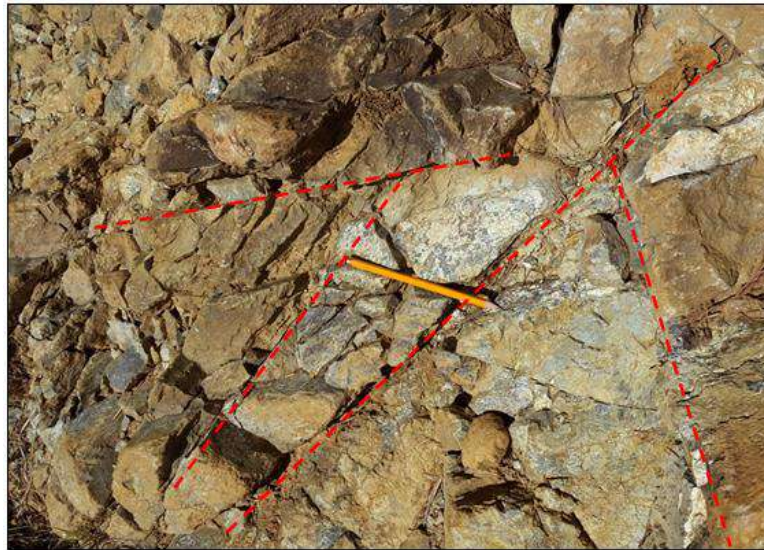


Figura 25. Grado de fracturamiento en Horizonte IIA de las dunitas

4.2.8 Anfibolitas de Medellín (TRaM)

Esta unidad fue identificada en la parte media de la cuenca de la Quebrada La Castro, durante la exploración en superficie. Este cuerpo se caracteriza por presentar rasgos

topográficos evidentes en campo, hace parte de un filo localizado en el centro de la cuenca de la Quebrada La Castro, el cual tiene forma alargada con orientación NE y está limitado por las fallas La Castro y La Castro 1. Todos los depósitos suprayacentes a esta unidad litológica se componen de este material, siendo una evidencia con respecto a la proveniencia de las anfibolitas. Se encontró desarrollo de los Horizontes IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971).

El horizonte IC fue encontrado en las estaciones de campo MAD13-U-EPVT SFJ06-U-EPVT, SFJ07-U-EPVT, SFJ08-EPVT, SFJ11-EPVT. Se caracteriza por ser un suelo limoso de coloración naranja (Figura 26A) y blanca grisácea (Figura 26B), compuesto por minerales como plagioclasas alteradas a arcillas de color blanco y anfíboles, presenta consistencia blanda y está levemente húmedo. Sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro, este cuerpo fue encontrado fuertemente cizallado en conjunto con las dunitas, conformando una brecha tectónica (Figura 27).

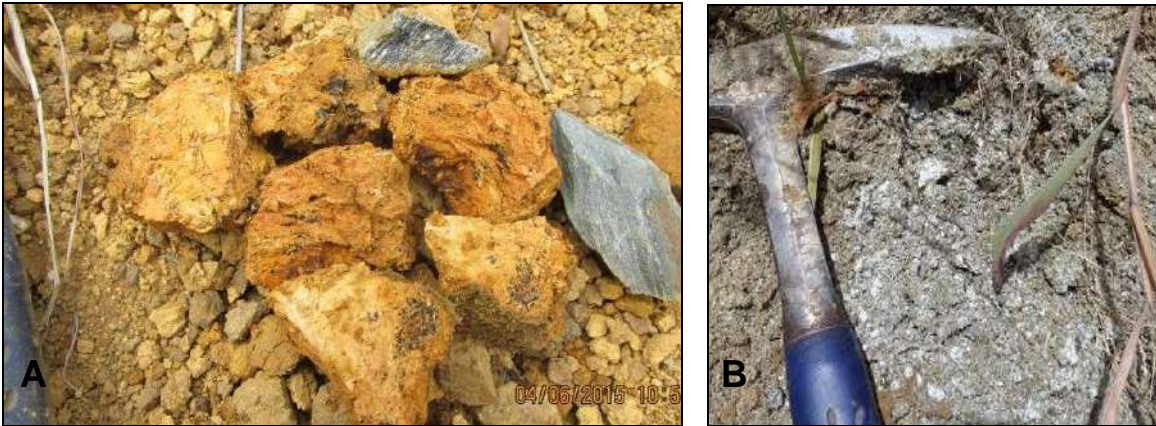


Figura 26. A) Brecha Dunitas-Anfibolitas. B) Horizonte IC de meteorización



Figura 27. Horizonte IC de brecha tectónica en las Anfibolitas de Medellín

El Horizonte IIA de meteorización fue encontrado en las estaciones de campo MAD20-U-EPVT y MAD21-U-EPVT. La roca se observa bandeada (Figura 28A) y en algunas partes levemente meteorizada (Figura 28B). Sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro 4, este cuerpo se encuentra altamente fracturado en conjunto con las Dunitas de Medellín, debido a la influencia de la Falla La Castro 1, encontrándose estructuras de bandeamiento dentro del cuerpo masivo asociado a las dunitas (brecha tectónica), como se observa en la Figura 28A.

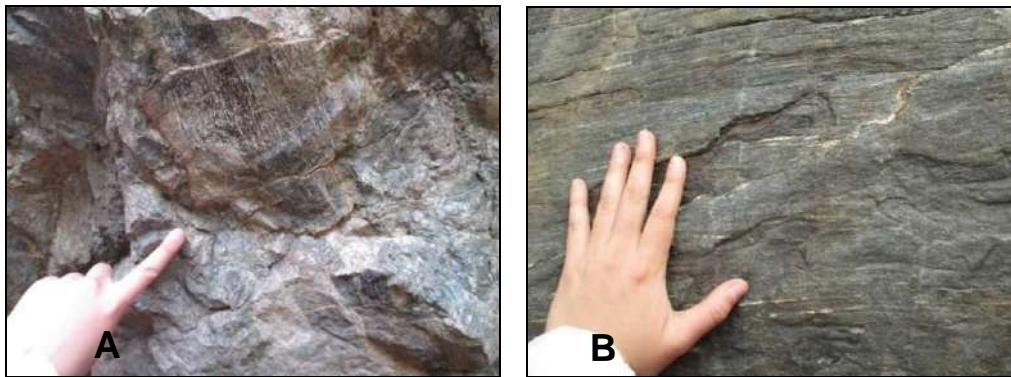




Figura 28. Horizonte IIA de las Anfibolitas de Medellín sobre la Quebrada La Castro 4

De manera general, la relación espacial y cronológica entre Anfibolitas-Dunitas –Cuerpos graníticos es la siguiente: las Anfibolitas de Medellín constituyen la unidad litológica más antigua dentro de la zona de estudio (basamento), las Dunitas de Medellín es la unidad que cabalga sobre las Anfibolitas y los cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño intruyen tanto a las Anfibolitas como a las Dunitas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

5. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

5.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL



El Valle de Aburrá se ubica en un valle profundo comprendido por dos altiplanos o superficies de erosión cuyas alturas oscilan entre los 2200 msnm y 3200 msnm. Regionalmente, las geoformas más sobresalientes corresponden a superficies de erosión localizadas en el altiplano de Santa Elena, escarpes erosivos, superficies con diversos grados de incisión desarrollados sobre materiales in situ y transportados y geoformas asociadas a estructuras geológicas. A continuación, se describen e ilustran las macrounidades o bloques y las unidades geomorfológicas que se encuentran en la zona de estudio.

5.1.1 Macrounidades geomorfológicas

Las macrounidades o bloques se asocian a unidades de paisaje en escalas regionales relacionadas genéticamente en cuanto a su geología, procesos de erosión y controles estructurales.

La UMI Esfuerzos de Paz se ubica sobre las macrounidades Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA), Altiplano Superficie de Erosión (AP-S-I) y el Valle Medio-Bloque Santa Elena (VM-BSE). A continuación se presenta la descripción de todas las macrounidades.

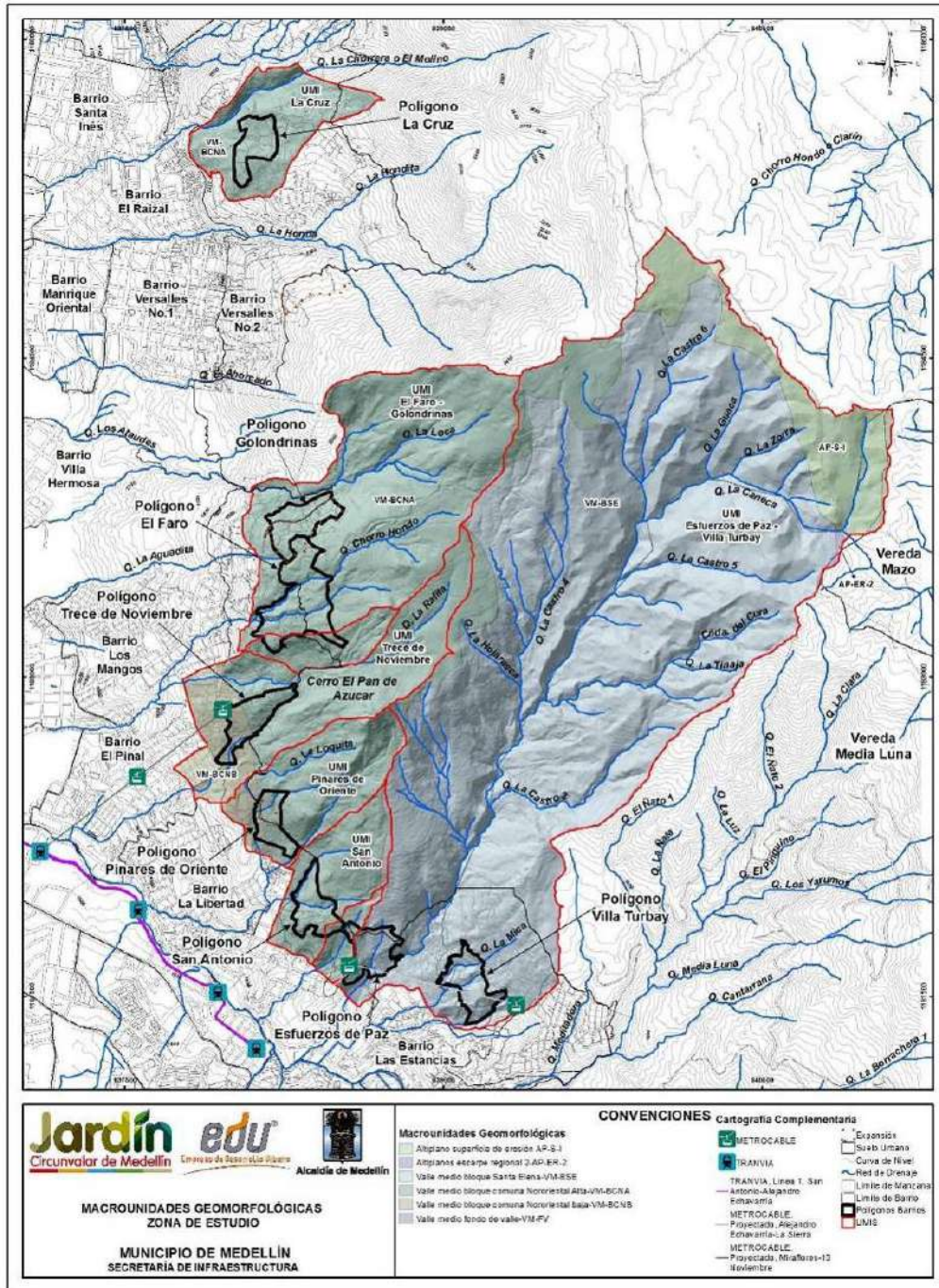
- ✓ Superficie de erosión S-I (AP-S-I), ubicada a altura del corregimiento de Santa Elena hacia el oriente de Medellín. Se encuentran entre alturas de 2500 msnm y 2600 msnm y se caracterizan por ser superficies con baja incisión pertenecientes al altiplano mencionado anteriormente en medio de sistemas de falla.
- ✓ Escarpe erosivo regional ER-2 (AP-ER-2), que limita las superficies de erosión descritas en el párrafo anterior. Genéticamente corresponden a zonas donde hubo un levantamiento tectónico que genera una superficie con un gradiente que facilita la ocurrencia de procesos de erosión, denominándose de esta manera como escarpe erosivo. Esta macrounidad es observada como un conjunto de lomos bajos exhibiendo un alto grado de incisión en comparación con la superficie de erosión.
- ✓ Valle medio del Bloque Santa Elena (VM-BSE), ubicado sobre la margen derecha de la Quebrada Santa Elena. Se trata de lomos con tendencia S-N a SSE-NNW, de topes redondeados y vaguadas poco incisadas. Cerca del sector de la Estancias y La Sierra se tienen controles estructurales evidenciados en lineamientos y descansos topográficos denominados peldaños.
- ✓ Valle medio del Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA), el cual se desarrolla geológicamente sobre las denominadas Dunitas de Medellín y de manera local sobre depósitos de vertiente. Su clasificación y característica principal es el control estructural presente, exhibiendo así un relieve escalonado sobre las laderas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---



Comprende un sistema de lomos con tendencia E-W de topes suaves y estrechos cañones.

- ✓ Valle medio del Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB), comprendiente a sistemas de lomos con tendencia N-S de topes suaves y estrechos cañones con control estructural como lineamientos con tendencia N-S. Esta unidad se desarrolla geológicamente sobre suelos depositados como aluviotorrenciales y aluviales asociados a la Qda Santa Elena.
- ✓ Valle medio de fondo de Valle (VM-FV), el cual corresponde a zona planas de baja inclinación e incisión asociadas a depósitos aluviales del fondo del Valle de Aburrá.

En el Mapa 9 se muestra la distribución de estas macrounidades que acaban de ser descritas.



Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio (07_EDPMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y 07_EDPMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

5.1.2 Unidades Geomorfológicas



Las unidades geomorfológicas se detallan en escalas un poco más locales, haciendo referencia a aquellas geoformas con relaciones en cuanto a su geometría, la homogeneidad del proceso que las genera, la geología y su edad. Dentro de las macrounidades descritas anteriormente se puede encontrar diversas unidades geomorfológicas, es decir, una misma unidad geomorfológica puede estar presente en varias macrounidades.

La UMI Esfuerzos de Paz se ubica sobre la Unidad de Lomos (L), Escarpes semi circulares superiores (ESCS), Peldaños (PÑ) y Superficies con baja incisión (SBI). A continuación se presenta la descripción de todas las unidades geomorfológicas y se menciona la macrounidad donde se encuentran.

- ✓ Unidad de lomos bajos (LB), la cual se encuentra en la macrounidad denominada Altiplano Escarpe Regional 2. Son lomos alargados sin ninguna orientación y con bajo grado de disección.
- ✓ Unidad de superficies con baja incisión (SBI), la cual se encuentra en la macrounidad denominada como Altiplanos Superficie de Erosión I y corresponde a geoformas de lomos alargados localizadas cerca de zonas escarpadas.
- ✓ Unidad de lomos (L), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y Valle Medio Bloque Santa Elena. Se caracterizan por estar orientados hacia el eje fluvial principal, corresponden a filos alargados y estrechos.
- ✓ Unidad de Peldaños (PÑ): Esta unidad se encuentra en las macrounidades: Valle medio-Bloque Comuna Nororiental Alta, Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Baja, y Valle Medio-Bloque Santa Elena, corresponden a superficies de baja inclinación de gran continuidad.

Unidad de rasgos morfotectónicos (RMT), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y corresponden a geoformas asociadas estructuralmente a lineamientos, fallas y contactos entre unidades geológicas.

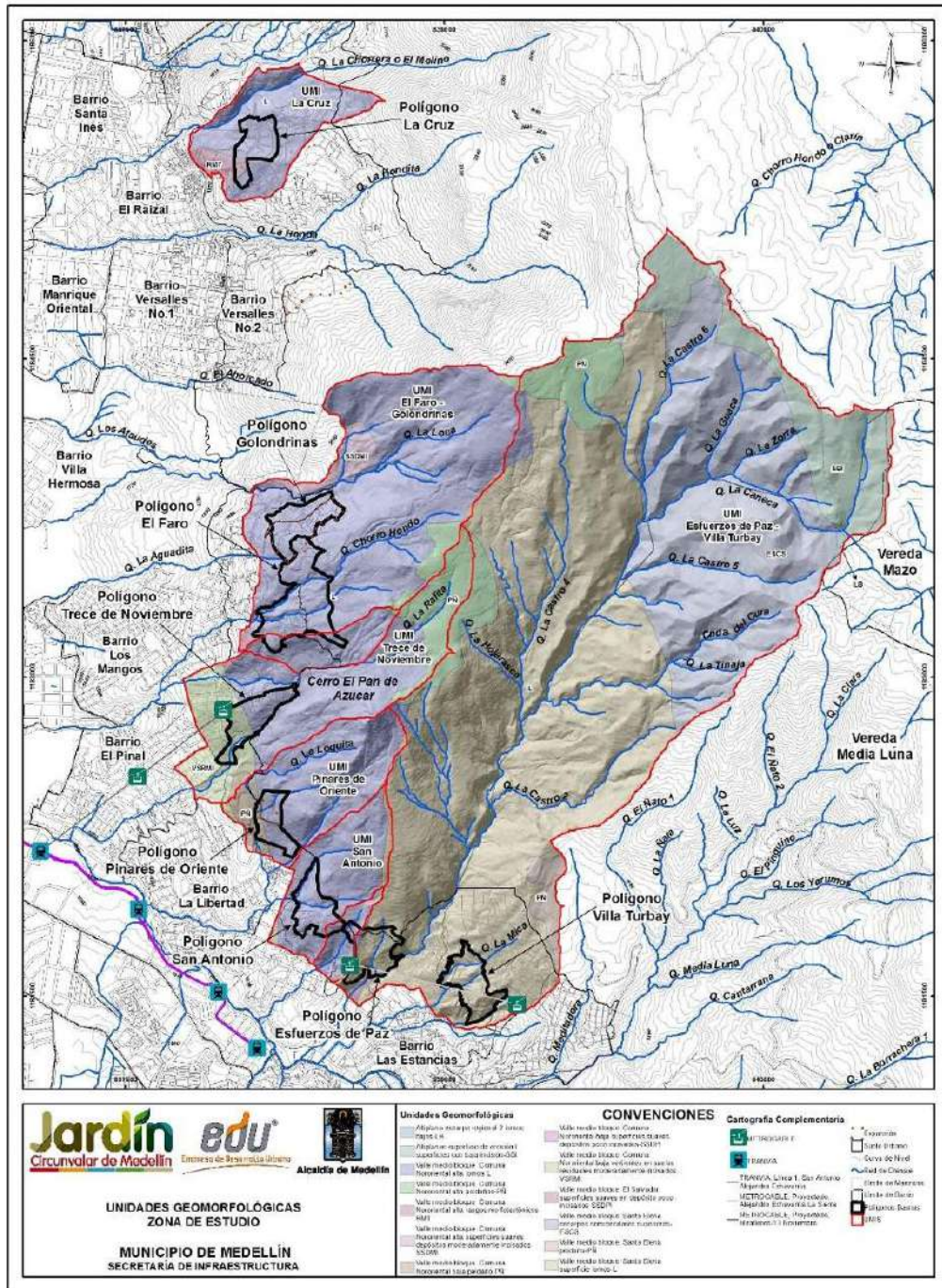
- ✓ Unidad de superficies suaves depósitos moderadamente incisados (SSDMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta. Se desarrolla sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponde a zonas continuas de baja inclinación e incisión moderada.
- ✓ Unidad de superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas como Valle Medio Bloque El Salvador y Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja. Se desarrollan sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponden a zonas continuas de baja inclinación y poca incisión.
- ✓ Unidad de Vertiente en suelos residuales moderadamente incisados (VSRMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja.

	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

La localización de esta geoforma varía de acuerdo con la unidad geológica presente. Corresponden a laderas con filos estrechos y topes agudos. Para el caso de estudio se desarrollan sobre suelos residuales de las Dunitas de Medellín.

- ✓ Unidad de Escarpes semicirculares superiores (ESCS), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio-Bloque Santa Elena. Se encuentra en zonas escarpadas y superficies rocosas hacia los límites con los altiplanos, caracterizándose por presentar fuertes pendientes.

La localización en planta de estas unidades geomorfológicas que acaban de ser descritas se muestra en el Mapa 10.



Mapa 10. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio (08_EDPUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y 08_EDPUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)

5.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En este capítulo se realiza el análisis para la definición de las unidades geomorfológicas de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, a partir de las geoformas levantadas en campo, el mapa de pendientes, geología local de la zona de estudio y los procesos morfodinámicos que se observan en ella.

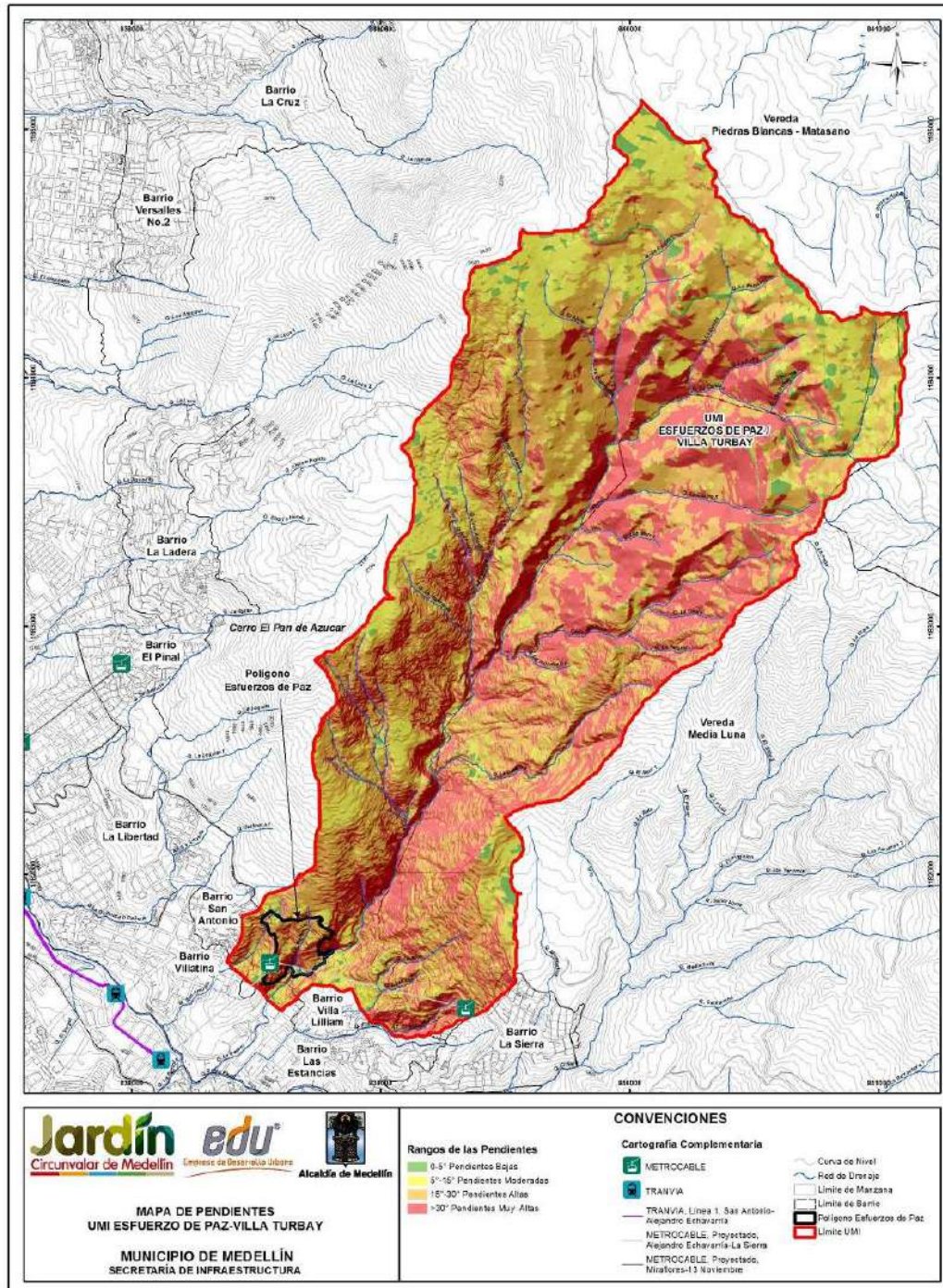
Se definieron rangos de pendiente de acuerdo con el ángulo de inclinación que presenta el terreno, el cual es expresado según el Acuerdo Metropolitano N°9 de 2012 del AMVA (Tabla 1). Además se revisaron fotografías aéreas para la fotointerpretación, recorridos de campo para delimitación e identificación de la morfogénesis de las unidades geomorfológicas.

Tabla 1. Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local



Rango	Clasificación	Rasgo Geomorfológico	Tipo de Proceso
0° a 5°	Baja	Planicies	Erosión superficial
5° a 15°	Moderada	Superficies Suaves	Erosión superficial
15° a 30°	Alta	Superficies Moderadas	Movimientos en masa y Erosión superficial
> 30°	Muy Alta	Laderas Empinadas	Movimientos en masa y Caída de rocas

Haciendo uso de Herramientas SIG, se obtuvo el mapa de pendientes que se presenta en el Mapa 11 de manera que pueden hacerse las siguientes observaciones:

- ✓ Las zonas resaltadas en color verde son las de pendientes bajas (0° a 5°), correspondientes a planicies. Estas zonas se encuentran distribuidas a lo largo de toda la UMI, están asociadas a rasgos tectónicos denominados como peldaños o descansos, formas de origen estructural y también a zonas de explanación antrópica.
- ✓ Las zonas con pendientes moderadas (5° a 15°) y altas (15° a 30°) corresponden a las sombreadas de colores amarillo y naranja, respectivamente. Son las predominantes en la UMI. Corresponden a superficies suaves modeladas en materiales desprendidos y moderadas modeladas por la incisión de las quebradas y sus afluentes.
- ✓ Las zonas con pendientes muy altas (>30°) se resaltan con color rojo. Éstas son caracterizadas por presentar vertientes escarpadas moldeadas en roca, estando algunas hoy día cubiertas por la vegetación y cultivos.

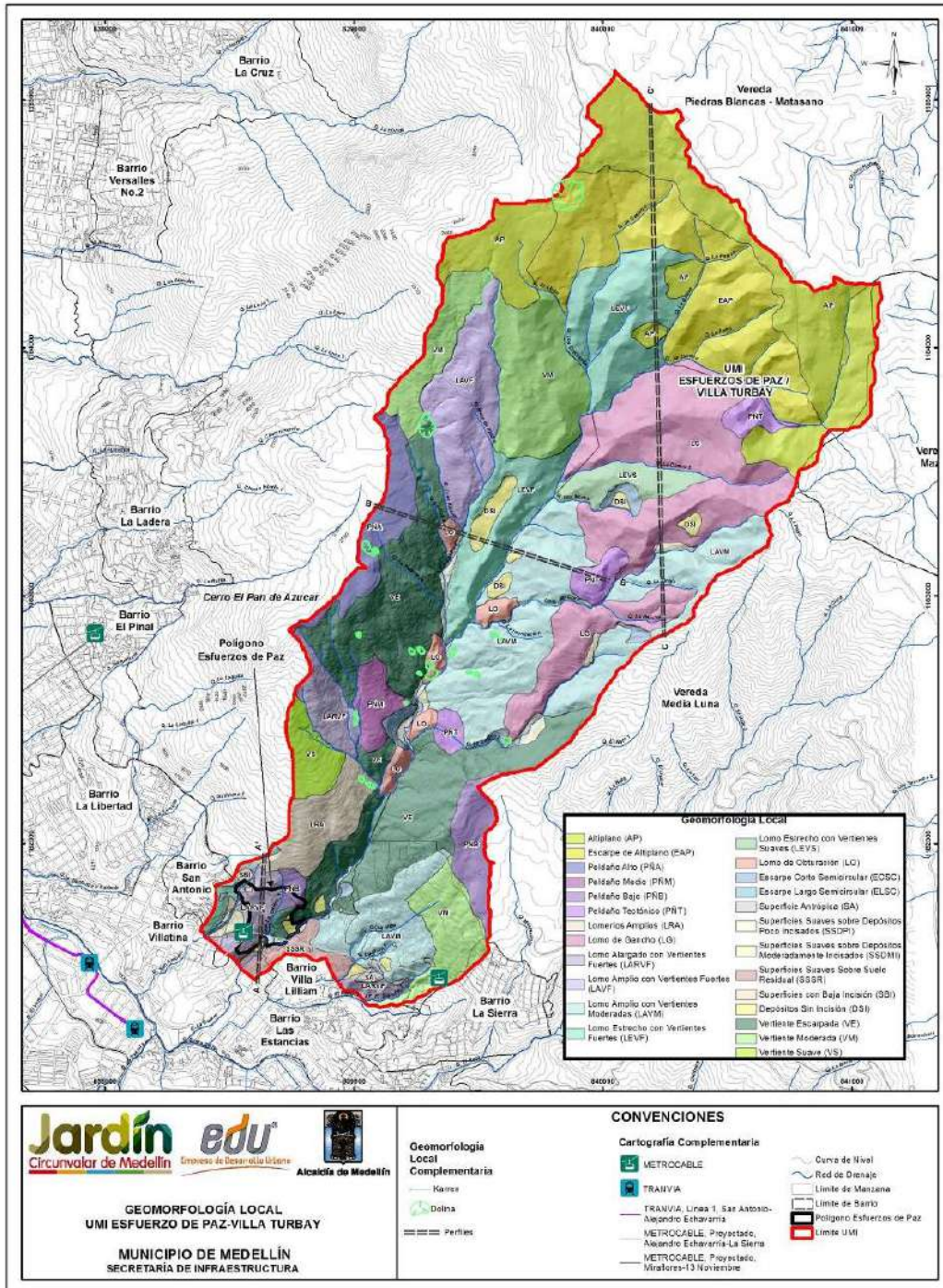


Mapa 11. Análisis de pendientes UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay (09_EDPPendientes_Medellin_C y 09_EDPPendientes_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Teniendo en cuenta el análisis del mapa de pendientes, los recorridos de campo y la geología local de la zona de estudio, se lograron definir 25 unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los numerales 5.2.1 a la 5.2.25 de este capítulo.

En el Mapa 12 se presenta el mapa de unidades geomorfológicas de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay. En el polígono Esfuerzos de Paz predominan las unidades de lomos tales como: Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF, Peldaño Bajo-PÑB, Lomeríos Amplios-LRA y Superficies moderadas en depósitos y materiales antrópicos. Los perfiles de las unidades más representativas se muestran de la Figura 29 a la Figura 31.



Mapa 12. Unidades geomorfológicas de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay (10_EDPGeomorfologiaLocal_Medellin_C y 10_EDPGeomorfologiaLocal_Medellin_T)

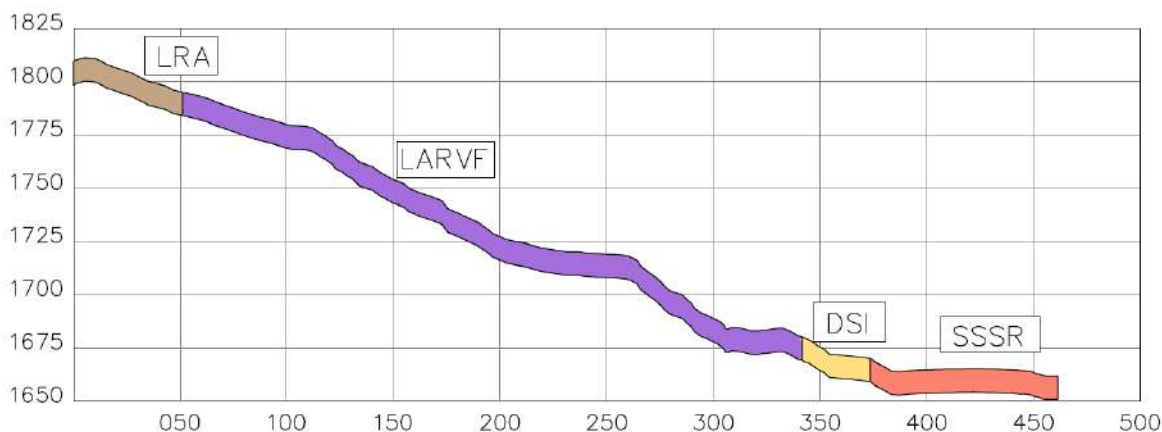


Figura 29. Perfil geomorfológico A-A'

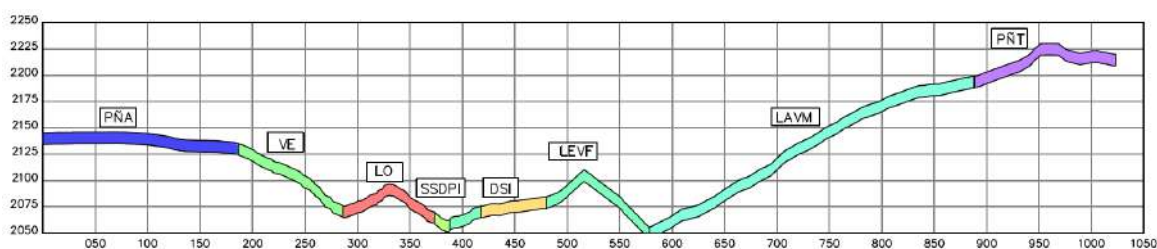


Figura 30. Perfil geomorfológico B-B'

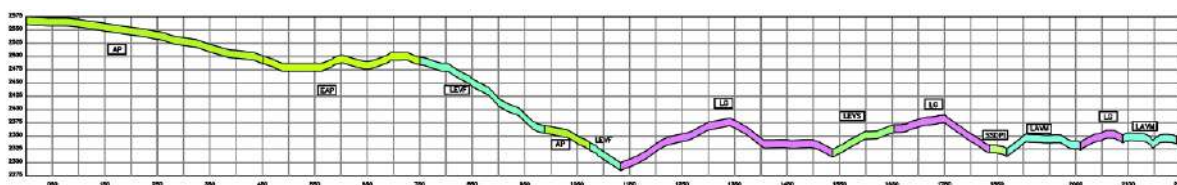


Figura 31. Perfil geomorfológico C-C'

5.2.1 Unidad de Altiplano AP

Se localiza en el extremo nororiental de la UMI, en el altiplano de Santa Elena entre las cotas 2510-2525 msnm. Esta unidad se caracteriza por presentar pendientes suaves menores de 5°, compone una superficie plana continua casi horizontal con baja incisión. También se tienen pequeños remanentes o relictos de esta geofoma en las inmediaciones de la unidad de Escarpe de Altiplano (Figura 32). Litológicamente se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

5.2.2 Unidad de Escarpe de Altiplano EAP

Se encuentra ubicada en la parte baja de la unidad de Altiplano. Esta geofoma está relacionada genéticamente con el levantamiento cordillerano, el cual genera frentes

erosivos con desarrollo de sistemas de drenajes dendríticos y conjuntos de lomos con dirección hacia el eje fluvial principal (Quebrada La Castro) como se ilustra en la Figura 32. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

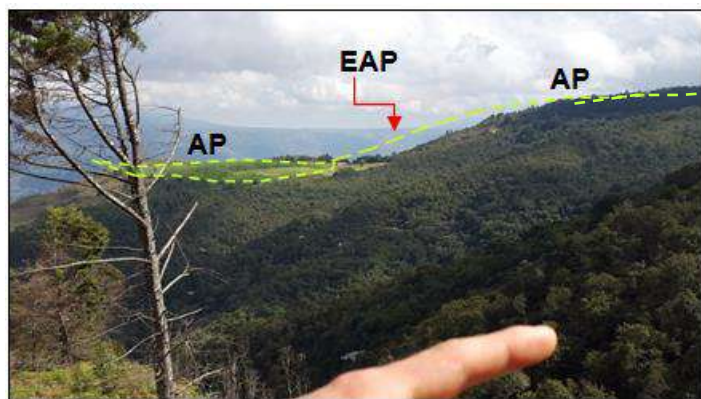


Figura 32. Unidad de Altiplano AP y Escarpe de Altiplano EAP

5.2.3 Unidad Peldaño Alto PÑA

Se localiza al oeste de la parte media de la UMI, dispuesto en sentido preferencial NE sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro. Esta geoforma se encuentra relacionada con rasgos estructurales asociados a descansos de falla, ya que se encuentra limitada por vertientes escarpadas y lineamientos de gran continuidad observados en quiebres de pendiente y lomos deflectados. Presentan baja inclinación entre los 0° y 5° (superficies suaves), son de gran continuidad encontrándose desde la parte alta de la UMI hasta el camino que conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar, presenta bajo grado de incisión y forma irregular. Litológicamente se desarrolla sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín. En la Figura 33 se resalta sombreada dicha unidad.

5.2.4 Unidad Peldaño Bajo PÑB

Esta unidad se encuentra localizada hacia la parte baja de la UMI, sobre ambas márgenes de la Quebrada La Castro. El peldaño encontrado sobre la margen izquierda, se ubica sobre el centro de rehabilitación Hogares Claret (Parte superior del polígono Villa Turbay) y el de la margen derecha se ubica en la parte superior del Polígono Esfuerzos de Paz. Se encuentra entre las cotas 1954 msnm y 2002 msnm limitado por lineamientos asociados a quiebres de pendiente. Esta unidad presenta forma irregular y se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

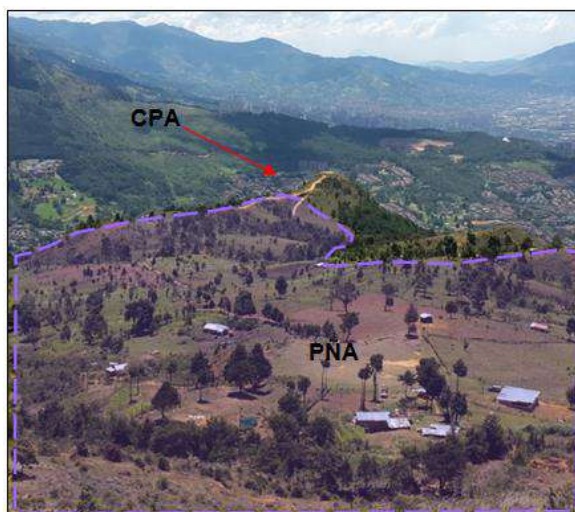


Figura 33. Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA

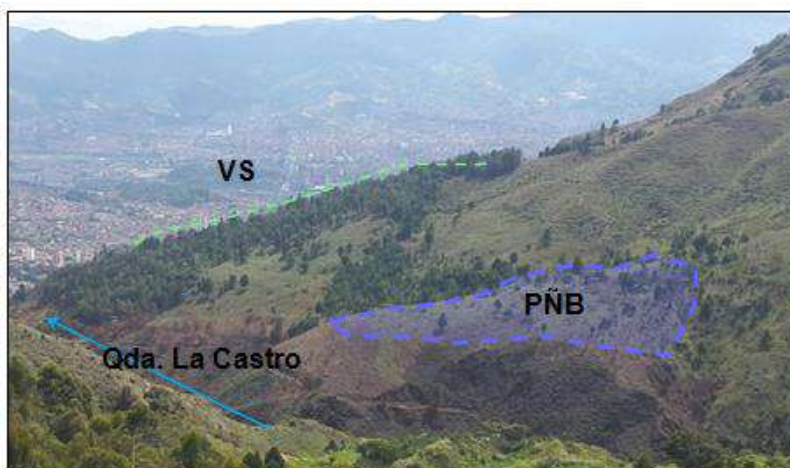


Figura 34. Unidad de Peldaño Bajo PÑB, y Vertiente Suave VS

5.2.5 Unidad Peldaño Tectónico PÑT

Se encuentran en la parte media y alta de la UMI. Corresponden a expresiones geomorfológicas denominadas “Sillitas o Sillas de Montar” halladas entre las cotas 2190-2230 msnm. Como el nombre lo indica, son geoformas que se caracterizan por presentar dos extremos elevados en cuya mitad se ubica una depresión (como una silla para montar a caballo), este tipo de depresiones son generadas por la presencia de planos de debilidad donde se produce con mayor facilidad la meteorización de una unidad geológica debido a la presencia de estructuras geológicas como lineamientos y fallas. El relieve que moldea este tipo de geoformas limitadas y asociadas a estructuras geológicas es denominado “Escalonado” (Superficies suaves o peldaños limitados por escarpes y/o

estructuras geológicas como lineamientos o fallas) como se observa en la Figura 35. Litológicamente se desarrollan sobre el horizonte IC de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño.

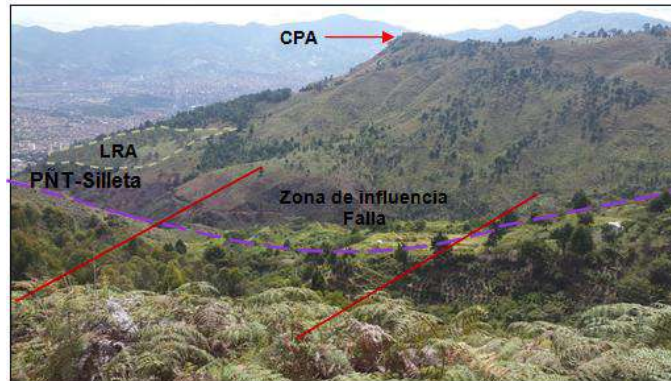


Figura 35. Unidad de Peldaño Tectónico PÑT y Lomeríos Amplios LRA

5.2.6 Unidad Lomeríos Amplios LRA

Se encuentran localizados en al oeste de la parte baja de la UMI. Esta unidad geomorfológica de lomos se caracteriza por presentar pendientes de moderadas a altas, con inclinaciones menores de 30°, topos amplios, ondulados y convexos, vertientes cortas con moderado grado de incisión. Litológicamente, se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín (Figura 35).

5.2.7 Unidad de Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF

Se encuentran dos lomos en la parte baja de la UMI, uno se ubica sobre la margen izquierda de la quebrada San Antonio, lugar donde se está construyendo la nueva línea del metro cable Alejandro Echavarría y el otro lomo se ubica entre las quebradas La Mica 1 y El Saperó 1.

Esta unidad se caracteriza por presentar topos suaves, continuos, con pendientes menores de 15°, vertientes cóncavas de moderadas a fuertes, la vertiente localizada sobre la margen izquierda de la quebrada San Antonio presenta vertientes rectas escarpadas con pendientes mayores de 30°. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño (Figura 36).



Figura 36. Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF, Metro Cable Alejandro Echavarría

5.2.8 Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF

Se localiza entre las quebradas La Castro 4 y Juan Alberto. Esta geoforma se encuentra limitada en la parte superior por rasgos estructurales como lineamientos con dirección NW y la unidad de Peldaño Tectónico-PNT.

Esta unidad se caracteriza por presentar topes convexos sobre la cual se tienen dispuestos superficies antrópicas, vertientes escarpadas irregulares con inclinaciones mayores de 30°. Litológicamente se desarrolla sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín como se observa en la Figura 37.

5.2.9 Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM

Se localiza sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro. Está limitada en la parte superior por la unidad de Vertientes Moderadas-VM y Escarpadas-VE y superficies suaves sobre suelo residual (Figura 38).

Se caracteriza por presentar topes suaves con pendientes menores de 15°, laderas cortas e irregulares con pendientes moderadas. Presentan dirección preferencial hacia el eje fluvial de la quebrada La Mica y La Mica 1, el cual es E-W.

Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y en menor proporción sobre suelos residuales de las Dunitas de Medellín.

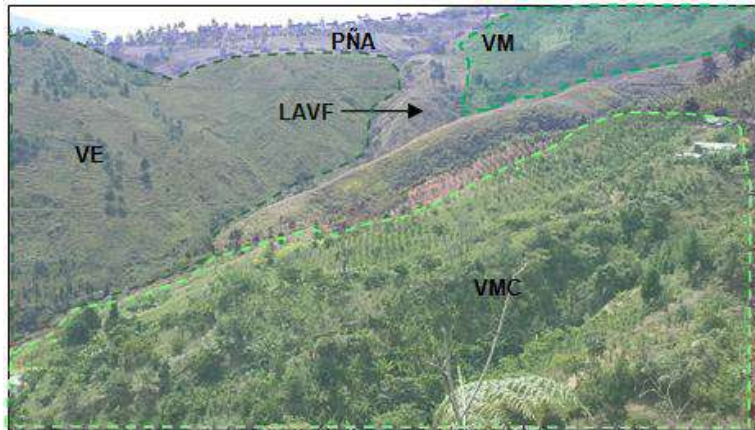


Figura 37. Unidad de Vertiente Escarpada VE, Peldaño Alto PÑA, Vertiente Escarpada VE, Vertiente Moderada VM y Vertiente Moderada Colinada

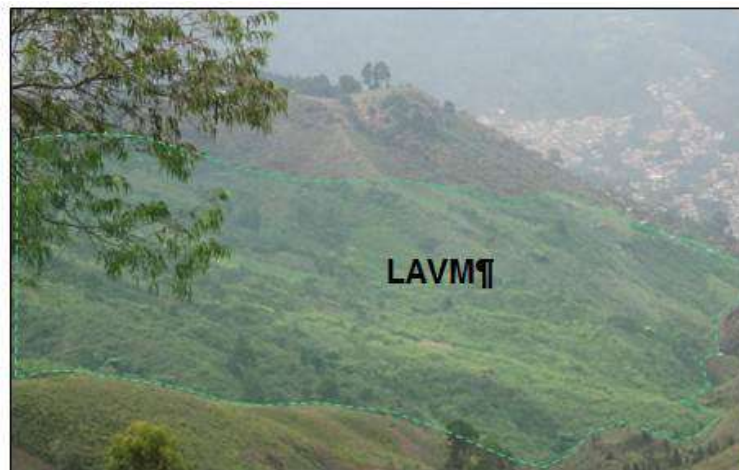


Figura 38. Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM, margen izquierda Quebrada La Castro

5.2.10 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF

Se encuentran localizados en la parte alta y media de la UMI. En la parte alta es drenada por los afluentes de la Quebrada La Castro como son Los Colorados, La Castro 6, La Caneca. En la parte media se restringe a la margen derecha de la Quebrada La Castro. Al oeste de la zona baja de la UMI se presenta un lomo que está limitado por la Quebrada San Antonio. Presenta topos agudos, estrechos, con pendientes entre 15° y 30°, vertientes cóncavas escarpadas, con pendientes mayores de 30°, como se ilustra en la Figura 39. Esta unidad se desarrolla litológicamente, sobre suelo residual de Las Dunitas de Medellín y de Las Anfibolitas de Medellín.



Figura 39. Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF, Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS y Depósitos Sin Incisión DSI

5.2.11 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS

Se localiza en la parte media de la UMI limitada por la Quebrada La Castro 5, entre la unidad de Lomos de Gancho y Lomos Amplios con Vertientes Moderadas. Esta unidad presenta topes suaves continuos con inclinaciones entre 5° y 15°, vertientes suaves con pendientes menores de 15° como se ilustra en la Figura 39. Esta geoforma tiene una tendencia NE a EW. Litológicamente se desarrolla sobre materiales residuales de las Dunitas de Medellín.

5.2.12 Unidad de Lomo de Gancho LG

Esta unidad geomorfológica se localiza sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro, entre la vereda Mazo y la Vereda Media Luna. Son tres geoformas muy particulares, limitadas cada una por las Quebradas La Caneca-La Castro 5, Los Moros-Cañada del Cura y la Castro 2. Estos lomos presentan dirección preferencial en sentido EW a NE (deflexión), tienen topes agudos, laderas cortas onduladas de aspecto colinado y con pendientes moderadas, presentan terminaciones en forma de facetas triangulares (Figura 40) en las laderas. Las facetas triangulares constituyen geometrías asociadas a rasgos morfotectónicos como fallas (bloque que sube y otro que baja) y/o lineamientos generados por procesos tectónicos, en el cual se tiene una vertiente escarpada de falla que posteriormente es moldeado por agentes erosivos como el agua que finalmente le da la forma triangular. Se desarrollan sobre el Horizonte IC de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño.

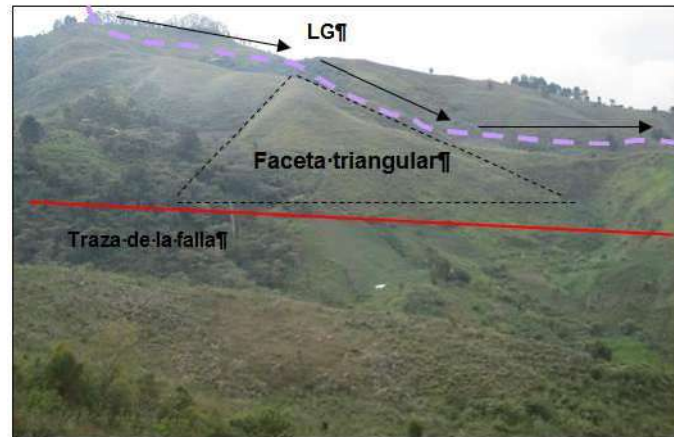


Figura 40. Unidad de Lomo Morfotectónico LMT

5.2.13 Unidad de Lomo de Obturación LO

Se localizan en todo el cauce y en ambas márgenes de la Quebrada La Castro. Este tipo de geoformas son generadas por fallas transcurrentes o de rumbo en donde el desplazamiento horizontal crea barreras desplazando las puntas de los lomos y cambiando además el curso de los drenajes de la zona. Estas geoformas presentan orientación preferencial en sentido NE, presentan topos agudos, vertientes cortas escarpadas con pendientes mayores de 30°. Litológicamente se desarrollan sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, en el cual se encuentran bloques en superficies que pueden ser susceptibles a la generación de caídas de bloques, favorecidos por agentes erosivos como el agua como se observa en la Figura 41.

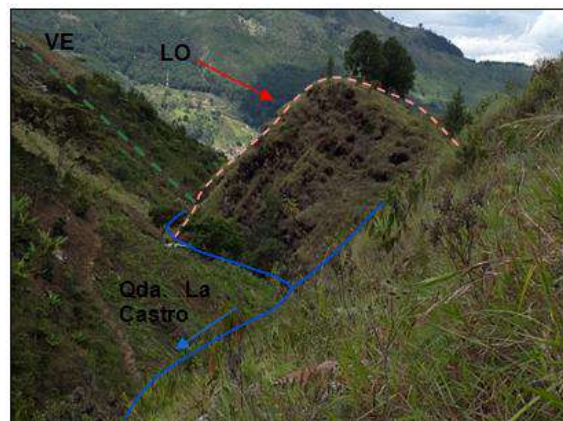


Figura 41. Lomo de Obturación LO y Vertiente Escarpada VE

5.2.14 Unidad de Escarpe Corto Semicircular ECSC

Esta unidad se encuentra distribuida en toda la UMI, limitada por unidades de Lomos y Superficies Modeladas en Depósitos. Son geoformas que se caracterizan por ser escarpadas con pendientes mayores de 30° y formas semicirculares de aproximadamente 50 m de largo por 20 m de ancho, las cuales son asociadas a cicatrices de deslizamiento (Figura 42). Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín y los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño.

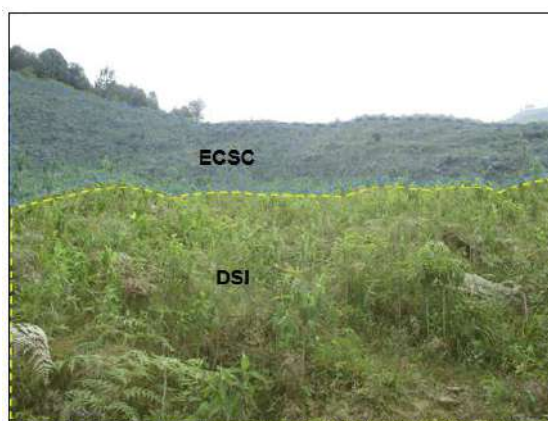


Figura 42. Unidad de Escarpe Corto Semicircular ECSC y Depósitos de Sin Incisión DSI

5.2.15 Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC

Se localiza en el límite oeste con la UMI de San Antonio. Se encuentra limitada por unidades de Lomos y vertientes. Son geoformas que se caracterizan por ser escarpadas con pendientes mayores de 30° y formas semicirculares de gran extensión. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue cartografiada en la UMI de San Antonio, para la UMI de Esfuerzos de Paz-Villa Turbay sólo corresponde una fracción menor, por lo cual no se muestra una fotografía representativa de la misma.

5.2.16 Unidad de Superficie Antrópica SA

Corresponden a superficies explanadas con formas variables modificadas antrópicamente y pendientes suaves entre 0°-5° de inclinación. Una de ellas conforma parte del parque las Tinajas del Jardín Circunvalar (Figura 44).

5.2.17 Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI

Localizadas en la parte baja donde se encuentra el cauce de la Quebrada La Castro y en la parte media de la UMI, limitados en la parte superior por unidades de Escarpes y Lomos. Esta geoforma presenta forma ovalada, topes suaves con pendientes menores de 15°. Son el resultado de procesos de inestabilidad como movimientos en masa

generados en la unidad geomorfológica de escarpes y además por el transporte generado por la Quebrada La Castro, desde el nacimiento en el altiplano hasta la parte baja de UMI (Figura 43). Litológicamente, se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros y aluviotorrenciales.



Figura 43. Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI

5.2.18 Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados

Localizada sobre ambas márgenes de la quebrada La San Antonio. Esta geoforma presenta forma ovalada, topes suaves con pendientes menores de 15° y laderas cortas moderadamente incisadas. Son el resultado de procesos de inestabilidad generados en la unidad geomorfológica de escarpes. Litológicamente se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros.

5.2.19 Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI

Localizada en los límites con la UMI de San Antonio (extremo occidental). Presenta topes suaves con pendientes menores de 5°, las laderas son cortas con pendientes moderadas menores de 15° de inclinación y bajo grado de incisión. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín (Figura 44).



Figura 44. Unidad de Superficie Antrópica SA, Superficies con Baja Incisión SBI y Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF

5.2.20 Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI

Esta geoforma se localiza en diferentes partes de la zona de estudio. Corresponden a zonas con pendientes suaves menores de 15° sin incisión, presentan formas variadas desde alargadas hasta ovaladas. Son producto del desprendimiento de materiales provenientes de las vertientes y se desarrollan sobre flujos de lodos y/o escombros (Figura 45).



Figura 45. Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI

5.2.21 Unidad de Vertiente Escarpada VE

Localizada en la parte media de la UMI sobre ambas márgenes de la Quebrada La Castro. Se encuentra limitada por la unidad de peldaños y lomos de obturación. Son vertientes con superficies rugosas onduladas poco continuas con pendientes entre 30°-50°. Sobre esta unidad se tienen bloques en superficie de dunita los cuales pueden ser

removilizadas por agentes erosivos como el agua. Esta geoforma, en la parte baja-media de la Quebrada La Castro presenta paredes escarpadas con inclinaciones entre 50°-60°, sobre paredes rocosas de poca continuidad (pared rocosa de Dunita con menos de 3.0 m de longitud sobre la unidad de Vertiente Escarpada-VE). Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre el horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 46).



Figura 46. Unidad de Vertiente Escarpada VE

5.2.22 Unidad de Vertiente Moderada VM

Localizada en la parte alta de la UMI, en la margen derecha de la Quebrada La Castro y en la parte baja de UMI en el margen izquierda. Se encuentra limitada por la unidad de peldaños y lomos como se ilustra en la Figura 47. Son pendientes moderadas con inclinaciones entre 15° y 30° irregulares y continuas. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

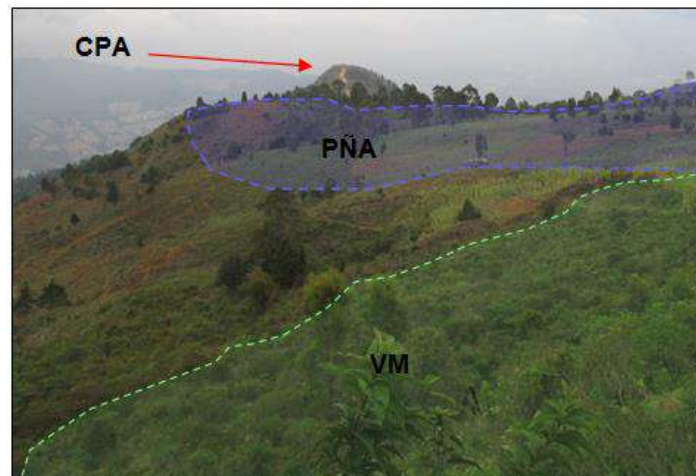


Figura 47. Unidad de Vertiente Moderada VM, Peldaño Alto PÑA y al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA

5.2.23 Unidad de Vertiente Suave VS

Localizada en oeste de la parte media de la UMI, en las inmediaciones. Se caracteriza por tener pendientes suaves, rectas, continuas, como se ilustra en la Figura 48. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.



Figura 48. Unidad de Vertiente Suave

5.2.24 Unidad de dolinas

Las dolinas son depresiones cóncavas formadas por varios procesos tales como colapso de cavernas, piping, subsidencia, disolución y por controles estructurales en la unidad litológica (Figura 49), aunque todos estos procesos en conjunto también dan origen a una dolina (poligenética) (Huggett, 2007).

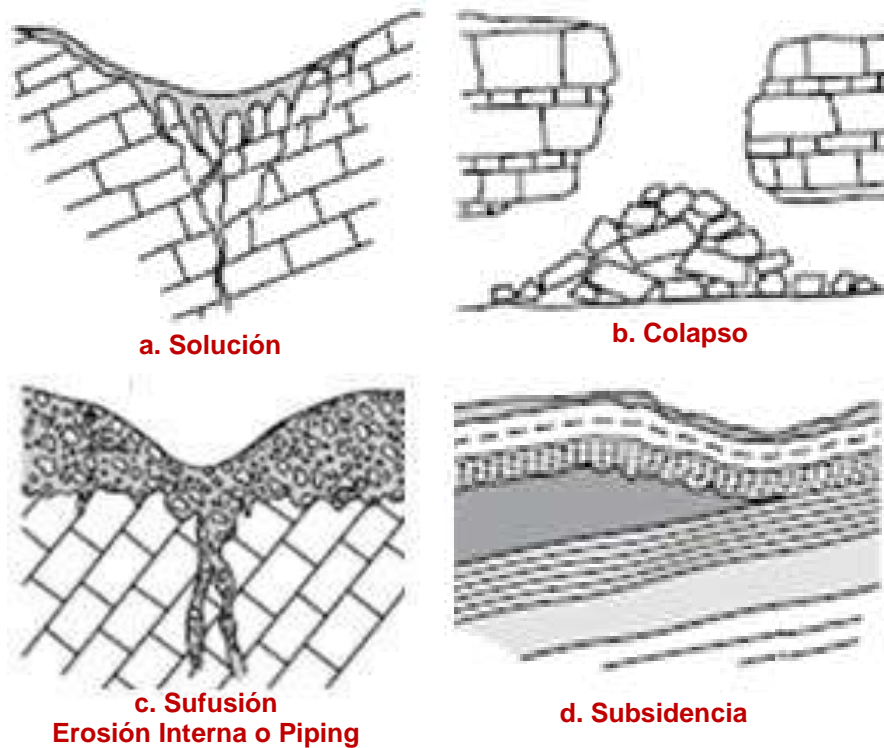


Figura 49. Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007)

En el Valle de Aburrá han sido reportados pseudokarst, los cuales han sido denominados así ya que la roca que moldea el paisaje no es sedimentaria química, sino cristalina (ígneas y/o metamórficas). Dado lo anterior, los procesos que controlan la formación de las geoformas pseudokársticas en nuestro entorno son debidos a movimientos tectónicos, los cuales generan fisuras que favorecen procesos de erosión interna tales como sufusión-piping.

Para el caso de la zona de estudio, las dolinas reportadas están asociadas a pseudokarst en las Dunitas de Medellín, donde se pueden disolver algunos minerales. Asimismo, las estructuras geológicas evidenciadas en el grado de fracturación (zonas de cizalla y brechas) de la roca ocasionan colapso, favoreciendo así la formación de este tipo de geoformas. Esto ocurre debido a que en el Horizonte IIA de meteorización quedan bloques expuestos en suelo que puede ser lavado por la escorrentía, generándose también colapso en la superficie del terreno.

Las opciones a, b y c de la Figura 49 son los procesos de formación que se asocian a las dolinas reportadas en la UMI en estudio. Esto se debe al fuerte control estructural, evidenciado en lineamientos, geoformas de origen estructural tales como peldaños, peldaños tectónicos, patrones de meteorización particulares en la unidad geológica (bloques rocosos en abundante matriz) y estructuras de disolución en la roca como

canales en forma de tubos (Figura 50). Estos factores ponen en evidencia la conjugación de procesos que dan origen al paisaje pseudokarstico en las Dunitas de Medellín.

En la UMI de Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, esta geoforma presenta formas variables las cuales van desde circulares a elipsoidales, asociadas a procesos kársticos. Fueron identificadas a través del análisis multitemporal, principalmente.



Figura 50. Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales (Parte alta de la UMI El Faro - Golondrinas)



Figura 51. Unidad de Dolina parte alta de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay

5.2.25 Unidad de Karren o Lapiaz

Los Karren son unidades geomorfológicas de origen kárstico, caracterizadas por presentar formas alargadas como acanaladuras generadas por procesos de disolución y/o erosión. Como se mencionó en la unidad de dolinas, estas geoformas para la zona de estudio son de origen pseudokárstico debido a que el principal mecanismo de formación

es la erosión, meteorización y el fuerte control estructural presente en el sitio. En la zona de estudio se encontraron estas geoformas sobre el Horizonte IB de las Dunitas de Medellín, presentan cerca de 10 m de longitud, 50 cm de ancho y 70 cm de profundidad, son de gran continuidad y siguen planos de discontinuidad heredadas de la roca parental como se ilustra en la Figura 52 y Figura 53.





Figura 52. Geoforma pseudokárstica Karren sobre las Dunitas de Medellín



Figura 53. Unidad de Karren exhibiendo planos de discontinuidad

5.3 MORFODINÁMICA REGIONAL

Debido a las condiciones geomorfológicas y a la ocupación del territorio, los eventos más recurrentes con afectaciones considerables sobre la comunidad, son aquellos generados por las inundaciones y los movimientos en masa, respectivamente. La manifestación u ocurrencia de estos fenómenos coincide con la distribución anual bimodal de las lluvias medidas en la región metropolitana, donde la mayor manifestación de movimientos en masa e inundaciones se presentan en dos picos del año que coinciden con los meses de mayo y octubre. Lo anterior se evidencia en la relación de las condiciones

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

hidrometeorológicas, como factor detonante de los fenómenos naturales que ocurren en el Valle de Aburrá (Aristizábal & Gómez, 2007).

Aunque las inundaciones son los eventos de mayor recurrencia, los movimientos en masa son los que generan mayor afectación, especialmente en pérdida de vidas humanas. Adicionalmente, aunque las avenidas torrenciales no presentan una alta recurrencia, sus afectaciones en términos de pérdidas humanas es alta, con tendencia a aumentar en las últimas décadas, lo que, muy probablemente, refleja la ocupación de áreas susceptibles a la ocurrencia de este tipo de eventos, tales como zonas correspondientes a los retiros por normativa y las zonas inundables de las quebradas. (Aristizábal & Gómez, 2007).

En un contexto general, en el Valle de Aburrá, sólo 253 eventos reportan al menos una víctima mortal, lo que significa que el 99,96% de los eventos presenta afectaciones considerables sin víctimas mortales. Tomando la división de la CEPAL en el Valle de Aburrá, los desastres pequeños con víctimas entre 0 y 10 muertos, corresponde a 6.739 registros, lo que representa casi la totalidad de los eventos. Con respecto a los desastres medianos, se registraron nueve eventos, y tan sólo dos fueron catalogados como desastres grandes, con más de 100 muertos, los cuales corresponden a los movimientos en masa desencadenados en Santa Elena el 12 de julio de 1954, y el de Villatina ocurrido el 27 de septiembre de 1987 (Aristizábal & Gómez, 2007), ambos ocurridos en la Comuna 8 de Medellín donde se concentra este estudio en particular. Las inundaciones y avenidas torrenciales han sido fenómenos naturales frecuentes, asociados al origen y evolución del Valle de Aburrá. Sin embargo, las afectaciones producto de éstos han aumentado considerablemente en las últimas décadas, debido a la creciente ocupación de terrenos en condiciones de amenaza.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una búsqueda e inventario de los principales fenómenos naturales que se relacionen con inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales manifestados específicamente en los sectores de la Comuna 8 y la Comuna 3 de Medellín, cerca de los Barrios Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz, Villa Turbay, Golondrinas, El Faro y La Cruz. En dicha búsqueda se utilizaron fuentes tanto públicas como privadas con el fin de recolectar la mayor cantidad de información. Las mayores fuentes públicas consultadas fueron el Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA), Sistema Municipal para la Atención de Desastres (SIMPAD) cuyo nombre actualmente es Departamento Administrativo de Gestión el Riesgo de Desastres (DAGR) y Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Gran parte de la información de estas entidades se encuentra consignada en la base de datos DesInventar. Esta base de datos permite evaluar la recurrencia y temporalidad de fenómenos que afectan considerablemente la comunidad. El Módulo DesInventar, adicionalmente, permite ser alimentado mediante datos en campo predefinidos (información espaciotemporal, tipos de eventos y causas, y fuentes), efectos directos e indirectos (sobre la vida, las viviendas, la infraestructura, los sectores económicos).

El AMVA cuenta con una base de datos actualizada en el DesInventar. Ésta integra las bases de datos elaboradas por la Universidad EAFIT, lo que antiguamente era el SIMPAD

y ahora se conoce como el DAGRD. Además, trabaja en un proceso diario de actualización de datos, que incluye los registros de eventos publicados en los periódicos locales y nacionales, los reportes de los Comités Locales de Emergencia y de la comunidad.

A través de la base de datos DesInventar, se logró consultar que cerca de la zona de estudio se tienen unos 322 registros de eventos que involucran movimientos en masa, avenidas torrenciales, inundaciones y caídas de roca desde 1981 hasta 2006. Estos eventos se reportaron en 12 barrios de la Comuna 8 y la Comuna 3, entre los cuales se encuentran los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de los diferentes eventos que ocurren en cada uno de los 12 barrios que se encuentran cerca de los polígonos. Por su parte, la Figura 54 y la Figura 55 presentan un análisis de frecuencia de ocurrencia de los principales fenómenos y cuáles son los barrios más afectados por los mismos.

Tabla 2. Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles

	EL PINAL	LA CRUZ	LA LADERA	LA LIBERTAD	LA SIERRA	LLANADITAS	LOS MANGOS	SAN ANTONIO	TRECE DE NOVIEMBRE	VILLA LILIAM	VILLA TINA	VILLA TURBAY
Avenidas Torrenciales	2.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	1.0
Caidas de Rocas	2.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	1.0
Inundaciones	7.0	1.0	2.0	14.0	0.0	2.0	3.0	2.0	2.0	11.0	16.0	3.0
Deslizamientos	12.0	24.0	1.0	20.0	9.0	24.0	3.0	6.0	7.0	45.0	62.0	16.0
TOTAL	23.0	27.0	3.0	35.0	10.0	27.0	6.0	8.0	9.0	57.0	89.0	21.0
	7.1%	8.4%	0.9%	10.9%	3.1%	8.4%	1.9%	2.5%	2.8%	17.7%	27.6%	6.5%

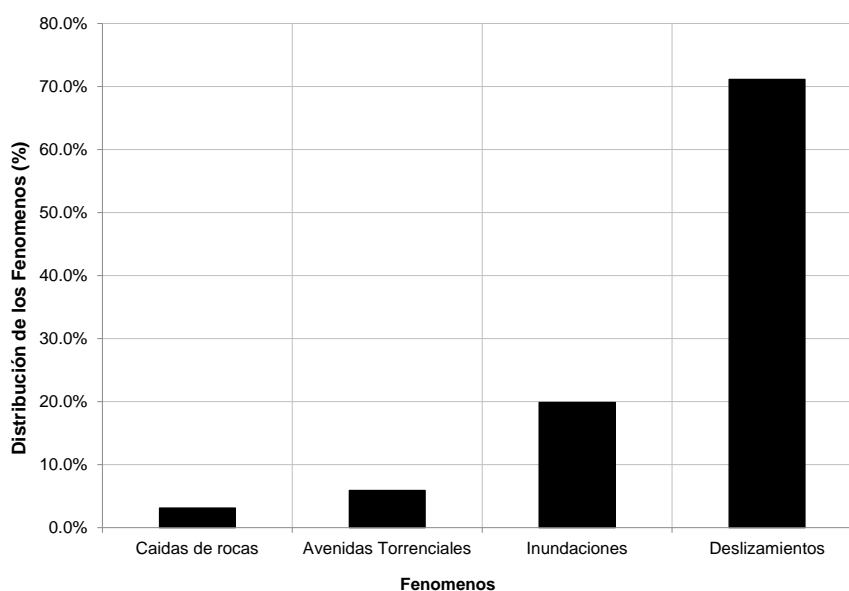


Figura 54. Distribución de los fenómenos

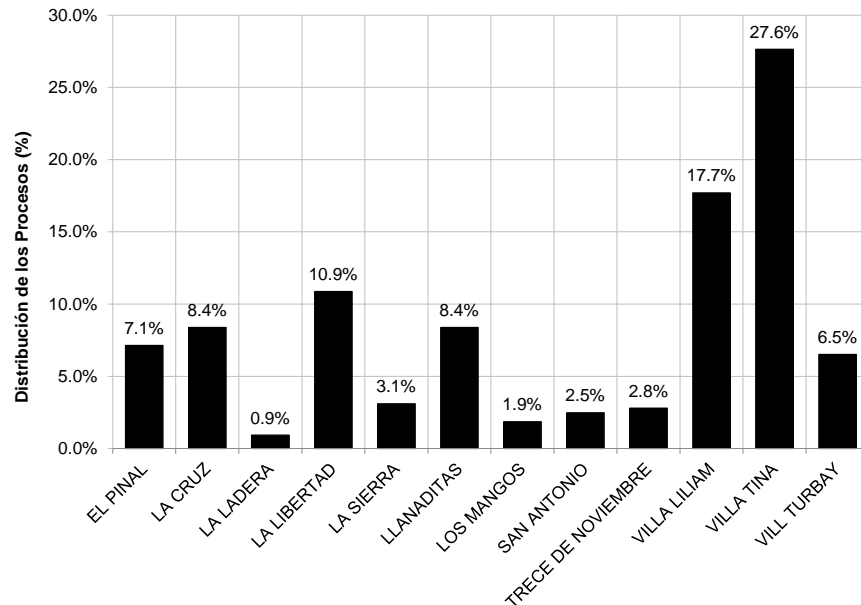


Figura 55. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos

Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes (Figura 54) en la zona de estudio (Figura 55), seguidos de los fenómenos de inundación tal como lo describió Aristizábal & Gómez (2007). Estos fenómenos representan el 70% y el 20% respectivamente, de los registros encontrados en la base de datos de DesInventar. Por otra parte, la Figura 55 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villatina, Villa Liliam y La Libertad. Respecto a los barrios de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles, el barrio más afectado es La Cruz, seguido de Llanaditas donde se localizan los Barrios Golondrinas y El Faro y finalmente el Barrio Villa Turbay.

En la Tabla 3 se presenta el registro de algunos de los fenómenos y eventos más importantes ocurridos alrededor de la zona de estudio.

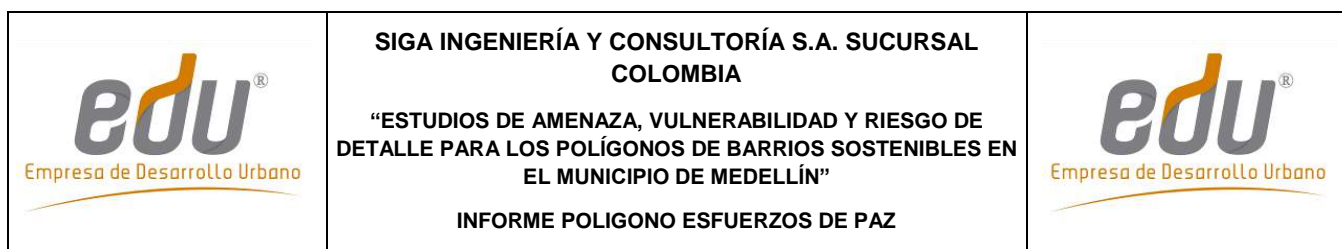


Tabla 3. Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio

Localización	Fecha	Movimiento en Masa
Media Luna	12 de julio de 1954	Flujo de lodos
Villatina	27 de septiembre de 1987	Deslizamiento flujo de lodos compuesto
San Antonio	20 de octubre de 1980	Flujo de escombros
La Cruz	28 de Mayo de 2007	Deslizamiento de tierra compuesto
Villatina - San Antonio	31 de mayo de 2008	Deslizamiento por redes antrópicas
La Cruz	entre 10 de octubre y 5 de diciembre 2011	3 deslizamientos de tierra
La Libertad	octubre de 2010	Deslizamiento
Santa Ines		Reptaciones y movimientos lentos
Enciso - Los Mangos	6 de junio de 2011	Deslizamiento por redes de servicios públicos
Villa Turbay - Las Mirlas	Abril de 2011	Deslizamientos flujo de lodos
Villa Turbay - Colegio Diana Turbay	Marzo de 2011	Deslizamientos traslacionales
La Sierra	8 de diciembre de 2014	Flujo de escombros, posible ingenerencia de redes de servicios públicos

Dentro del registro presentado se destaca el movimiento en masa de Santa Elena (Media Luna), ocurrido el 12 de julio de 1954. Este movimiento dejó un saldo de más de 100 personas muertas, de las cuales sólo se recuperaron 77 cadáveres y se registró un número de desaparecidos que se considera sobrepasa los 70.

También se destaca el movimiento en masa de Villatina, el 27 de septiembre de 1987 (Figura 56). Aunque no se logró determinar con el número exacto de víctimas, se calcula que fueron unas 500 personas, habiéndose rescatado aproximadamente 200 cuerpos, por lo que el sitio se declaró “campo santo”.



**Figura 56. Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987
(Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987)**

Otro movimiento en masa de resaltar es el del Barrio La Sierra, el 8 de diciembre de 2014. Este proceso obligó la evacuación de 15 familias y dejó incomunicadas a más de 4 mil personas del Barrio La Sierra con el centro de la ciudad. En su momento, la Alcaldía de Medellín decretó la urgencia manifiesta.

Finalmente, se destacan varios deslizamientos detonados por lluvias en el sector de Villa Turbay durante el primer fin de semana del mes de abril de 2014, los cuales provocaron el colapso de cuatro viviendas y el fallecimiento de cuatro personas.

5.4 MORFODINÁMICA LOCAL

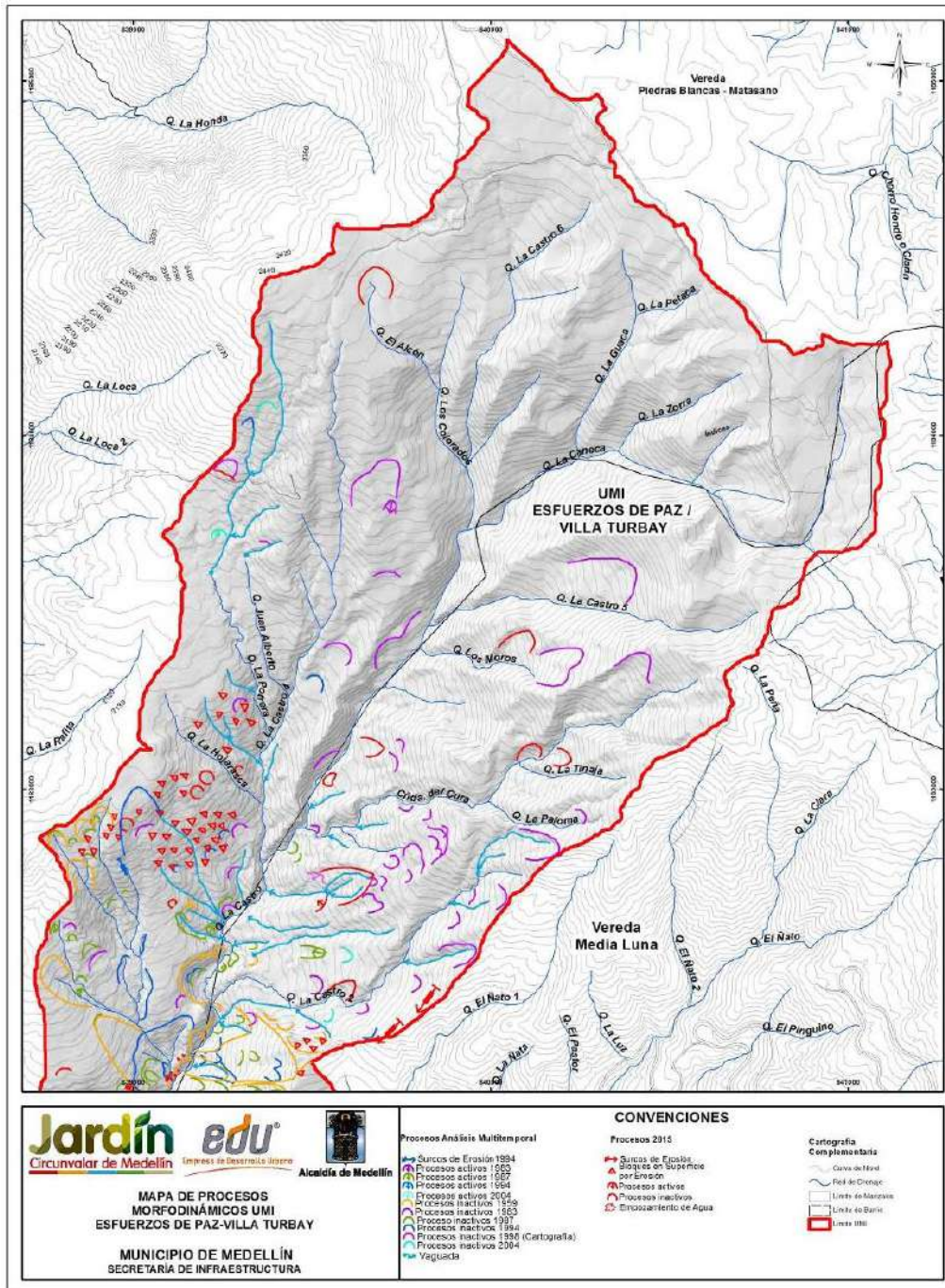
Como parte del análisis morfodinámico de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, se llevó a cabo el análisis multitemporal con la fotointerpretación de las 110 fotografías aéreas recopiladas, correspondientes a 15 líneas de vuelo para el período comprendido entre 1976 y 2004 y con escalas variables entre 1:3.200 y 1:21.700. Estas fotografías aéreas fueron clasificadas por año, línea de vuelo y número de fotos como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

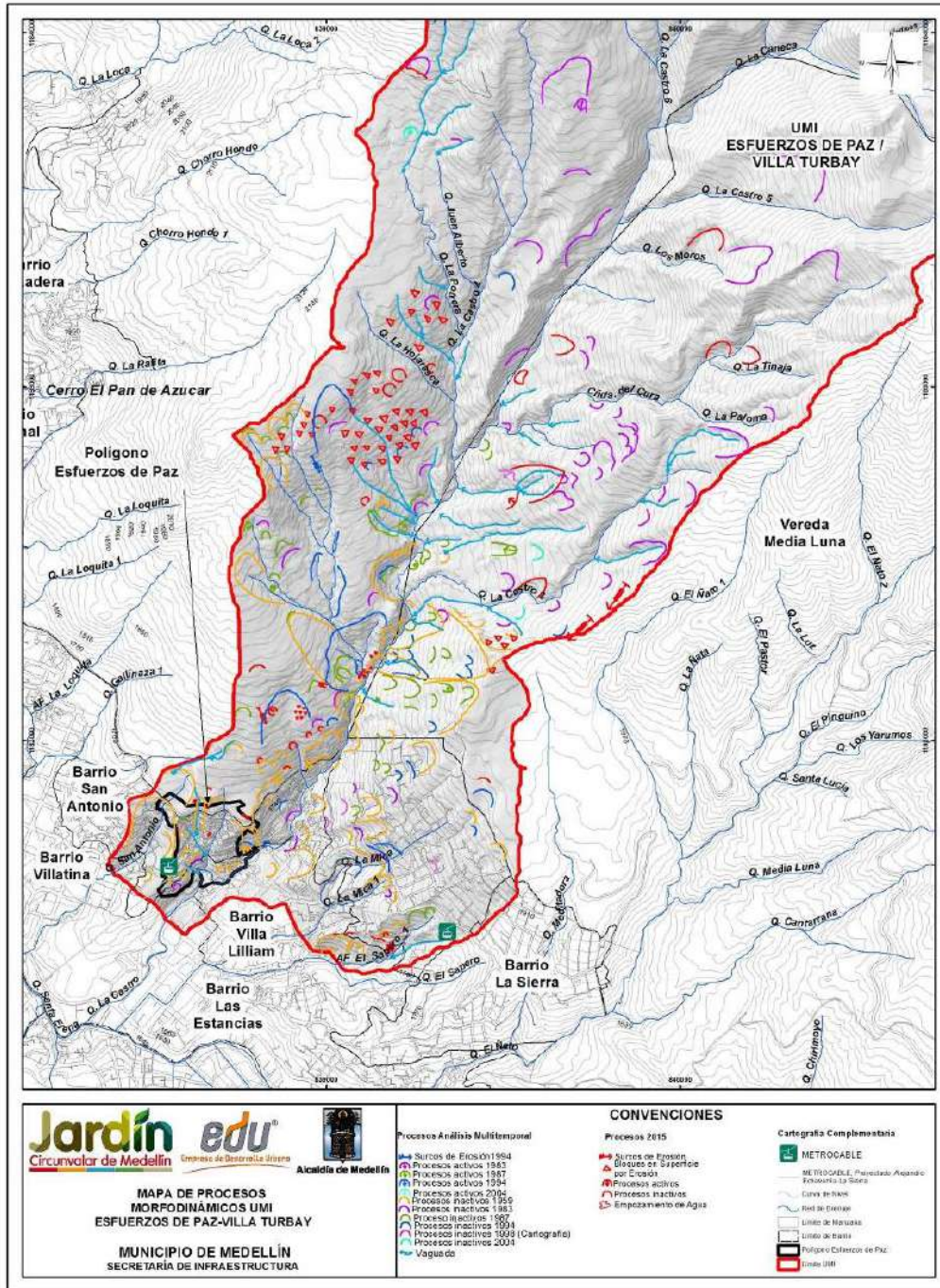
AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1959	C-889	4 y 5	057-058 062-064	Sin escala
1981-1983	R-898	1	261-271	1 : 5.160

AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1981-1983	R-896	7	091-093	1 : 5.300
1987	Geovial-18	22	252-257	1 : 5.300
1987	Geovial-18	23	263-268	1: 4.700
1994	Geovial 65/3	33	98-109	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	34	130-141	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	35	149-153	1:5.000
1998	FAL-403	12	114-119	1 : 21.700
1998	FAL-402	2	106-113	1 : 10.700
1998	FAL-401	03-3	144-151	1 : 11.300

Se presentan los procesos morfodinámicos de esta UMI en el Mapa 13 y en el Mapa 14. Los cuales fueron identificados en las fotografías aéreas mencionadas anteriormente, análisis cartográficos y la identificación en campo, los cuales fueron clasificados por año como se muestra en la Tabla 5. Cabe resaltar que se encontraron procesos morfodinámicos persistentes en varios años, por lo que en el plano aparece para el año más antiguo, es decir el primer proceso reportado en las fotografías aéreas.



Mapa 13. Procesos morfodinámicos UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay (11_EDPPprocesosMorfodinamicos_Medellin_C y 11_EDPPprocesosMorfodinamicos_Medellin_T)



Mapa 14. Procesos morfolodinámicos UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay (Continuación)
 (11A_EDPPprocesosMorfodinamicos_Medellin_C y 11A_EDPPprocesosMorfodinamicos_Medellin_T)

Tabla 5. Colores definidos para los procesos según año

Año de Visualización	Color en el Plano
1959	Naranja
1983	Magenta
1987	Verde
1994	Azul
1998	Rosado
2015	Rojo

Los procesos morfodinámicos identificados consisten en deslizamientos y caída de rocas, cárcavas, surcos, zonas de empozamiento de agua y bloques en superficie por erosión. Aunque la mayoría de los procesos son inactivos, se presentan procesos activos en los años 1983 y en la actualidad, 2015.

Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas. En la zona de estudio del proyecto barrios sostenibles, se encuentra que los deslizamientos se concentran a lo largo de toda la UMI excepto en las cercanías de la unidad de Altiplanos y Peldaños cuya morfología se caracteriza por ser plana. Los deslizamientos reportados son planares y rotacionales, principalmente inactivos, tienen coronas con anchos entre 5 m y 200 m y escarpes de hasta de 10 m sobre los horizontes de meteorización de las Anfibolitas de Medellín, Dunitas de Medellín y los cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño.



Figura 57. Proceso inactivo sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro

Los deslizamientos activos se presentan sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín y los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (Figura 58). En general dan lugar a escarpes no mayores de 2 m de altura, no obstante pueden tener hasta 15 m de ancho y 5 m de largo. En ocasiones pueden incluso presentar depósitos asociados.



Figura 58. Deslizamientos activos sobre brecha de Dunitas en Polígono Esfuerzos de Paz SFJ06-EP

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en la unidad geomorfológica denominada como Vertiente Escarpada VE y Vertiente Moderada VM, las cuales se encuentran hacia la parte media de la UMI sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro, generándose sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

Este fenómeno se da principalmente por el desprendimiento de bloques de roca desde escarpes o frentes de roca, asociado al fuerte grado de fracturamiento de la unidad rocosa y a la presencia de estructuras geológicas como diaclasas, zonas de cizalla y foliación (Figura 59).

El proceso inicia con la erosión o lavado del suelo residual del Horizonte IIA, haciendo que los bloques de roca queden expuestos y susceptibles a moverse. Otro factor que incrementa este fenómeno es la meteorización química que moldea los bloques de roca, generando acanaladuras en ellos, haciendo que aumente el fraccionamiento de los bloques favoreciendo así el desprendimiento de los mismos (Figura 60).

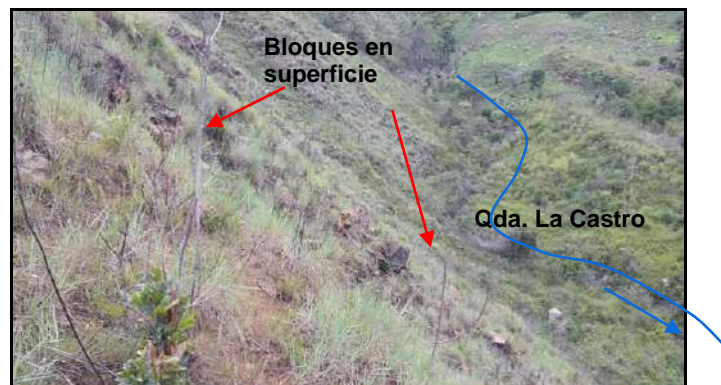


Figura 59. Bloques en superficie sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro



Figura 60. Escarpes de roca con alto grado de fracturamiento

Los surcos, las cárcavas y los bloques en superficie son producto de procesos erosivos superficiales, tanto eólicos como fluviales. Se encuentran surcos sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro en las cercanías del centro de rehabilitación Hogares Claret, desarrollados sobre suelo saprolítico de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño con aproximadamente 30 cm de ancho, 50 cm de profundidad y cuya longitud es variable, pudiendo alcanzar 10 m (Figura 61A). Además, se tienen zonas húmedas como se ilustra en la Figura 61B, que abarcan cerca de 2.0 m de longitud poco profundas.



Figura 61. A) Surcos sobre suelo saprolítico del granito. B) Zonas húmedas

Además de esto, la erosión genera formas columnares o de montículos en el suelo (Horizonte IB principalmente), con alturas entre 50 cm a 80 cm (Figura 62), generados sobre la unidad geomorfológica de Vertiente Suave-VS localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Castro en su parte media.



Figura 62. Erosión en montículos sobre el Horizonte IB de las Dunitas

En cuanto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, principalmente en las márgenes de la Quebrada San Antonio y de la Quebrada La Castro (incluidos sus afluentes). En menor proporción se encontraron procesos en las márgenes de las Quebradas La Mica y La Mica 1. Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas.

6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

6.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

En el valle de Aburrá, conforme a la geología de la Plancha 147, Medellín Oriental (Ingeominas, 2005) predominan tres direcciones de cizallamiento, que son N-S, N45°E y N45°W. Lo anterior es concordante con la dirección del Sistema de Fallas Romeral, reportado por varios autores, donde la dirección predominante es N-S (Consortio Microzonificación, 2006).

Al sur del valle de Aburrá se han reportado un gran número de fallas regionales y lineamientos con dos direcciones predominantes: NS a NNW al oeste del río Aburrá y una tendencia NW al este del mismo (Grosse, 1926, Case et al., 1971, González, 1980 y Toussaint y Restrepo, 1984) y (Restrepo, J., 2008). Se destacan trazas de las Fallas San Jerónimo, Minas y Santa Isabel. Al norte del valle existe otro sistema de fallas regionales con dirección NW, donde sobresalen las Fallas Don Matías y Rodas, además se tienen otras falla tales como La Aguadita hacia el sur y la falla La Castro, como se observa en la Figura 63. Del sistema de fallas con dirección NE, las principales trazas son La Chapa y Santa Elena (Consortio Microzonificación, 2006).

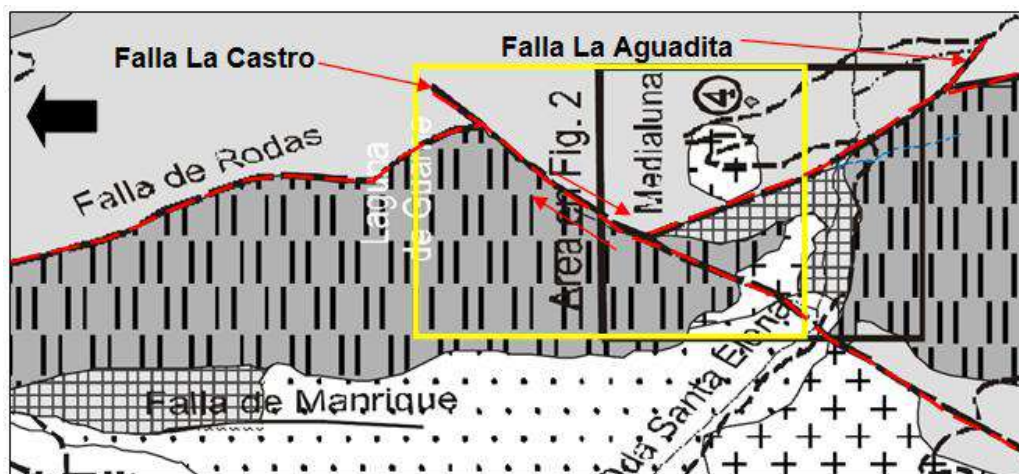


Figura 63. En amarillo la zona de estudio y las fallas presentes (Restrepo, J., 2008)

En la zona de estudio, el Consortio Microzonificación (2006) reporta estructuras geológicas para las Dunitas de Medellín, tales como diaclasas, cizallas y fallas, cuyos datos de rumbo/buzamiento fueron tomados en el municipio de Envigado y en el corregimiento de Santa Elena, tal y como se muestra en la Tabla 6.



 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

Tabla 6. Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006

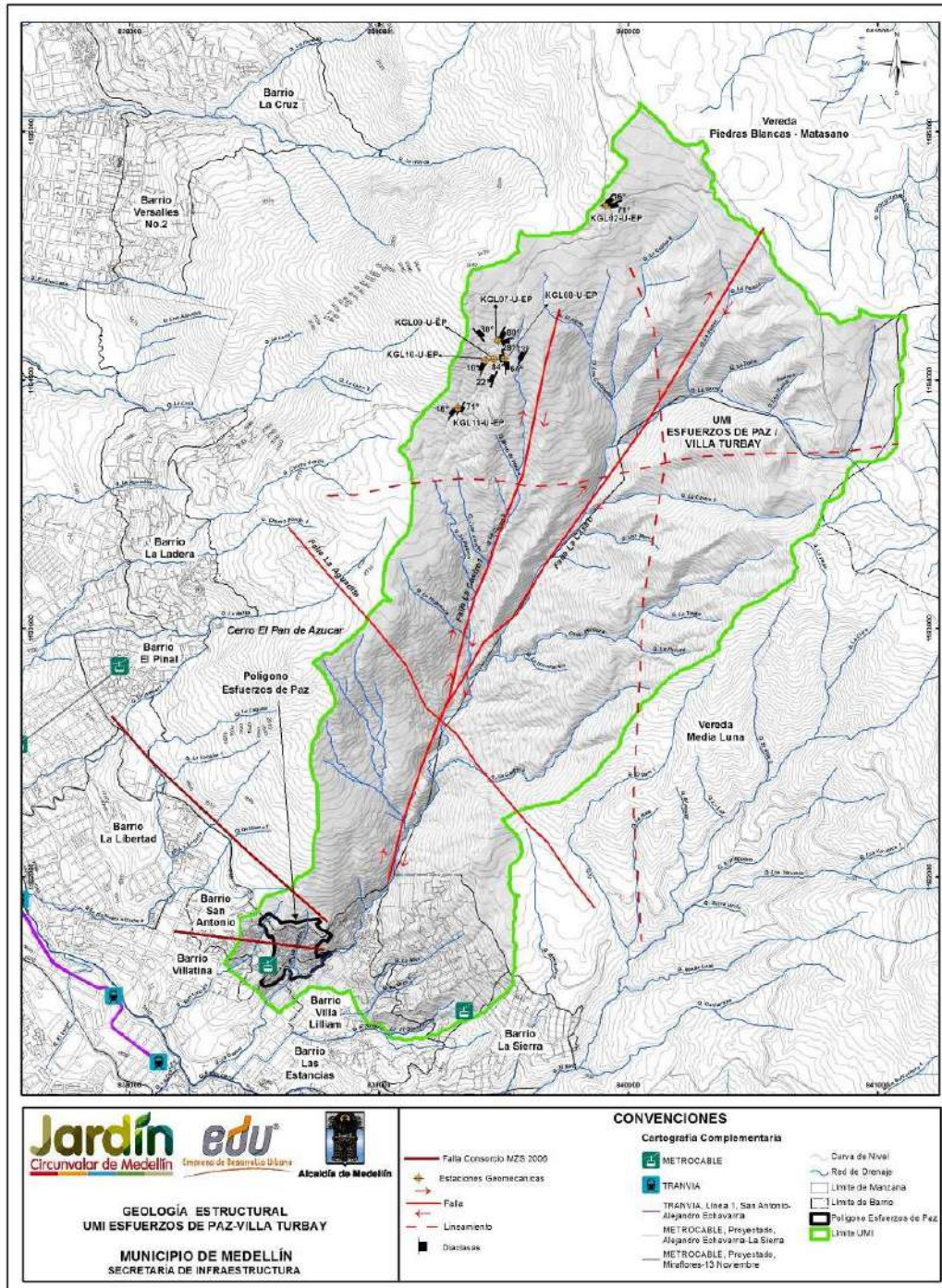
Localización	Tipo de estructura	Rumbo/buzamiento
Vía al Plan Envigado	Diaclasas	S20°W/V, N5°W/65°NE y N5°W/17°SW
	Cizalla	S35°W/55°W y S65°W/66°W
Vereda Pericos Envigado	Diaclasas	N50°E/45°E
	Cizalla	N10°E/65°W
Santa Elena	Falla Contacto Anfibolitas Dunitas	N80°W/45°S
Quebrada Rodas Autopista Medellín-Bogotá	Falla Normal Contacto Anfibolitas Dunitas	NS/45°NS-45°E

6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay se encontraron estructuras tales como fallas y lineamientos geológicos, discontinuidades y zonas de cizalla, los cuales se presentan en el Mapa 15.

A nivel local, se presentan estructuras propias del tipo de roca que fueron heredadas por los eventos de cizallamiento y deformaciones discontinuas. Estas se asocian a comportamientos frágiles de rotura, como fracturas aleatorias, diaclasas y fallas geológicas, asociadas a estructuras regionales o locales, producto de la dinámica del sector.

A través de los análisis geomorfológicos y fotogeológicos se encontraron tendencias NW-SE y NE, en donde la primera se relaciona con los principales lineamientos. Se observó además, una falla que corta el cuerpo de Dunitas sobre la margen izquierda de la Quebrada La Castro, localizada en cercanías del centro de rehabilitación Hogares Claret llamada Falla La Aguadita. Esta falla fue reportada por (Bernal y Jaramillo, 1985; Rendón, 1999; Giraldo y Sánchez, 2004 en Restrepo, J., 2008), presenta sentido preferencial N40°W/45° (Corantioquia, 2001 en Herrera, J., 2003) y corta la Falla de Rodas en las cercanías de la quebrada Santa Elena. Esta falla se cartografió en campo a partir de los cambios topográficos observados en Hogares Claret, en geformas denominadas como Peldaños.



Mapa 15. Estructuras encontradas en la UMI Esfuerzos de Paz
(12_EDPGeologiaEstructural_Medellin_C y 12_EDPGeologiaEstructural_Medellin_T)

Restrepo, J., 2008, afirma que el contacto entre las Dunitas de Medellín y las Anfibolitas de Medellín en el sector de la quebrada Santa Elena se encuentra marcado por esta falla y que a pesar de que en campo ha sido complejo encontrar evidencias de la misma, un cambio abrupto entre una unidad y otra está marcado por una falla (Figura 64).

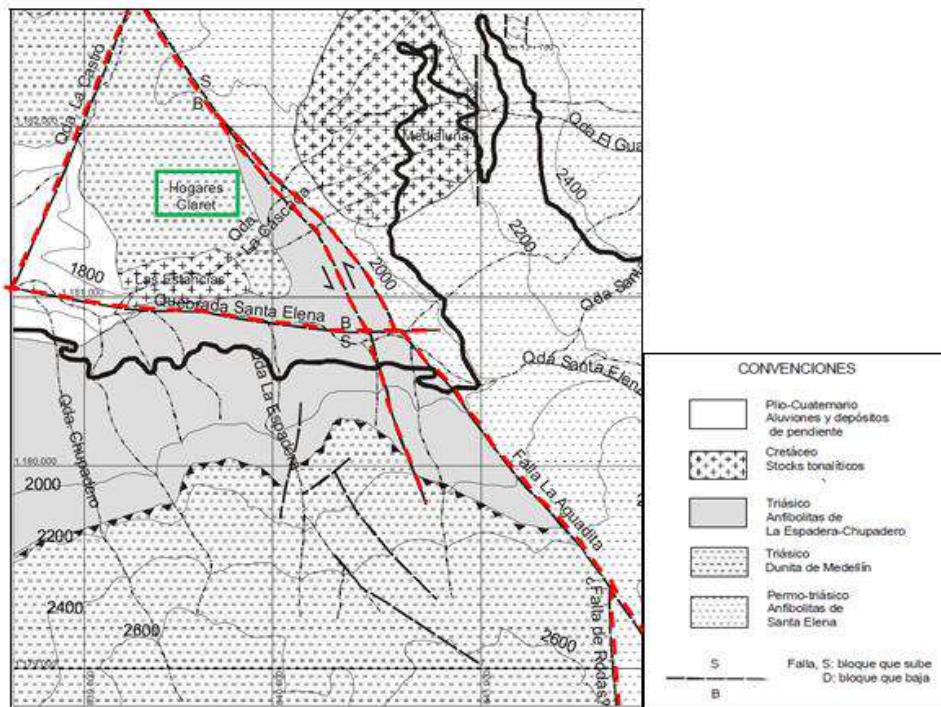


Figura 64. Falla La Agudita y Falla La Castro (Restrepo, J., 2008)

La segunda tendencia corresponde a las fallas La Castro y La Castro 1, las cuales fueron observadas sobre la quebrada que lleva su nombre. La Castro 1 corresponde a un ramal de la falla La Castro, cuya zona de influencia se encuentra sobre la Quebrada La Castro 4 (afluente de Quebrada La Castro), en el cual se observa material de las Dunitas y Anfibolitas en brechas de falla.

En general, se observaron geformas estructurales tales como lomos de obturación, descansos topográficos (peldaños) y material altamente fracturado en las inmediaciones de la Quebrada La Castro, la cual pone en contacto un pequeño cuerpo de las Anfibolitas de Medellín con las Dunitas de Medellín.

Cabe resaltar la posible relación de estas fallas geológicas con las evidencias de zonas de cizalla encontradas en las perforaciones, lo cual lleva a concluir que las Dunitas de Medellín y los cuerpos intrusivos asociados al Batolito Antioqueño de la zona de estudio están igualmente afectadas por estos sistemas de fallas.

Para la caracterización de los afloramientos del macizo rocoso evidenciados en la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas en los afloramientos.

El análisis de discontinuidades inició con el levantamiento manual en campo de los planos de discontinuidades. La toma de información se realizó mediante el establecimiento de estaciones geomecánicas, en las cuales se hacía la descripción del macizo, tomándose las respectivas medidas y características de las discontinuidades. Las estaciones geomecánicas se repartieron a lo largo de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay.

El levantamiento de campo comprendió la toma de información del macizo rocoso correspondiente a la medida de la orientación de los planos de discontinuidad, la observación y consignación de las características de espaciamiento, continuidad, abertura, relleno, alteración, rugosidad, agua, y la resistencia de las paredes.

A continuación, se hace una breve descripción de cada una de las mediciones realizadas y de los resultados obtenidos.



6.2.1 Orientación y buzamiento

En cada una de las estaciones geomecánicas al interior de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay se tomaron datos de rumbo y buzamiento para los planos de discontinuidad, bajo la notación buzamiento/dirección de buzamiento. En total se recolectaron 193 datos distribuidos en ocho estaciones geomecánicas, como se indica en la Tabla 7. Cabe añadir que cada estación geomecánica de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay corresponde a una franja alargada de terreno sobre la cual se encontró aflorando el macizo rocoso.

En el Mapa 15 también se presenta la localización de las estaciones geomecánicas mostradas en la Tabla 7, en donde se realizaron las medidas de discontinuidades. En el Anexo 01 de este informe se presentan los formatos de levantamiento en campo, en los cuales se establecen las características de las discontinuidades medidas en campo.

Tabla 7. Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas

Estación	Coordenadas		Número de Datos
	Norte	Este	
KGL02-U-EP	839909	1184698	62
KGL07-U-EP	839480	1184156	3
KGL08-U-EP	839503	1184085	3
KGL09-U-EP	839461	1184081	10
KGL10-U-EP	839429	1184077	42

 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

Estación	Coordenadas		Número de Datos
	Norte	Este	
KGL11-U-EP	839315	1183881	53
SFJ21-EP	838994	1181949	17
SFJ22-U-EPVT	839008	1181877	3

Los análisis se ejecutaron de dos formas diferentes, primero teniendo en cuenta todas las discontinuidades medidas en las ocho estaciones geomecánicas, denominándose como el análisis general, del cual se obtuvo un patrón de discontinuidades general para la UMI.

Posteriormente, se hizo un análisis local, analizando cada estación por separado. De esta forma se quiere entender si el patrón de fracturamiento general se puede particularizar por zonas.

La Figura 65 presenta el diagrama de polos y la Figura 66 el diagrama de rosas, obtenidos con todas las discontinuidades tomadas en las estaciones geomecánicas. Se pueden observar concentraciones de polos que permiten definir, en principio, una familia principal, con las características que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	11°/046°	N44°W/11°NE	4.4-11
2	33°/230°	N40°W/33°SW	4.4-7.7
3	77°/221°	N49°W/77°SW	4.4-6.6

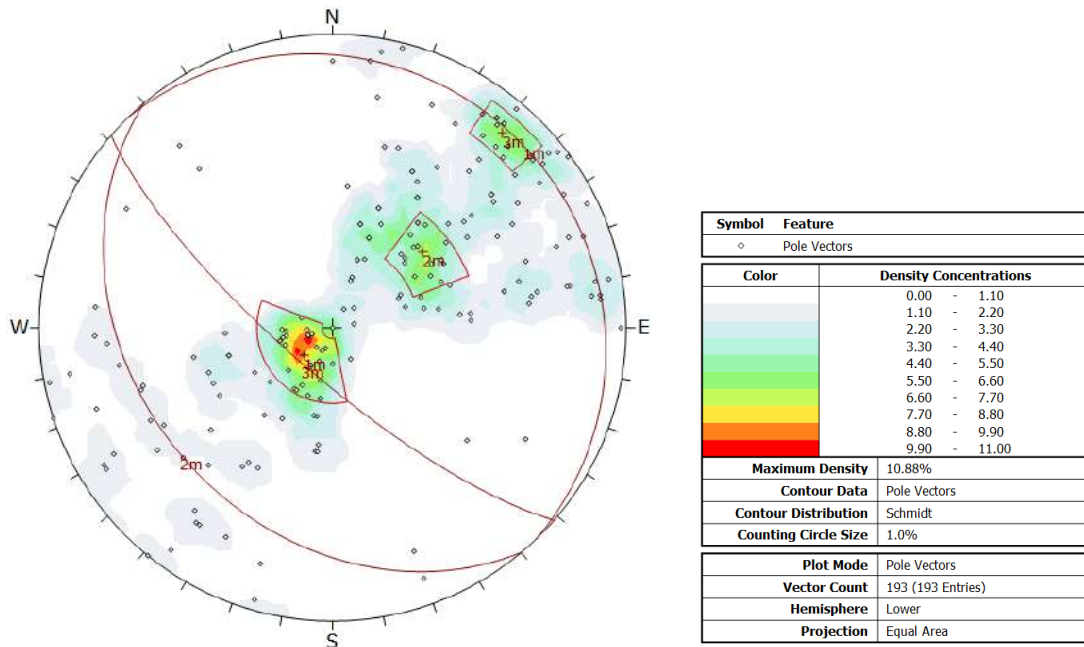


Figura 65. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

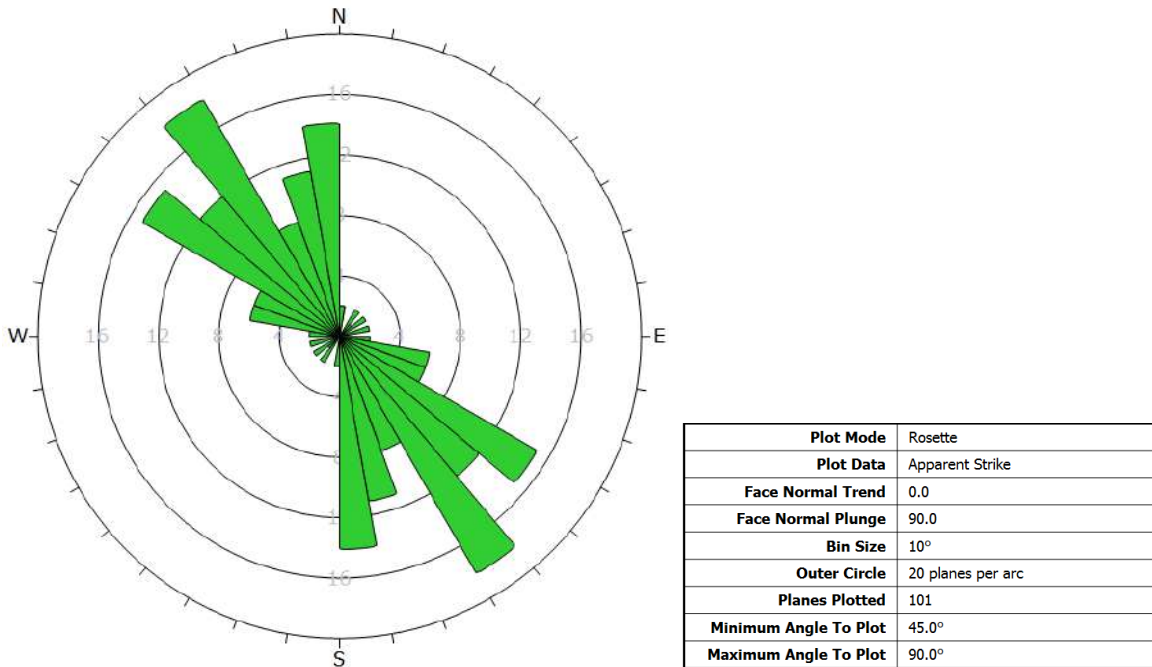
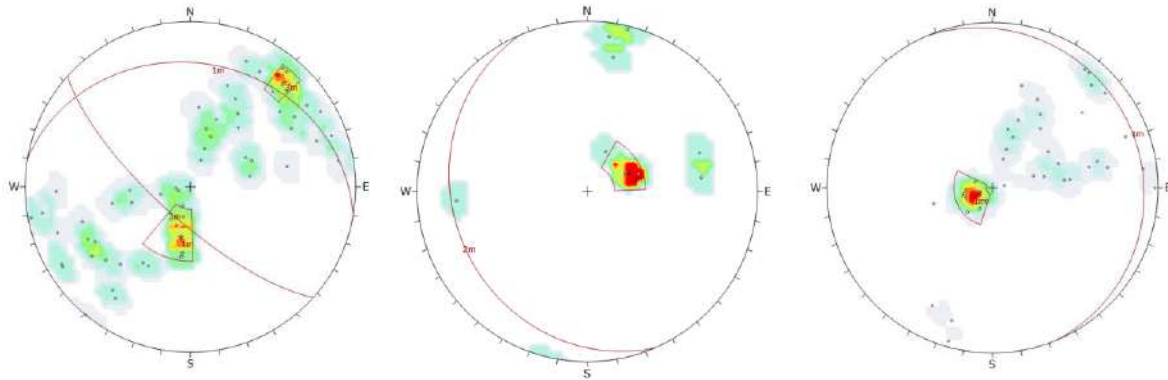


Figura 66. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

El análisis local de las discontinuidades consistió en revisar en la red estereográfica los datos levantados en cada una de las estaciones geomecánicas. El objetivo de este análisis es identificar la posible existencia de una tendencia especial en algunas de las familias principales observadas en el análisis general. Los diagramas de polos para las estaciones geomecánicas se muestran en la Figura 67 y en la Figura 69.

En general, las estaciones muestran una familia, mientras que la Estación KGL02-U-EP y KGL11-U-EP muestra dos familias de discontinuidades, las cuales se detallan desde la Tabla 9 a la Tabla 13.



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Density Concentrations	
Color	0.00 - 1.00
Color	1.00 - 2.00
Color	2.00 - 3.00
Color	3.00 - 4.00
Color	4.00 - 5.00
Color	5.00 - 6.00
Color	6.00 - 7.00
Color	7.00 - 8.00
Color	8.00 - 9.00
Color	9.00 - 10.00
Maximum Density	9.68%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Schmidt
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	62 (62 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Density Concentrations	
Color	0.00 - 3.00
Color	3.00 - 6.00
Color	6.00 - 9.00
Color	9.00 - 12.00
Color	12.00 - 15.00
Color	15.00 - 18.00
Color	18.00 - 21.00
Color	21.00 - 24.00
Color	24.00 - 27.00
Color	27.00 - 30.00
Maximum Density	30.00%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Schmidt
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	10 (10 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

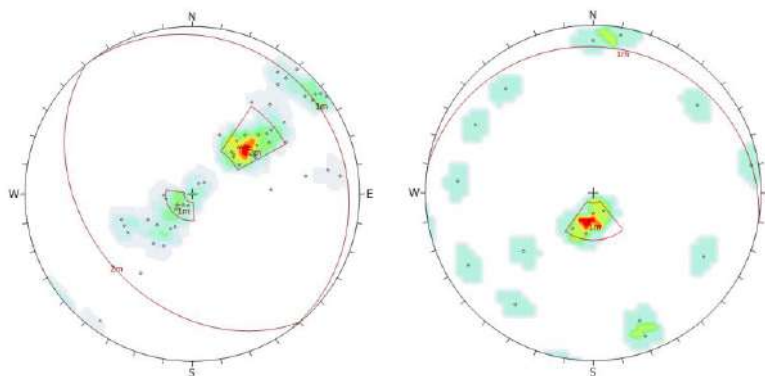
Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Density Concentrations	
Color	0.00 - 2.40
Color	2.40 - 4.80
Color	4.80 - 7.20
Color	7.20 - 9.60
Color	9.60 - 12.00
Color	12.00 - 14.40
Color	14.40 - 16.80
Color	16.80 - 19.20
Color	19.20 - 21.60
Color	21.60 - 24.00
Maximum Density	23.81%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Schmidt
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	42 (42 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

KGL02-U-EP

KGL09-U-EP

KGL10-U-EP

Figura 67. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las estaciones KGL02-U-EP, KGL09-U-EP y KGL10-U-EP



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Color	
Density Concentrations	
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00
Maximum Density	18.87%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Schmidt
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	53 (53 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Symbol	Feature
◊	Pole Vectors
Color	
Density Concentrations	
	0.00 - 1.80
	1.80 - 3.60
	3.60 - 5.40
	5.40 - 7.20
	7.20 - 9.00
	9.00 - 10.80
	10.80 - 12.60
	12.60 - 14.40
	14.40 - 16.20
	16.20 - 18.00
Maximum Density	17.65%
Contour Data	Pole Vectors
Contour Distribution	Schmidt
Counting Circle Size	1.0%
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	17 (17 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

KGL11-U-EP

SFJ21-EP

Figura 68. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones KGL11-U-EP y SFJ21-EP

Tabla 9. Familias de discontinuidades en la Estación de Campo KGL02-U-EP

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	71/226	N44°W/71°SW	4– 10
2	16/22	N68°W/16°NE	4– 9

Tabla 10. Familias de discontinuidades en la estación KGL09-U-EP

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	22/247	N23°W/22°SW	11.6 – 29



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 11. Familias de discontinuidades en la estación KGL10-U-EP

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	10/67	N23°W/10°NE	14.4– 24

Tabla 12. Familias de discontinuidades en la estación KGL11-U-EP

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	36/230	N40°W/36°SW	7.6 – 19
1	10/53	N37°W/10°NE	7.6 – 13.3

Tabla 13. Familias de discontinuidades en la estación SFJ21-EP

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	14/9	N81°W/14°NE	10.8-18

En las Estaciones KGL02-U-EP, KGL10-U-EP y KGL11-U-EP los resultados correlacionan muy bien con el patrón de discontinuidades global de la UMI, donde la familia de discontinuidades encontrada tiene orientación similar a la Familia 1 del análisis general.

En las Estaciones KGL02-U-EP, KGL09-U-EP y KGL11-U-EP, las Familias 2 y 3 se correlacionan con el patrón de discontinuidades global de la UMI. Además, aparecen algunas pequeñas concentraciones de polos las cuales, aunque cuentan con pocos datos, han de tenerse en cuenta en el análisis, puesto que fueron discontinuidades identificadas en campo.

Los resultados obtenidos en el análisis general y local indican que la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay tiene tres tendencias de discontinuidades, de las cuales una se considera familia principal (Familia 1) y las otras dos secundarias (Familias 2 y 3). La Familia 1 muestra la tendencia principal para esta UMI. De acuerdo con el análisis general, la Familia 1 (N44°W/11°NE) presenta una tendencia NW, la cual se asocia regionalmente a la Falla La Aguadita. Las Familias 2 y 3 del análisis local, no se correlacionan de forma directa con las estructuras geológicas reportadas a escala regional, por ello se asumen como discontinuidades de las estaciones KGL02-U-EP, KGL09-U-EP y KGL11-U-EP.

6.2.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad en una misma familia. Influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques. Los rangos empleados para la categorización de esta propiedad son los indicados a continuación en la Tabla 14.

Tabla 14. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades

Descripción	Medida
Extremadamente junta	< 2 cm
Muy junta	2 cm – 6 cm
Junta	6 cm – 20 cm
Moderadamente junta	20 cm – 60 cm
Separada	60 cm – 2 m
Muy separada	2 m – 6 m
Extremadamente separada	> 6 m

En la Figura 69 se presentan gráficamente los respectivos resultados. En los levantamientos realizados predominan las discontinuidades juntas, el cual corresponde a un 54.39% de la totalidad.

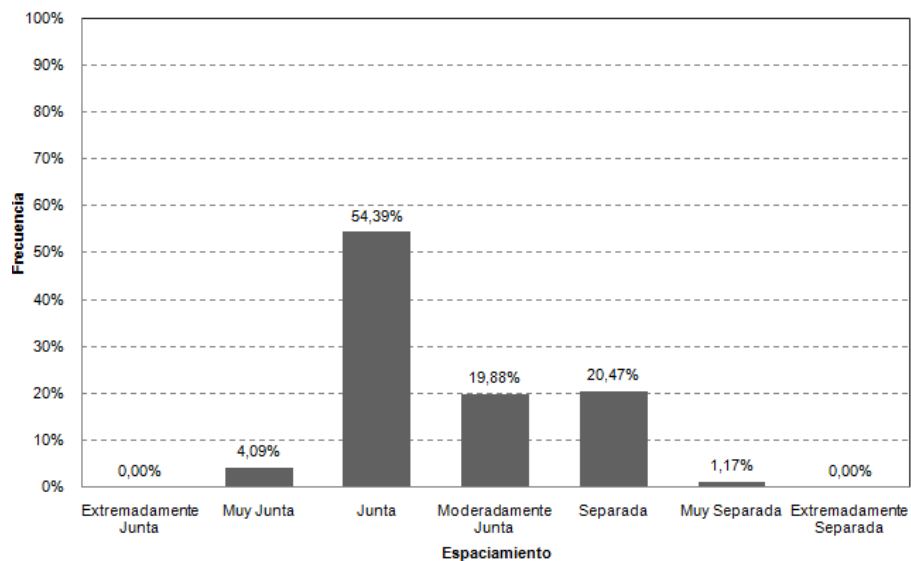


Figura 69. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades

6.2.3 Continuidad

Se trata de la extensión del plano de discontinuidad en el rumbo. Los rangos para la categorización de esta propiedad son los mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Descripción de la continuidad de las discontinuidades

Descripción	Medida
Muy baja	< 1 m
Baja	1 m – 3 m
Media	3 m – 10 m
Alta	10 m – 20 m
Muy alta	> 20 m

Con respecto a la continuidad, cabe destacar que el 70% de las discontinuidades presentaron una continuidad muy baja, lo cual corresponde a una longitud inferior a un metro (Figura 70).

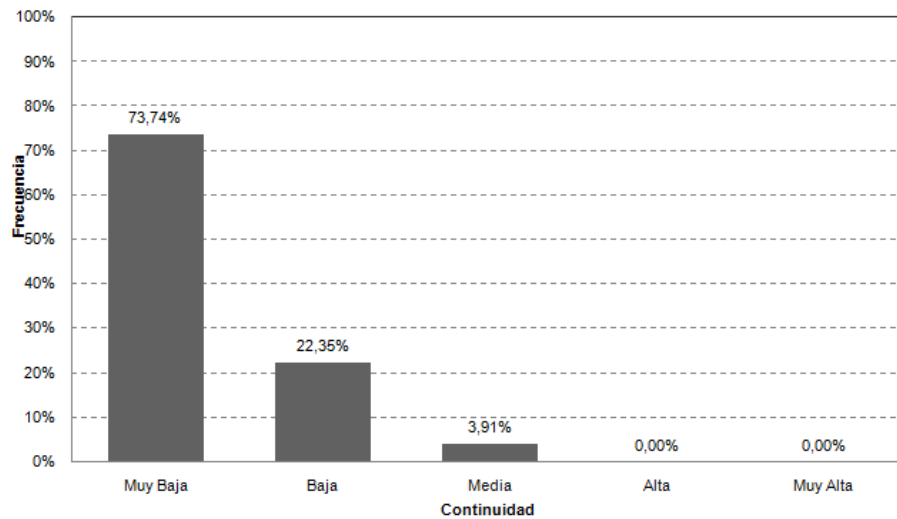


Figura 70. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades

6.2.4 Abertura

Corresponde a la distancia perpendicular al buzamiento que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede tener grandes cambios a lo largo del macizo rocoso. Los rangos para esta clasificación son los mostrados a continuación en la Tabla 16.

Las discontinuidades se presentaron predominantemente entre cerradas y abiertas (Figura 71), el cual equivale a tener discontinuidades con aberturas entre 0.1 mm hasta

2.5 mm. Los procesos que más favorece la abertura de estos planos se asocian a la meteorización y disolución en la roca que amplían la zona discontinua.

Tabla 16. Descripción de la abertura de las discontinuidades

Descripción	Medida
Muy cerrada	< 0.1 mm
Cerrada	0.1 mm – 0.25 mm
Parcialmente abierta	0.25 mm – 0.5 mm
Abierta	0.5 mm – 2.5 mm
Moderadamente abierta	2.5 mm – 10 mm
Ancha	> 10 mm
Muy ancha	1 cm – 10 cm
Extremadamente ancha	10 m – 100 cm
Cavernosa	> 1 m

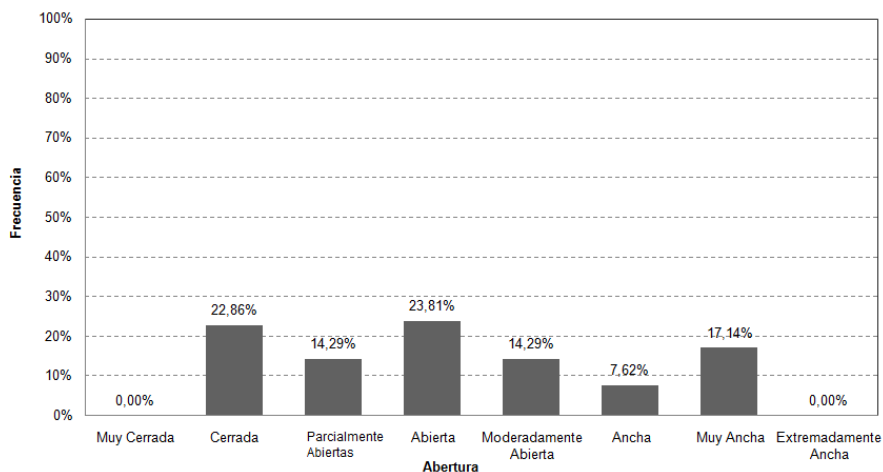


Figura 71. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades

6.2.5 Relleno

En ocasiones, en las discontinuidades puede aparecer relleno de materiales blandos arcillosos o con materiales rocosos de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno pueden ser variables y controlan el comportamiento de la discontinuidad. Los rangos de esta característica van desde ninguno, hasta duro de más o menos que 5 mm y blando de más o menos que 5 mm. Los rangos para esta clasificación son mostrados a continuación en la Figura 72.

Con respecto al relleno, cabe resaltar que el 67.62% de las discontinuidades no presentan ningún relleno. Por otra parte, el 19.05% presentan relleno blando de más o menos 5 mm, el cual corresponde principalmente a material limoso y arcilloso.

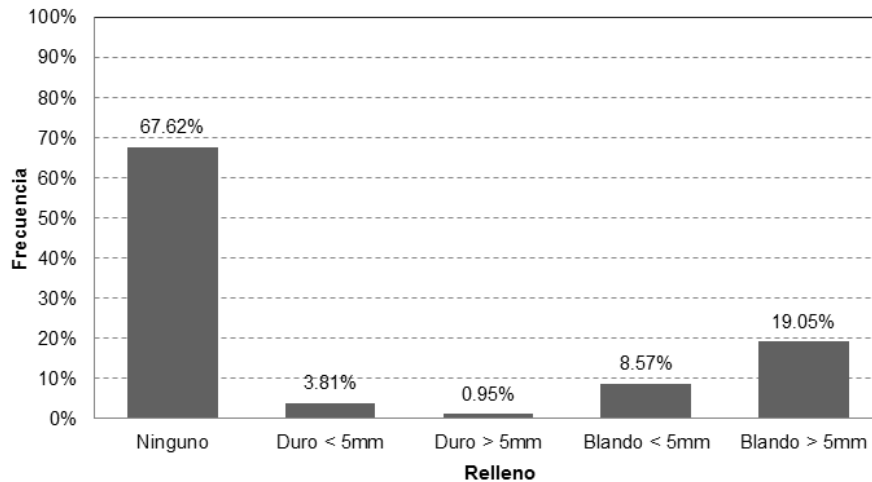


Figura 72. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades

6.2.6 Alteración

Es el cambio físico-químico que los agentes atmosféricos pueden producir sobre el macizo rocoso, afectando las propiedades geomecánicas. Los rangos de esta característica van desde inalterada, ligeramente alterada, moderadamente alterada, muy alterada hasta descompuesta.

La totalidad en las discontinuidades levantadas en cada una de las estaciones geomecánicas mostraron un nivel entre moderada y muy alteradas, con 38.24 % y 59.80 % del total, respectivamente (Figura 73).

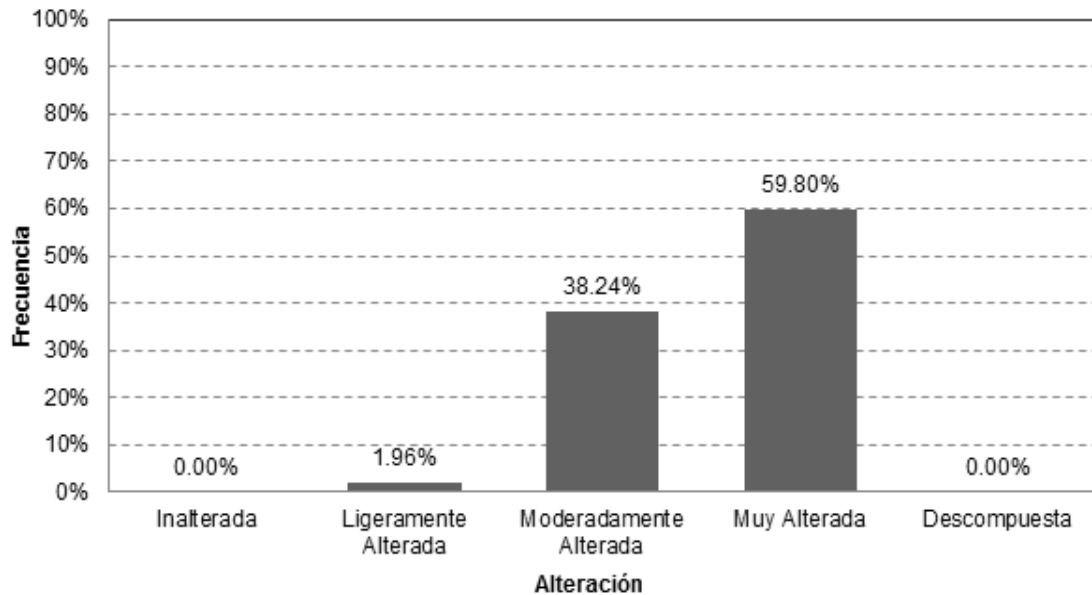


Figura 73. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades

6.2.7 Rugosidad

Esta propiedad determina la resistencia al corte de la discontinuidad. A mayor rugosidad, mayor es la resistencia. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. La rugosidad de las discontinuidades se calificó según dos escalas diferentes, como se muestra en la Figura 74. Primero la escala decimétrica o métrica, la cual puede ser escalonada, ondulada o plana. Luego se juzgó la escala centimétrica o milimétrica que da lugar a discontinuidades rugosas, lisas o planas.

En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentaron predominantemente escalonada con un 43 %, ondulada con un 36 % y plana con un 21 % (Figura 75).

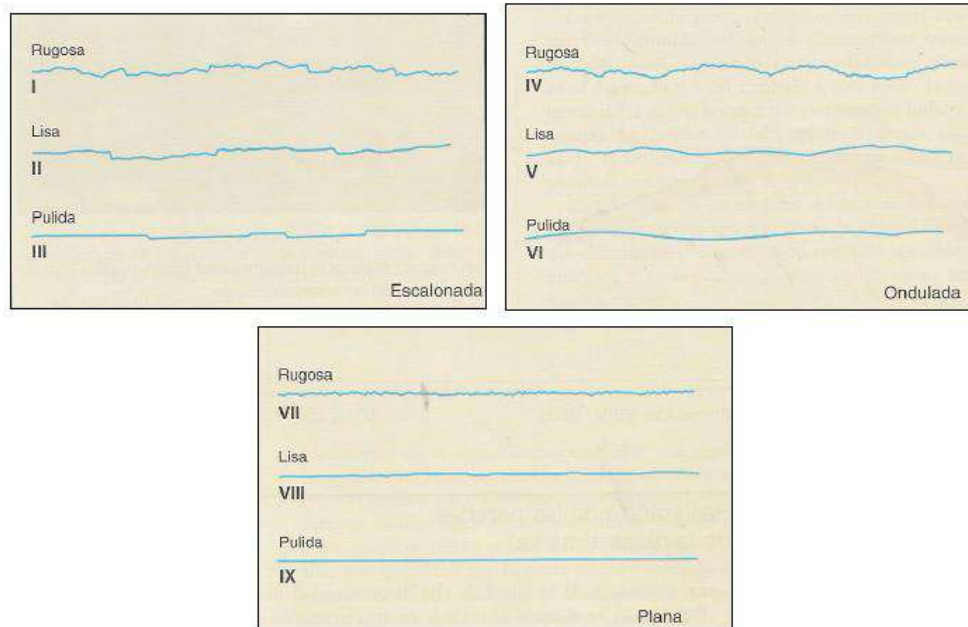


Figura 74. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de González de Vallejo, 2002)

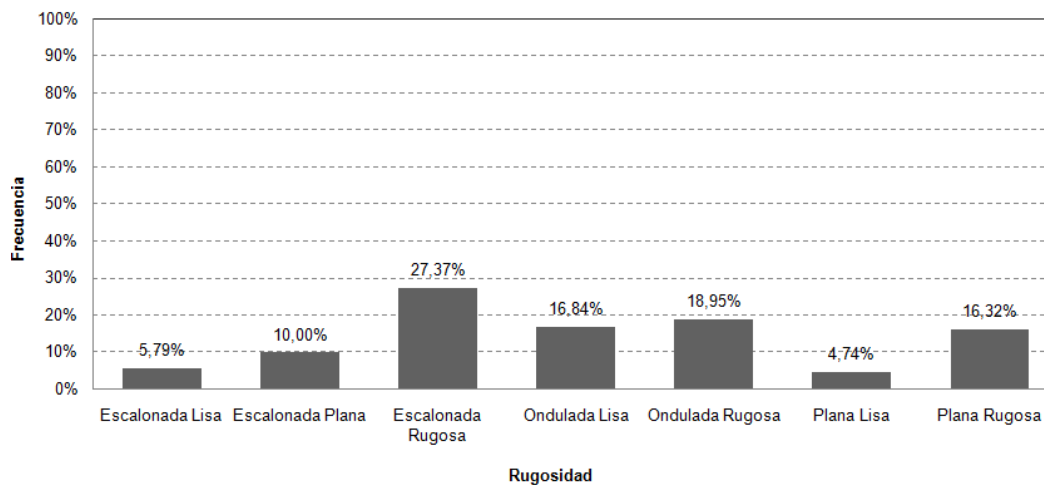


Figura 75. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades

6.2.8 Agua

Es el flujo que circula por las discontinuidades. Los rangos de esta característica consideran como posibilidades que la discontinuidad esté seca, ligeramente húmeda, húmeda, goteando o con agua fluyendo.

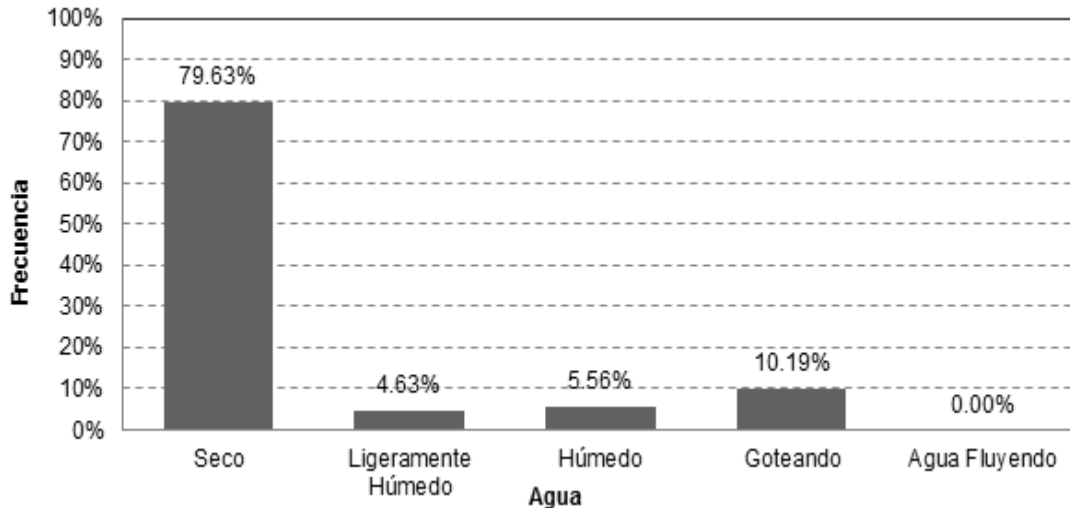


Figura 76. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades

Como se observa en la Figura 76, se destaca que el 80 % de las discontinuidades consideradas se encuentran secas. El 20 % restante se encuentran entre ligeramente húmedas y goteando; ninguna de ellas presenta agua fluyendo.

6.2.9 Resistencia de las Paredes

Es la resistencia a la compresión confinada, considerándose entonces que es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. Los rangos de esta característica son extremadamente blanda, muy blanda, blanda, moderadamente dura, dura, muy dura y extremadamente dura.

En la Figura 77 se resalta que el 92 % de las discontinuidades presentan una resistencia de las paredes muy dura.

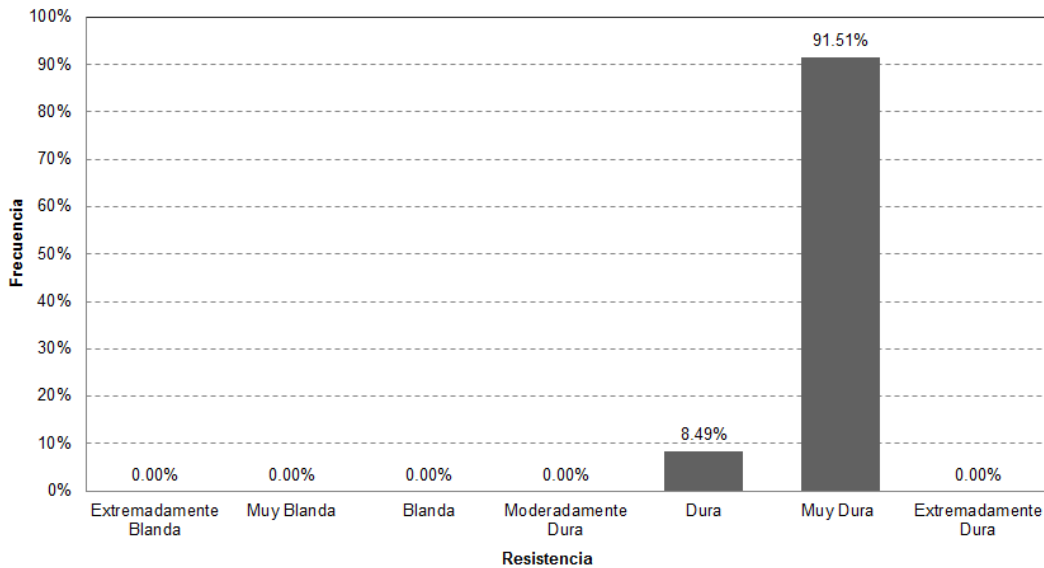


Figura 77. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades

6.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

A continuación se presenta el análisis cinemático basado en la geología estructural presentada en los capítulos anteriores. Este análisis se llevó a cabo para cuatro secciones escogidas cerca de las estaciones donde se tomaron datos estructurales o se observaron escarpes de roca, localizadas como se muestra en la Figura 78 y en la Tabla 17.

En primer lugar se determinó la dirección y buzamiento de las secciones analizadas, y además se determinó el ángulo de fricción de las discontinuidades de acuerdo con lo observado en campo. Se definió usando el límite mínimo para índice de alteración de las discontinuidades, es decir, para “planos de discontinuidades ligeramente alterados que presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.”, obteniendo así un valor de 25°.

Con los datos de las secciones y el ángulo de fricción de las discontinuidades, se llevó a cabo el análisis cinemático haciendo uso del Software Dips de Rocscience, el cual permite analizar fallas planares, por cuña, por volcamiento flexural y por volcamiento directo, entregando gráficamente la zona crítica para cada una de estas fallas, así como la probabilidad de falla de cada mecanismo, de acuerdo con el número de elementos críticos en comparación con el número total de elementos.

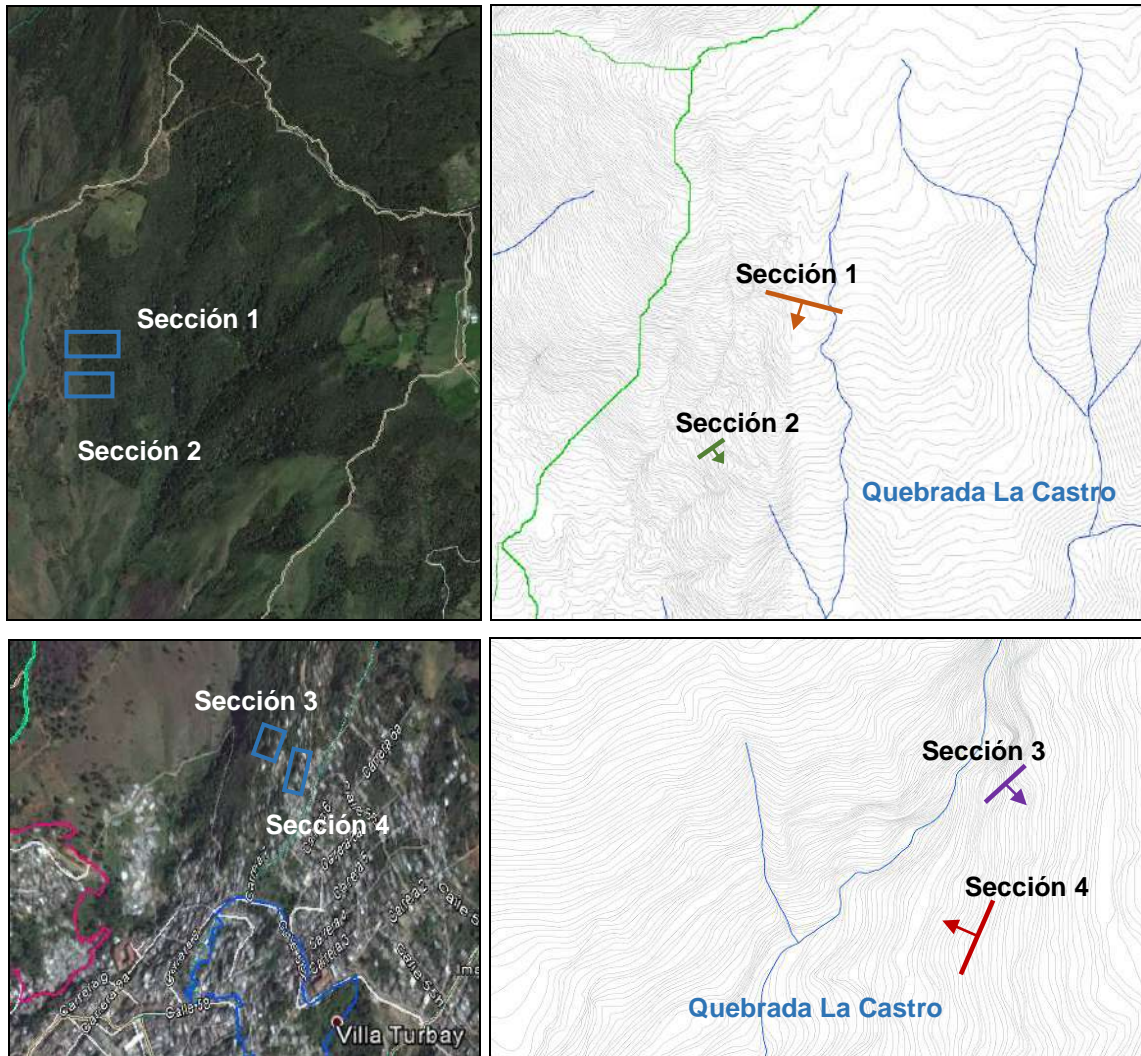
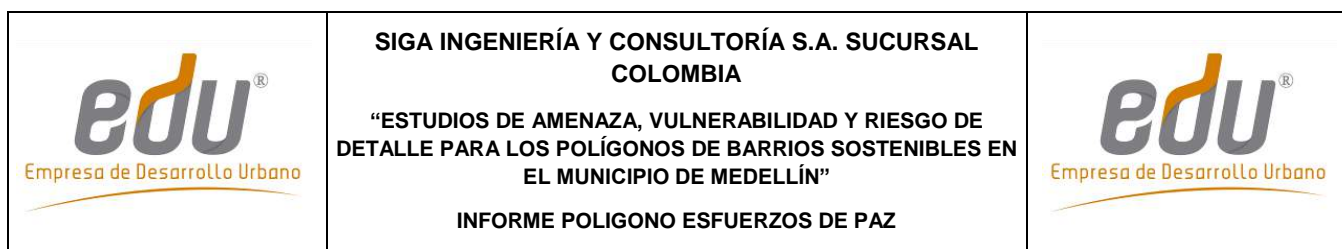


Figura 78. Secciones analizadas en partes alta y baja de la UMI.

Tabla 17. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas.

Sección	Buzamiento	Dirección del Buzamiento
1	31°	195°
2	36°	170°
3	47°	168°
4	42°	286°



Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran de la Figura 79 a la Figura 82, mientras que los resultados numéricos se presentan en la Tabla 18. En las observaciones de la tabla se incluyen las probabilidades de falla para las familias más críticos de cada mecanismo.

Tabla 18. Resumen resultados análisis cinemático

Sección	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base	Observaciones
1	2,07%	3,54%	1,04%	0,39%	0,82%	8,81%	Volcamiento por base familia 1 (17,24%).
2	2,07%	3,79%	1,04%	0,73%	1,16%	9,33%	Volcamiento por base familia 1 (17,24%).
3	2,07%	3,79%	2,07%	0,73%	1,16%	9,33%	Volcamiento por base familia 1 (17,24%).
4	5,18%	4,96%	1%	1,23%	1,22%	11,92%	Falla planar familia 3 (18,75), Volcamiento por base familia 1 (11.43%)

De acuerdo con los resultados obtenidos para el análisis cinemático de la UMI Esfuerzos de Paz (Tabla 18) se puede concluir que el mecanismo de falla predominante para las cuatro secciones de la ladera analizada es el volcamiento (mecanismo por la base), con probabilidades entre 8 % y 12 %. La Sección 4 es la más crítica para este tipo de falla. El otro mecanismo de falla predominante, es el de falla planar en la Sección 4, con probabilidad de 5 %. Las Secciones 1 y 2 tienen la menor probabilidad para la mayoría de mecanismo de falla, excepto para el volcamiento (mecanismo por la base). El volcamiento directo es el mecanismo con menor probabilidad de falla en la Sección 1.

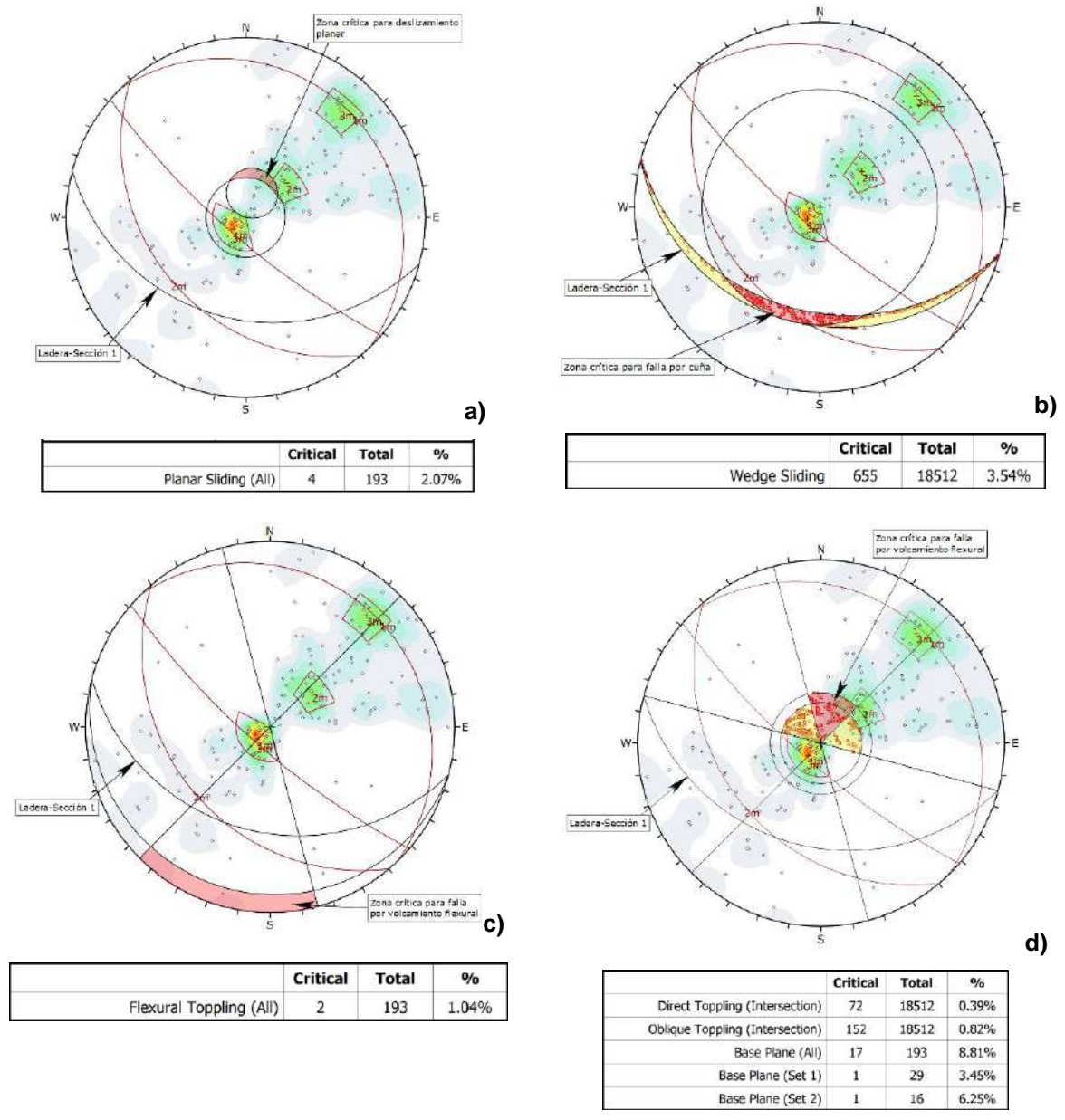


Figura 79. Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

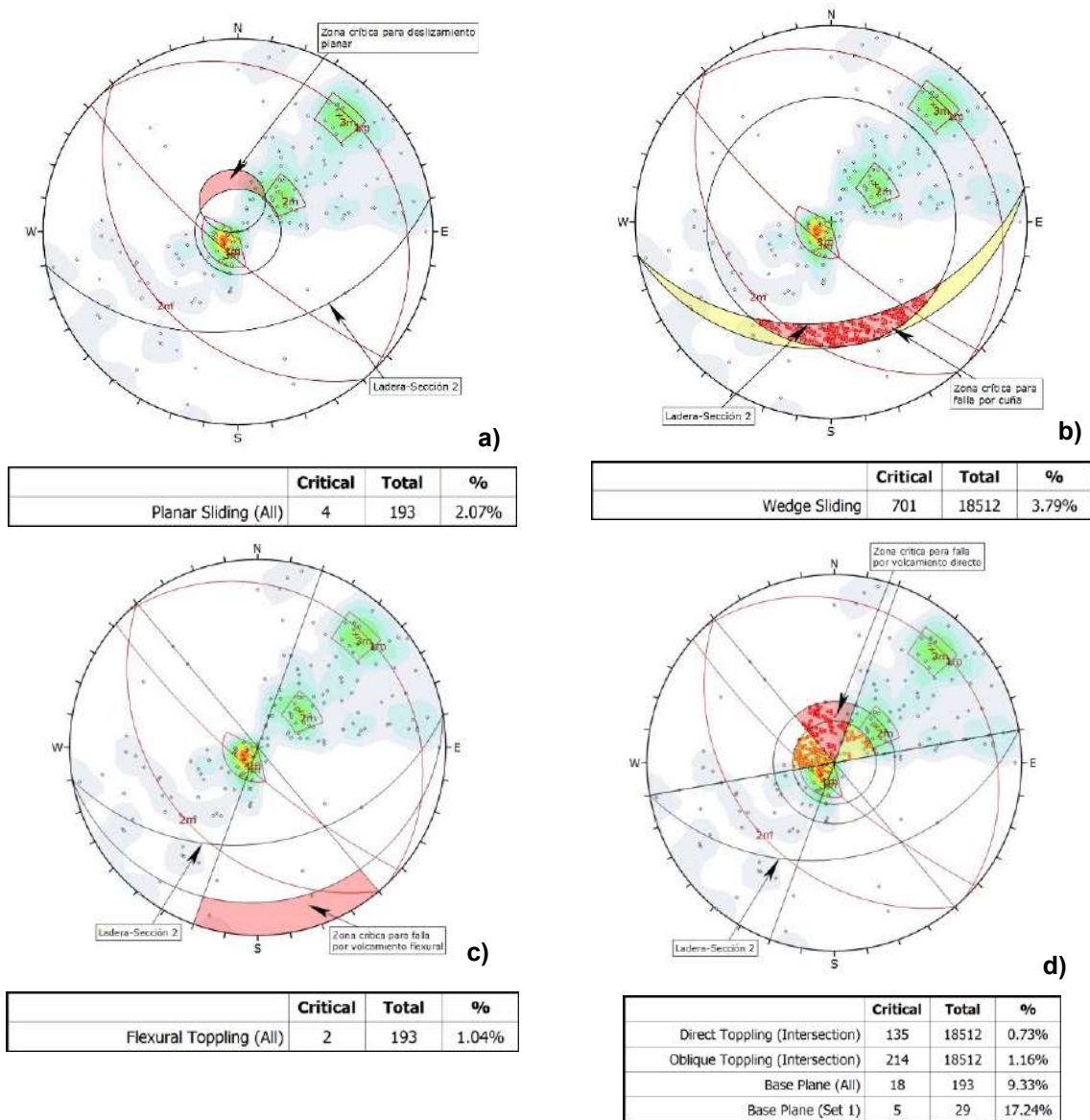


Figura 80. Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

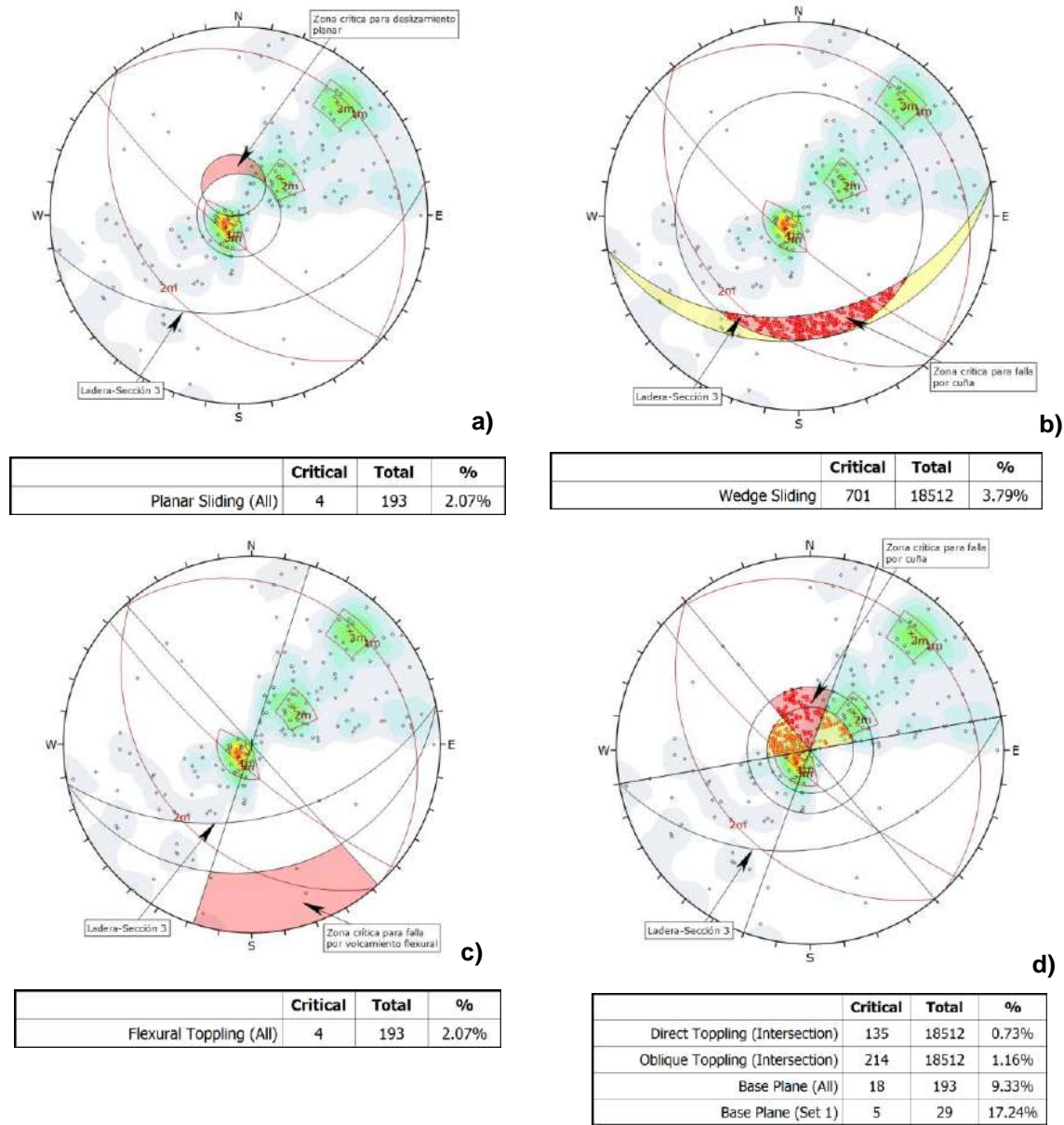
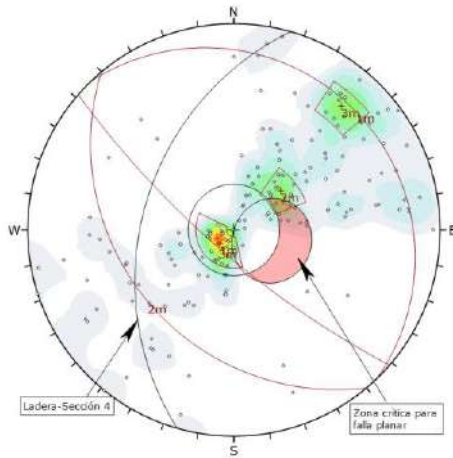
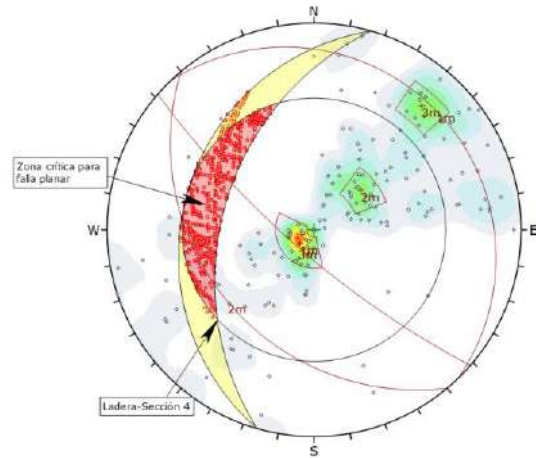


Figura 81. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo



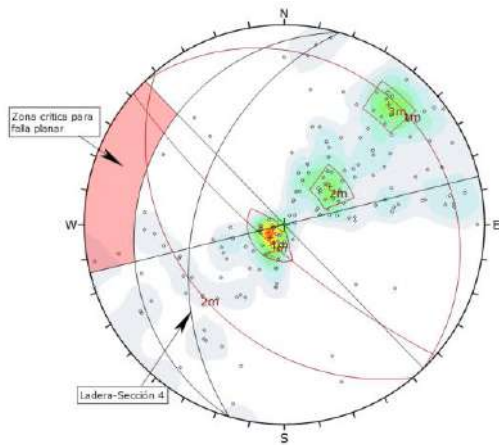
a)

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	10	193	5.18%
Planar Sliding (Set 2)	3	16	18.75%



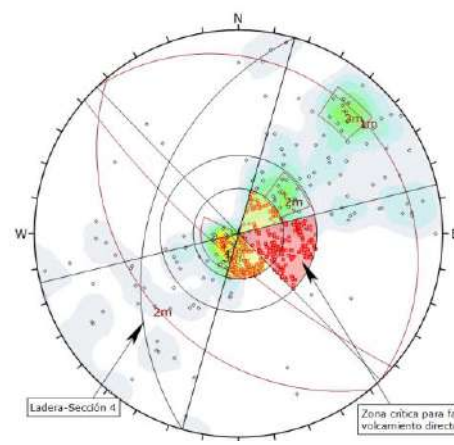
b)

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	918	18512	4.96%



c)

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	2	193	1.04%



d)

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	228	18512	1.23%
Oblique Toppling (Intersection)	225	18512	1.22%
Base Plane (All)	23	193	11.92%
Base Plane (Set 1)	4	29	13.79%

Figura 82. Análisis cinemático Sección 4 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

7. EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA

7.1 ASPECTOS GENERALES

Basados en el Código de Laderas del AMVA (2012), el cual propone que una vez realizados los estudios geológicos y geomorfológicos para la UMI de estudio, se procedió a la realización del mapa de zonificación de la aptitud geológica de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay.

Con el fin de definir la aptitud geológica de dicha UMI se planteó una metodología que reúne una secuencia lógica de pasos en los que se tienen en cuenta aspectos tales como la geomorfología, la actividad morfodinámica, las pendientes y la geología, esta última representada en las formaciones superficiales de la zona de estudio. Estos factores se valoran en un álgebra de mapas, utilizando Herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), con el fin de realizar una zonificación geológica y la identificación del uso del suelo para el urbanismo.

A continuación se describe la metodología implementada, la cual se resume además en la Figura 83.

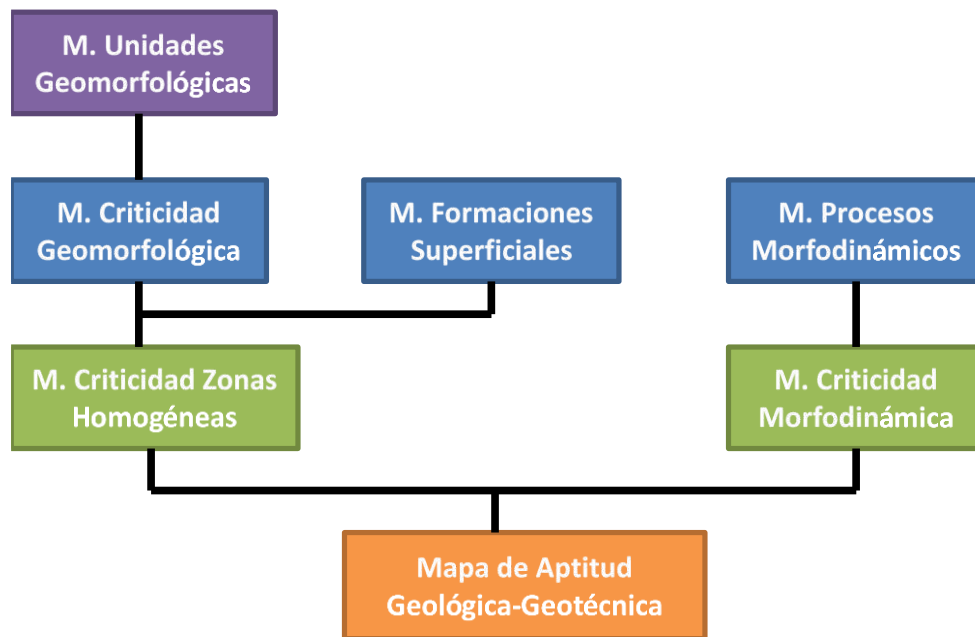


Figura 83. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica

Como se observa en la Figura 83, la metodología lleva finalmente a la generación de tres mapas importantes, el de criticidad de zonas homogéneas, a partir del mapa de criticidad geomorfológica y del mapa de formaciones superficiales, el de criticidad morfodinámica y el de zonificación de la aptitud geológica.

7.2 MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS

Para la obtención de este mapa, se realizó el cruce del mapa de unidades geomorfológicas con el mapa de formaciones superficiales, definiéndose zonas del terreno conformadas por una unidad geológica superficial en una unidad geomorfológica determinada.

Para cada unidad geomorfológica se asigna un valor de criticidad según la pendiente y la geoforma asociada (Tabla 19). Se da un valor cualitativo entre alto, medio y bajo, equivalente a un valor de peso en una escala numérica de 1 a 3 y a colores de verde, amarillo y rojo. El color verde es para el Nivel 1 (Bajo), el amarillo para el Nivel 2 (Moderado) y el rojo para el Nivel 3 (Alto).

Tabla 19. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel Criticidad
Altiplano	1
Depósitos Sin Incisión	1
Escarpe Altiplano	3
Escarpe Corto Semicircular	3
Escarpe Largo Semicircular	3
Lomeríos Amplios	2
Lomo Alargado con Vertientes Fuertes	3
Lomo Amplio con Vertientes Fuertes	3
Lomo Amplio con Vertientes Moderadas	2
Lomo de Gancho	2
Lomo de Obturación	2
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Suaves	2
Peldaño Alto	2
Peldaño Bajo	2
Peldaño Medio	2
Peldaño Tectónico	2
Superficie Antrópica	1
Superficies con Baja Incisión	1



	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
---	---	---

Tabla 19. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel Criticidad
Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	2
Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados	1
Superficies Suaves Sobre Suelo Residual	1
Vertiente Escarpada	3
Vertiente Moderada	2
Vertiente Suave	2



En el Mapa 16 se muestra el análisis de la criticidad geomorfológica finalmente obtenido para la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay.

Posteriormente, se avalúa el mapa de criticidad geomorfológica en función de las formaciones superficiales, según las características de cada material. A partir de lo anterior, se obtiene la criticidad de las zonas homogéneas utilizando las combinaciones que se muestran en la Tabla 20.

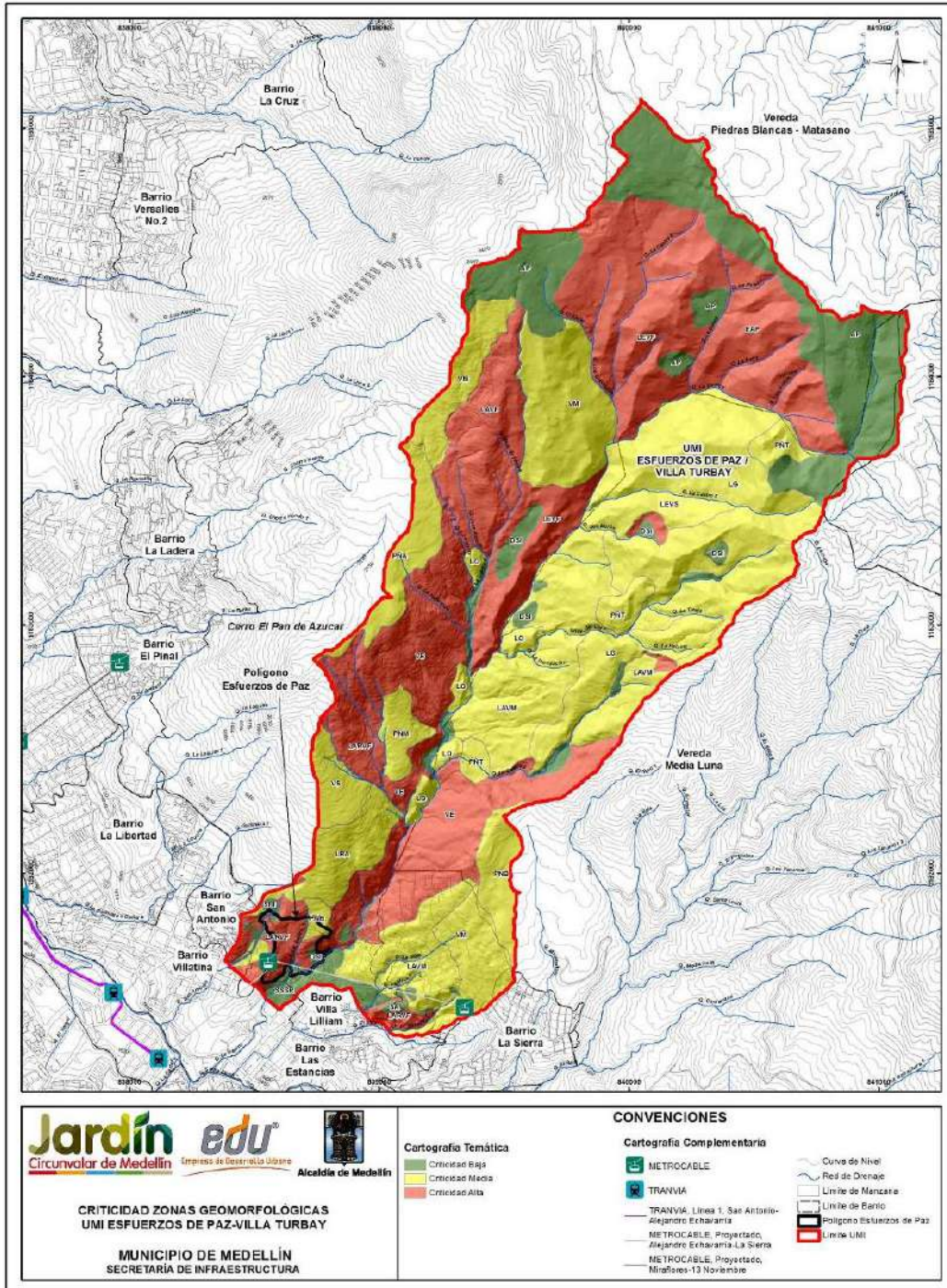
Finalmente, se genera el mapa de criticidad de las zonas homogéneas asignando un color para cada nivel de criticidad. El color verde se asigna para el Nivel 1 (Bajo), el color amarillo se asigna para el Nivel 2 (Moderado) y el color rojo se asigna para el Nivel 3 (Alto). Se obtuvo entonces el mapa de criticidad de zonas homogéneas que se muestra en el Mapa 17.

Tabla 20. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas

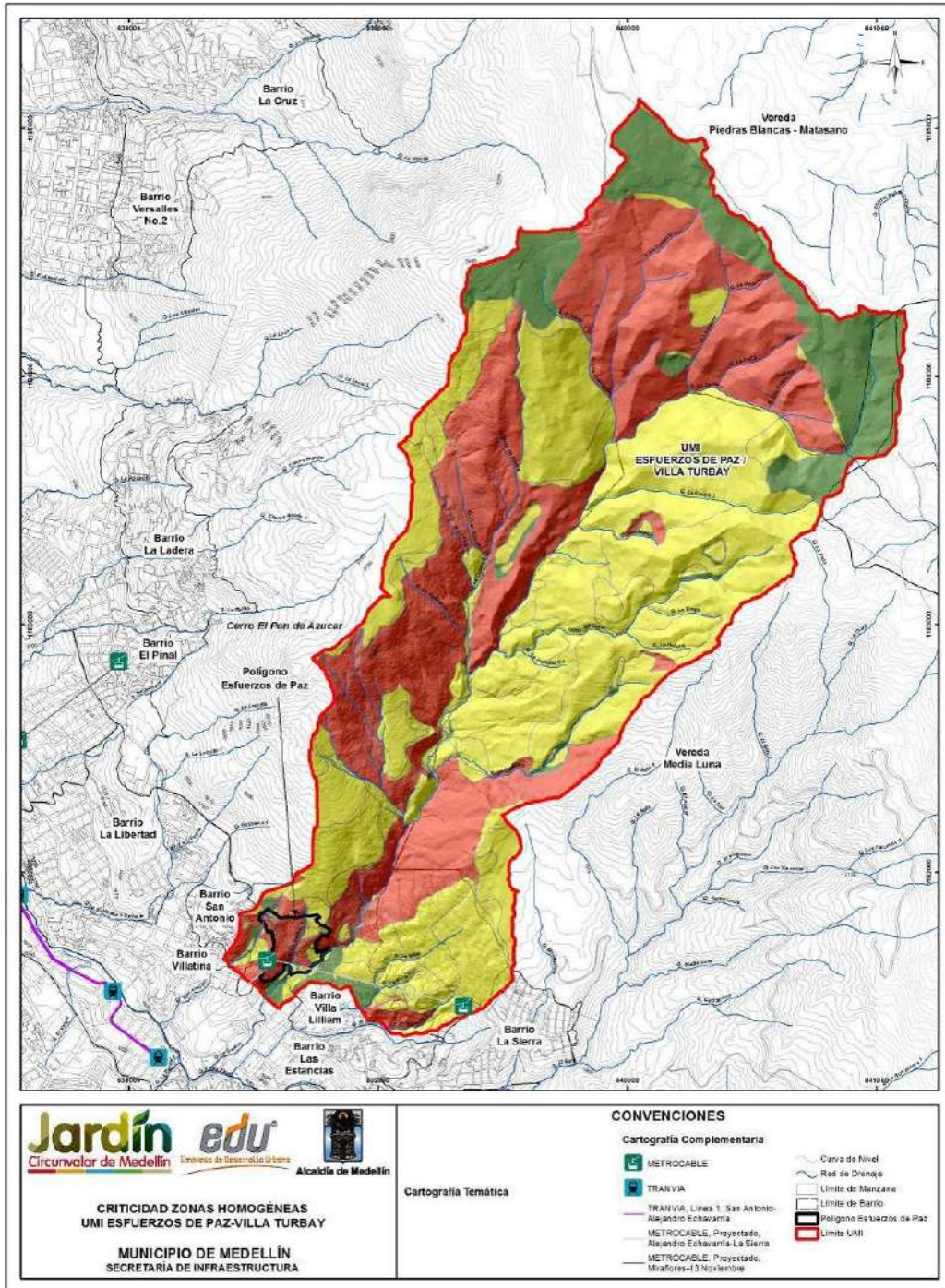
Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
1	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	2
	Lleno Antrópico	2
	Depósito de vertiente (aluviotorrencial, talus y flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín, de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y Anfibolitas de Medellín	1
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
---	---	---

Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
2	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	2
	Lleno Antrópico	3
	Depósito de vertiente (aluviotorrencial, talus y flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín, de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y Anfibolitas de Medellín	2
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
3	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	3
	Lleno Antrópico	3
	Depósito de vertiente (aluviotorrencial, talus y flujo de lodos y/o escombros)	3
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín, de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y Anfibolitas de Medellín	3
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	3



Mapa 16. Criticidad geomorfológica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay (EDPCriticidadZonasGeomorfologicas_Medellin_C)



Mapa 17. Criticidad de zonas homogéneas UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay (EDPCriticidadZonasHomogenas_Medellin_C)

7.3 MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA

A partir de la información de los procesos morfodinámicos se generó el mapa morfodinámico, como insumo fundamental en la clasificación de la zona respecto a las diferentes amenazas por fenómenos de movimientos en masa. Primero se realizó un mapa de densidad de procesos morfodinámicos, seguidamente se generó el mapa de grado de actividad y finalmente se integraron estos dos mapas con lo que se obtuvo el mapa de criticidad morfodinámica.

Para la definición del mapa de densidad de procesos morfodinámicos se debió determinar la unidad de cálculo del terreno (UCT). Esta se definió de acuerdo con la recomendación planteada en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015) del Servicio Geológico Colombiano (SGC). La UCT definida fue de 400 m² (malla de 20 m x 20 m), ya que la escala de trabajo es 1:2.000.

Posteriormente, se definieron densidades para cada una de las UCT, con el fin de determinar concentraciones de los procesos morfodinámicos, teniendo en cuenta los siguientes criterios

- ✓ Densidad baja cuando se tiene menos que un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad moderada cuando se tiene un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad alta cuando se tiene más de un proceso morfodinámico dentro de la UCT.

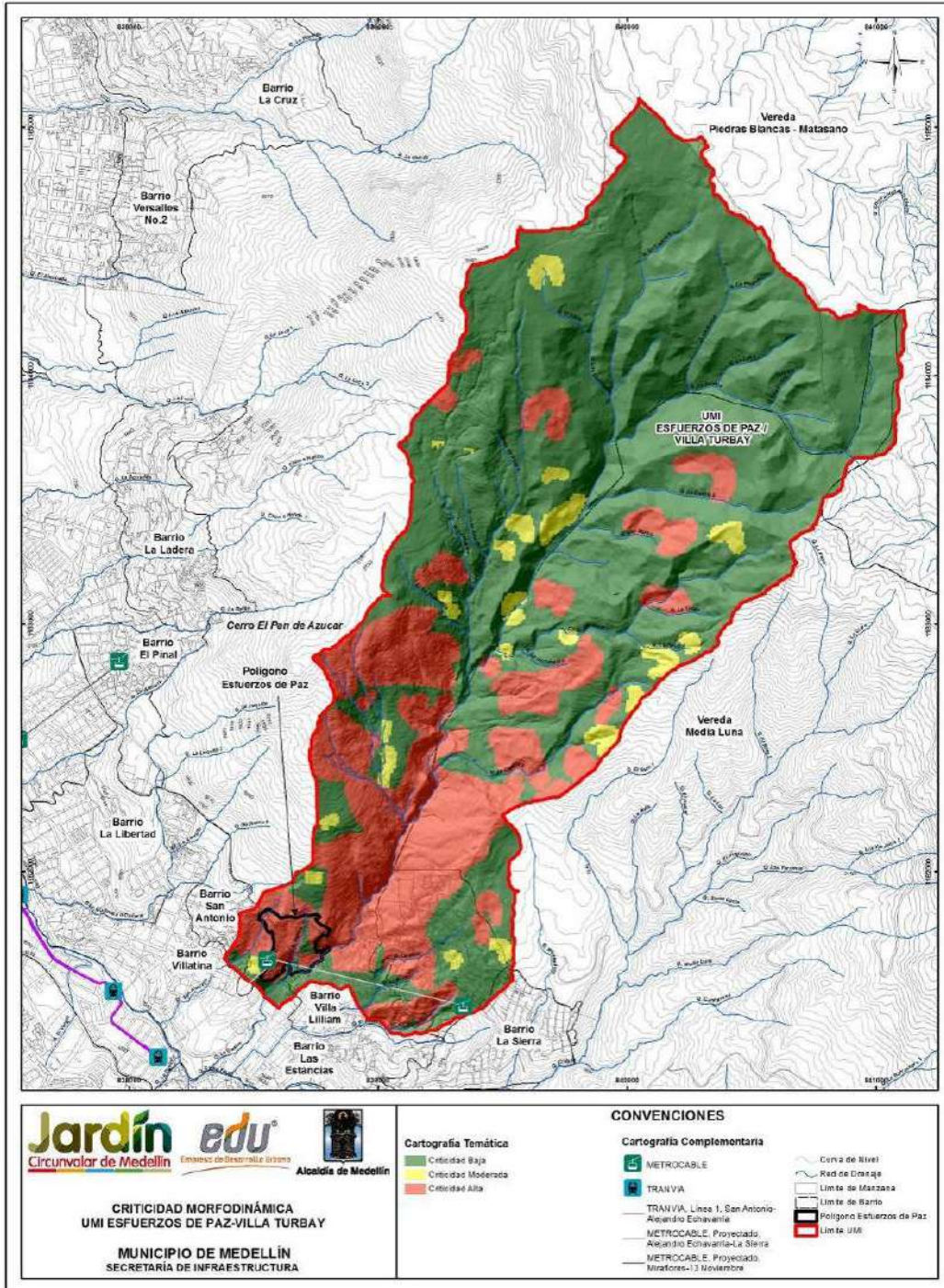
Luego de lo anterior, se hizo una zonificación de la zona de estudio de acuerdo con el grado de actividad de los procesos morfodinámicos, dividiéndose estos en activos e inactivos.

Finalmente, se llevó a cabo la integración de los resultados anteriores y clasificación de la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica, de acuerdo con los criterios de decisión que se presentan en la Tabla 21.



Tabla 21. Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica

Criticidad Morfodinámica alta (Nivel 3 - Color Rojo)	Se presenta densidad alta y procesos activos Se presenta densidad moderada y procesos activos. Se presenta densidad baja y procesos activos. Se presenta densidad alta y procesos inactivos.
Criticidad Morfodinámica moderada (Nivel 2 - Color Amarillo):	Se presenta densidad moderada y procesos inactivos
Criticidad Morfodinámica baja (Nivel 1 - Color Verde)	Se presenta densidad baja

Una vez obtenido el mapa con la metodología planteada, se hicieron ajustes en la criticidad de las zonas, de acuerdo con lo observado en campo (método holístico). En el Mapa 18 se presenta el análisis de la criticidad morfodinámica de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay obtenido con la metodología descrita anteriormente, en donde verde corresponde al Nivel 1 (bajo), amarillo al Nivel 2 (moderado) y rojo al Nivel 3 (alto).



Mapa 18. Criticidad morfodinámica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay
(EDPCriticidadMorfodinamica_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

7.4 MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA

Una vez obtenidos el mapa de criticidad de zonas homogéneas y el mapa de criticidad morfodinámica, se procede a realizar el álgebra de mapas con Herramientas SIG, a través de la siguiente función:

$$A (F)= X1 (\text{Mapa de criticidad Zonas homogéneas}) + X2 (\text{Mapa Criticidad Morfodinámica})$$



En donde, X1 y X2 corresponden a los coeficientes de la susceptibilidad por inestabilidad de las vertientes y se asignaron valores de 60% y 40%, respectivamente.

A partir de los resultados, se determinaron las cuatro zonas propuestas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012), que se describen a continuación. .

- ✓ Zonas aptas que corresponden a áreas con alto grado de estabilidad, en las que no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés y de la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas está condicionada al tipo de intervención que se proyecte y al uso y manejo que se dé a estas y a la UMI asociada.
- ✓ Zonas aptas con restricciones moderadas, que corresponden a áreas estables dentro del predio de interés, aunque su estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados en la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables.
- ✓ Zonas aptas con restricciones altas, en las cuales se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés y en la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte sobre estas. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas dentro del lote y la UMI asociada.
- ✓ Zonas no aptas, que son aquellas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés y la UMI asociada. El estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como no aptas.

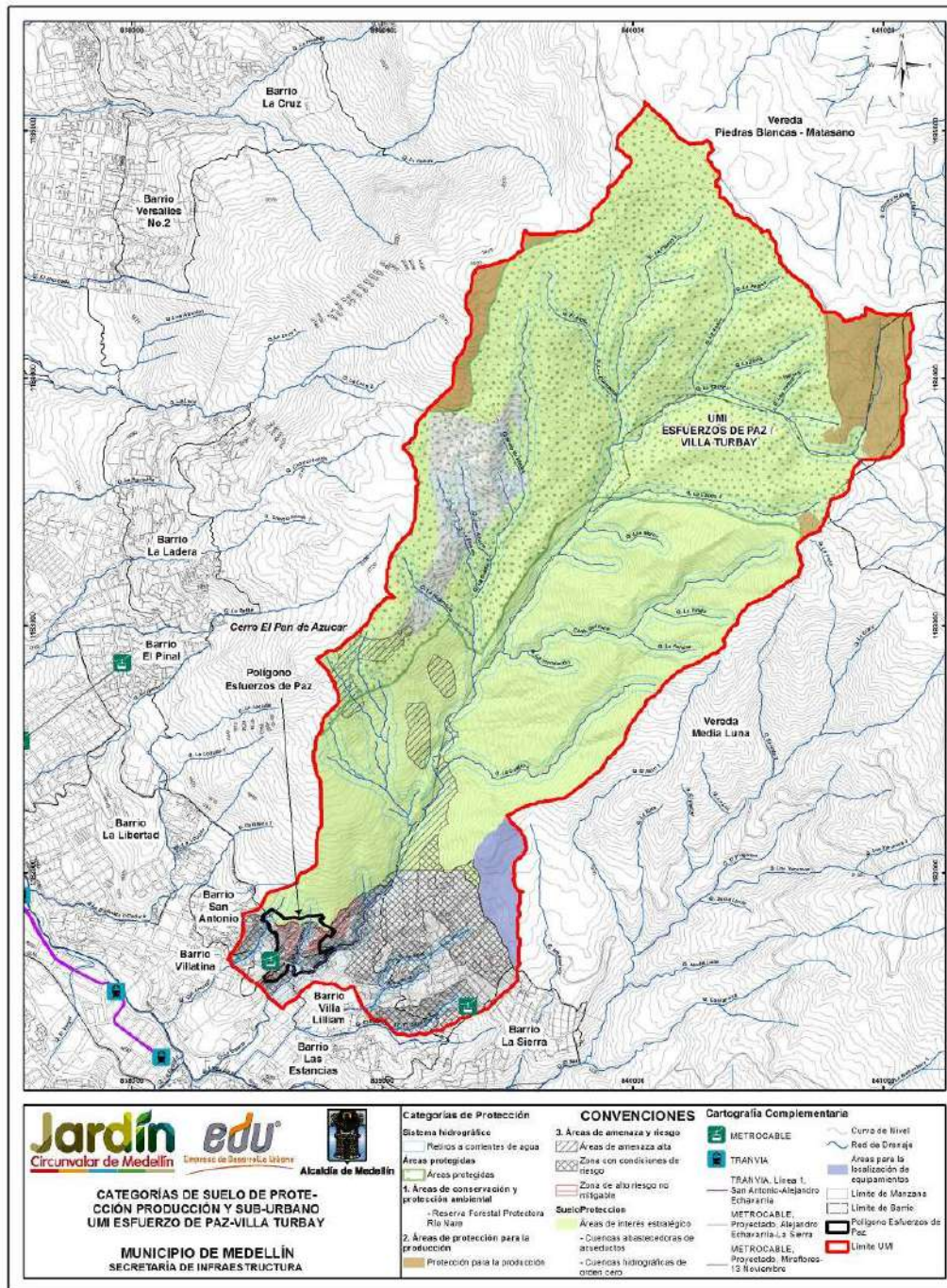
En el Mapa 21 se presenta la aptitud geológica – geotécnica de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay obtenido con la metodología descrita anteriormente.

Este mapa está refinado con base en lo observado en campo y teniendo en cuenta las áreas que por norma tengan restricción, como lo son las áreas protegidas y los retiros a

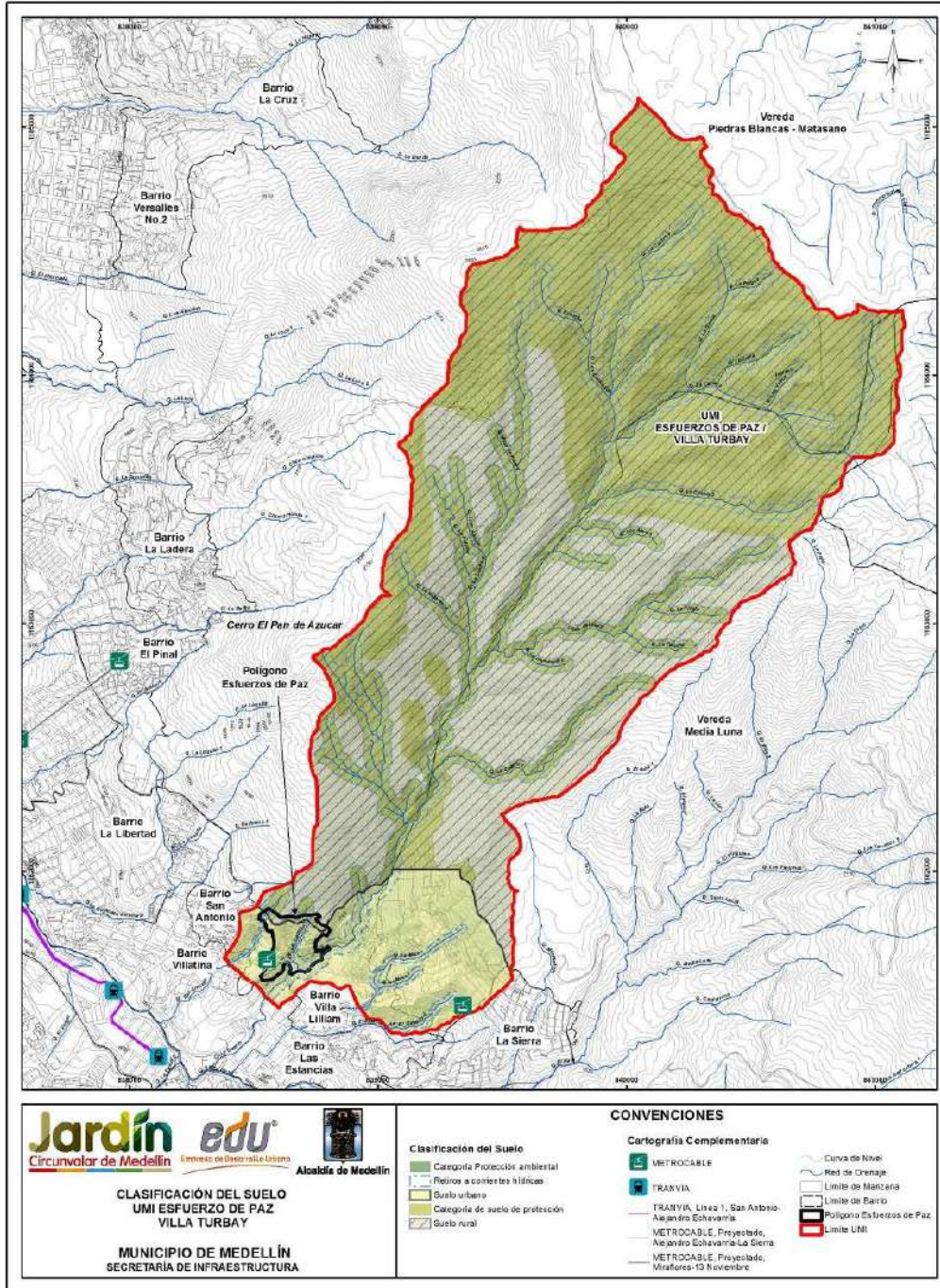
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

corrientes de agua, según las especificaciones del POT (2014) del municipio de Medellín, como se muestran en el Mapa 19 y el Mapa 20.

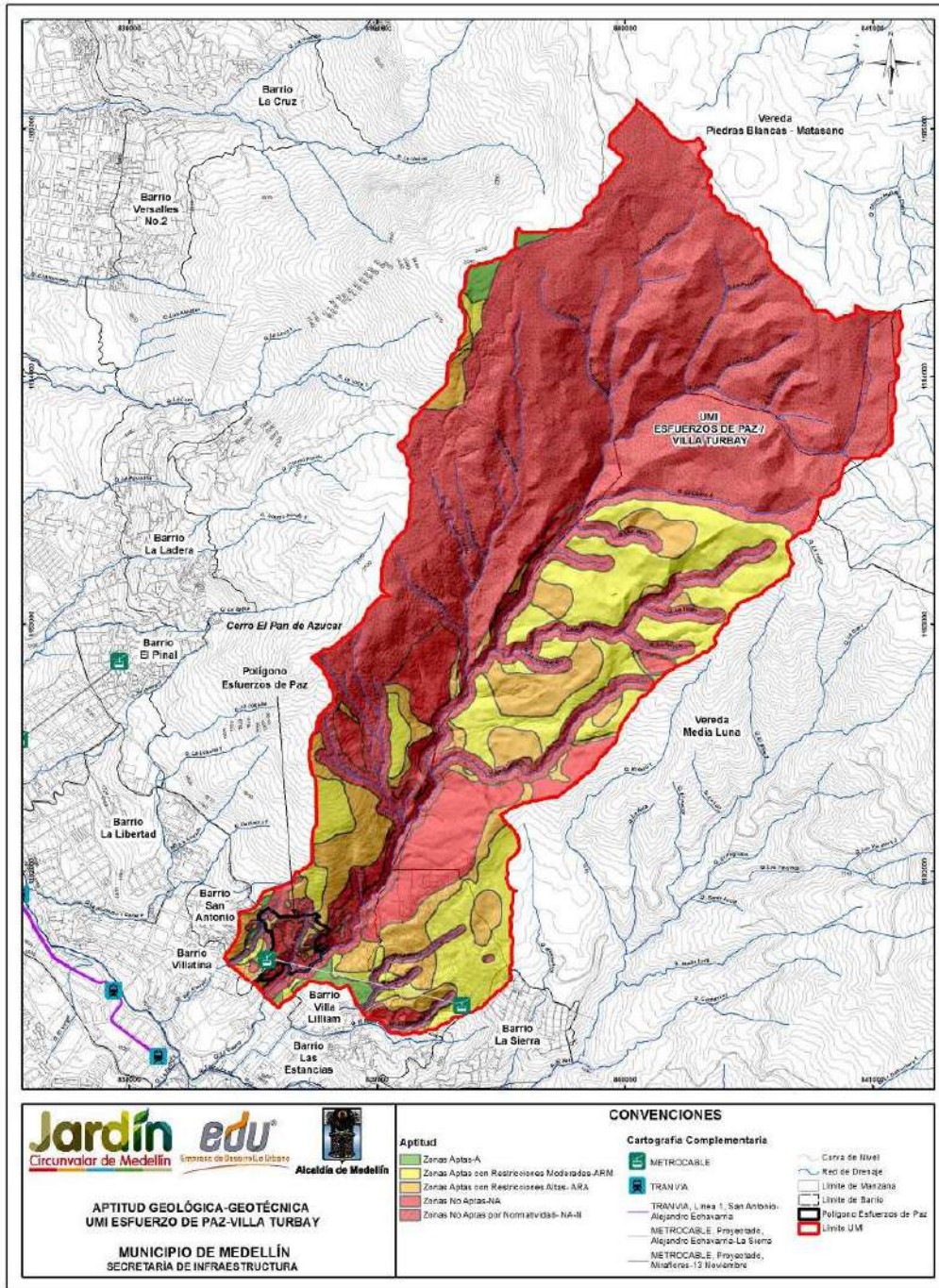
- ✓ Las Zonas Aptas son de poca ocurrencia en la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, se encuentran en la parte inferior hacia la zona suroccidental y en la parte superior en el extremo noroccidental de la UMI. No se tiene este tipo de zonas al interior del polígono Esfuerzos de Paz.
- ✓ Las Zonas Aptas con Restricciones Moderadas son las que más predominan en la UMI, se encuentran en el centro e inferior de la UMI, abarcando principalmente el extremo oriental.
- ✓ Las Zonas Aptas con Restricciones Altas se encuentran distribuidas aleatoriamente en toda la UMI en forma de parches, ocupan la parte superior que corresponde al oriente del polígono y una zona en la parte inferior.
- ✓ Las Zonas No Aptas se distribuyen a lo largo de la UMI, en la parte media y baja, principalmente en la vertiente izquierda de la zona centro-inferior de la Quebrada La Castro, y en la parte central del polígono Esfuerzos de Paz.
- ✓ Las Zonas No Aptas por normatividad se encuentran en la parte alta de la UMI, en el oeste de la zona de estudio y en los alrededores de la Quebrada La Castro. Estas zonas corresponden a la Reserva Forestal Protectora Río Nare, los retiros de Quebradas La Castro, y las zonas con riesgo no mitigable definidas por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014.
- ✓ El retiro de la quebrada La Castro está entre 20 m y 70 m, dentro del polígono es de 20 m, y el de sus afluentes es de 60 m generalmente. Los retiros de las quebradas La Mica, La Mica 1, El Saperó están estipulados de 30 m. El de la quebrada San Antonio es de 20 m en la parte baja y 60 m cerca del nacimiento.
- ✓ En la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay predominan las zonas no aptas por normatividad y las zonas aptas con restricciones moderadas, y en el polígono Esfuerzos de Paz las zonas No Aptas y Aptas con restricciones altas.





Mapa 19. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014) (15_EDPCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_C y 15_EDPCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T)



Mapa 20. Clasificación del suelo (POT, 2014)
(14_EDP Clasificación del Suelo_Medellin_C y 14_EDP Clasificación del Suelo_Medellin_T)



**Mapa 21. Aptitud Geológica - Geotécnica UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay
(18_EDPAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_C y
18_EDPAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T)**

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

8.1 ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación llevada a cabo específicamente con el objetivo de proponer un modelo hidrogeológico conceptual del sitio en estudio.

En otras investigaciones (Hoyos, 2000) ha sido postulada la existencia de dos sistemas hidrogeológicos separados que descargan en el Valle de Aburrá (VA). El primero y más elevado, con su zona de recarga en el Planalto de Santa Elena (PSE), descarga en la parte alta de las laderas orientales del Valle de Aburrá. El segundo, cuya área de recarga se encuentra en el Valle de San Nicolás (VSN), descarga en la parte inferior de esas mismas laderas. En la Figura 84 pueden apreciarse las posiciones relativas de los Valles de San Nicolás a 2150 msnm y de Aburrá a 1550 msnm. Entre ambos valles se encuentra el Planalto de Santa Elena a 2550 msnm, con alturas máximas mayores que 2650 m. Los polígonos correspondientes al Proyecto Barrios Sostenibles se encuentran ubicados entre el Planalto de Santa Elena y el Valle de Aburrá.

En una primera aproximación puede aceptarse que las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá proceden en su mayor parte del Valle de San Nicolás y en menor proporción del Planalto de Santa Elena. Entre las zonas de recarga y el Valle de Aburrá existen conexiones hidráulicas, dadas por las discontinuidades estructurales del macizo rocoso, cuya ocurrencia puede ser verificada mediante la información de la composición isotópica de los diferentes componentes del sistema.

La evaluación del sistema hidrogeológico en los polígonos de estudio, requiere entonces la identificación de las áreas de recarga y las direcciones de flujo del agua subterránea hacia el Valle de Aburrá desde el Planalto de Santa Elena y los Valles de San Nicolás.

Para efectos del análisis y de elaboración de los modelos de flujo, se considera un medio hidráulicamente homogéneo dado por un macizo rocoso fracturado con una permeabilidad secundaria equivalente de 10^{-7} m/s, cruzado por un conjunto de fallas, y con una cobertura de limo cuyo espesor varía entre 0 m y 30 m. Este valor de permeabilidad ha sido estimado a partir de los datos obtenidos en la construcción de túneles en rocas masivas de la Cordillera Central y del análisis regional de caudales mínimos (Hoyos, 1998 y 1985). En la cubierta de limo, el flujo libre es nulo para efectos prácticos, de modo que la circulación del agua en la cobertura de limo y en el macizo rocoso procede a lo largo de discontinuidades. Las empinadas pendientes que limitan estas tres unidades y la baja permeabilidad en el regolito, del orden de 10^{-9} m/s, calculada a partir de ensayos de consolidación unidimensional, hacen que la infiltración efectiva en las laderas sea muy baja.



Figura 84. Esquema de localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)

Dicha evaluación se hace considerando la aplicación de técnicas isotópicas, basadas en la existencia de isótopos estables de Oxígeno (^{16}O , ^{17}O y ^{18}O) e Hidrógeno (H y D), y la regularidad de la variación del contenido de dichos isótopos estables en la composición del agua. Su condición de isótopos estables y la regularidad de su variación en función de las condiciones de evaporación y de condensación, permiten seguir su pista en el ciclo hidrológico con certeza y utilizarlos como trazadores en dicho ciclo. Los valores de contenido de isótopos estables son dados como desviaciones de valores estándar (valores delta), que en el caso del agua son dados con relación al contenido de Deuterio y Oxígeno 18 del agua media del océano (SMOW: Standard Mean Ocean Water) y se expresan en tantos por mil.

La información utilizada en esta investigación incluye datos y resultados de investigaciones anteriores del autor citado, los resultados de análisis isotópicos de muestras de agua lluvia colectadas en el sitio de estudio en el trimestre comprendido de abril de 2015 a junio del mismo año y de muestras de agua de manantiales colectadas también en la zona de interés después de un intervalo de 10 días sin lluvia.

8.2 LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG

Los contenidos de Deuterio y Oxígeno 18 del agua lluvia presentan una elevada correlación lineal conocida como la Recta Meteórica o Recta de Craig, cuya ecuación general a escala global corresponde a la expresión:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$$

La Figura 85 ilustra la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia con base en 654 datos generados en todo el país, la cual se ajusta a la expresión:

$$\delta D = 7.7\delta^{18}O + 5.5$$

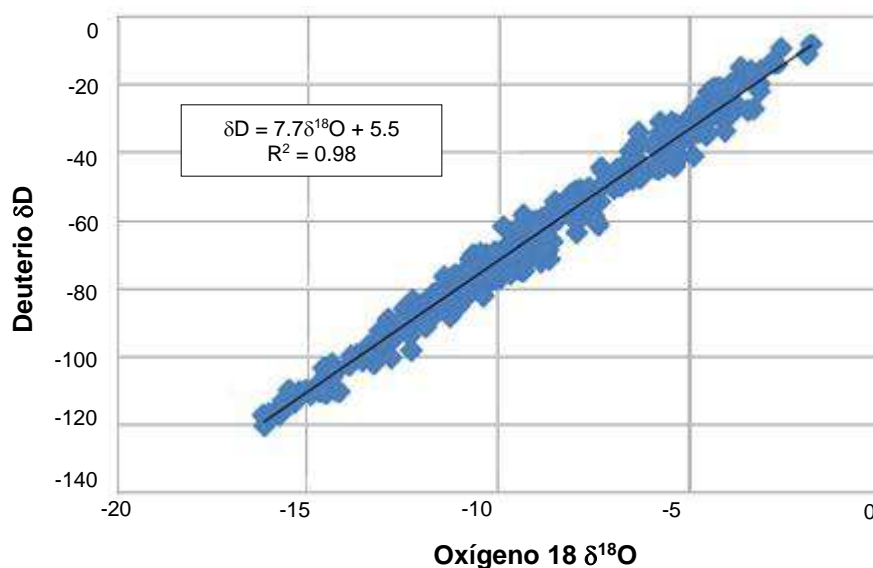




Figura 85. Recta Meteórica para Colombia

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada en la Figura 85 por estar basada en un mayor número de datos.

Esta recta permite reconocer si el agua analizada en un punto determinado es agua lluvia o si corresponde a otra categoría, como aguas juveniles o connatas, o ha sufrido un proceso de evaporación o de contaminación con productos químicos.

Al localizar el par de valores Deuterio : Oxígeno 18 en la gráfica, se puede determinar que los datos que se encuentran cerca de esta recta corresponden a aguas lluvias puras, mientras que aquellos que se apartan significativamente de esta recta corresponden a aguas lluvias que han sido modificadas. Las modificaciones más comunes son debidas a procesos de evaporación en lagos y lagunas, a intercambio isotópico con los medios en los que fluye, o a contaminación con productos químicos y desechos líquidos urbanos. En

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

el caso de los polígonos en estudio, las modificaciones podrían ser especialmente las debidas a evaporación o a intercambio isotópico, pudiéndose anotar lo siguiente:

- ✓ En el agua que ha sufrido un proceso de evaporación se presenta un enriquecimiento relativo de Oxígeno 18. Esto porque dado que la magnitud del fraccionamiento por evaporación es diferente para los isótopos de Hidrógeno y Oxígeno, la relación que permanece constante entre Deuterio y Oxígeno 18 en el agua lluvia, no se mantiene así en los procesos de evaporación.
- ✓ Los procesos de intercambio isotópico pueden ocurrir, por ejemplo, entre el agua y los minerales de las rocas a través de las cuales fluye el agua. Este intercambio es menos probable en el caso del Hidrógeno y su isótopo estable el Deuterio, en razón de la escasez relativa de minerales hidratados en el macizo rocoso. En todos los casos, el efecto es más notorio en el contenido de Oxígeno 18 que en el contenido de Deuterio.

La variación en la composición isotópica depende de las condiciones de evaporación y de condensación de las masas de agua en la hidrosfera, lo cual implica que ella depende básicamente de las condiciones de presión y temperatura del ambiente en que ocurre la evaporación o la condensación. Esta condición hace que en los análisis de hidrología isotópica sea necesario contar con muestras de agua lluvia representativas de períodos suficientemente largos que permitan suponer que ellas corresponden a las condiciones ambientales medias del sitio de muestreo. En este caso, los muestreadores de agua lluvia fueron instalados durante un período de tres meses que incluyó los meses de abril de 2015 a junio del mismo año. La toma de muestras se realizó mediante la instalación de pluviómetros artesanales que permitían el ingreso del agua lluvia evitando la evaporación en el tiempo (Figura 86). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

Específicamente en la Tabla 22 y en la Tabla 23 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 87 muestra gráficamente la relación Deuterio: Oxígeno 18 de estas muestras, diferenciando las aguas lluvias de las aguas de manantiales. Se puede observar que la relación Deuterio : Oxígeno 18 de las muestras colectadas en desarrollo de este proyecto se ajusta a la Recta Meteorica de Colombia, tratándose de una recta cuya pendiente es cercana a 8, lo que permite reconocer las muestras tomadas en manantiales como agua lluvia infiltrada (Figura 85 vs. Figura 87). La diferencia en el término independiente de la ecuación puede responder a condiciones meteorológicas particulares del área donde fueron tomadas las muestras.

Se observa además que los valores de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua de manantiales se distribuyen en dos conjuntos. El primero con pares de valores del orden de -71.8 y -10 y el segundo con pares de valores del orden de -79 y -11. Los valores más altos de contenido isotópico de los primeros pueden corresponder exclusivamente a agua subterránea. Los valores de contenido isotópico de los segundos,

corresponden a manantiales que drenan agua subterránea combinada con agua de escorrentía.



Muestra EDU-02 Santa Elena R



Muestra EDU-06 CAI Torres

Figura 86. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio

Tabla 22. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δ ¹⁸ O	Observaciones
EDU-01	03/07/15	844618.50	1178332.35	2650	-96.7	-13.16	Santa Elena Waira
EDU-02	03/07/15	843170.78	1180895.89	2570	-96.5	-13.11	Santa Elena R
EDU-03	03/07/15	842970.42	1183004.41	2460	-95.5	-12.75°	Santa Elena ARPSE
EDU-04	03/07/15	840041.39	1189109.01	2045	-85.5	-11.44	Altos de Oriente
EDU-05	03/07/15	839168.65	1182630.68	2100	-89.4	-11.84	Pan de Azúcar
EDU-06	03/07/15	838950.41	1182665.08	2030	-87.7	-11.77	CAI Torres
EDU-07	03/07/15	836091.03	1180638.77	1665	-78.9	-10.79	Medellín Loreto



 <p>edu[®] Empresa de Desarrollo Urbano</p>	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	 <p>edu[®] Empresa de Desarrollo Urbano</p>
---	--	---

Tabla 22. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δ ¹⁸ O	Observaciones
EDU-O8	03/07/15	835283.30	1178828.00	1550	-87.5	-11.98	Medellín Castropol

Tabla 23. Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δ ¹⁸ O
EDU-09	03/07/15	838772.26	1182739.33	1950	-78.7	-10.96
EDU-10	03/07/15	839161.24	1183861.49	2220	-71.5	-9.56
EDU-11	03/07/15	838457.66	1182730.36	1980	-76.5	-10.21
EDU-12	03/07/15	838334.52	1182771.17	2130	-71.8	-9.84
EDU-13	03/07/15	839015.08	1183857.13	2190	-71.8	-10.02
EDU-14	03/07/15	838409.73	1182610.21	1900	-78.1	-11.06
EDU-15	03/07/15	838739.46	1183720.75	2130	-80.6	-11.06
EDU-16	03/07/15	839046.39	1183497.60	1915	-80.0	-11.37

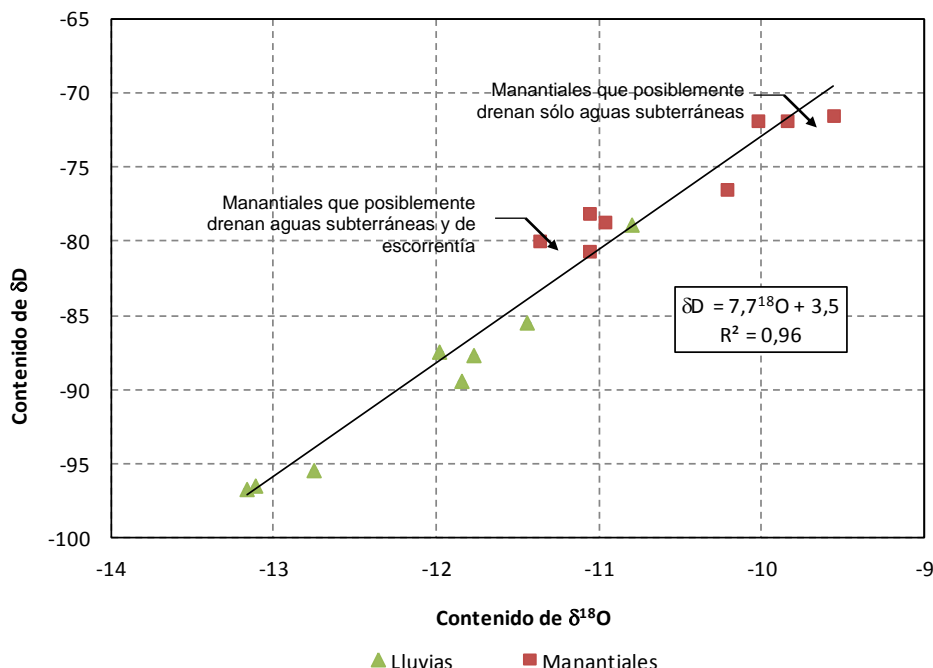


Figura 87. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental

Se resalta el hecho de que los valores de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua lluvia son consistentemente menores que los esperados con base en una amplia base de datos compilada en los últimos 30 años. Esto no sucede con los valores reportados de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua de manantiales. Esta diferencia en el contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 puede ser explicada por el hecho de que las muestras del agua lluvia fueron colectadas en su totalidad durante un evento cálido ENSO, en tanto que los contenidos isotópicos del agua de manantiales corresponden a una acumulación de largo plazo en el macizo rocoso.

8.3 EL GRADIENTE OROGRÁFICO

Una regularidad también útil en los análisis isotópicos, es la variación que puede tener el agua lluvia por las condiciones de presión y temperatura en las que se produce la condensación y la correspondiente precipitación. Dado que en las regiones equinociales la temperatura ambiente es una función de la altura sobre el nivel del mar, el contenido isotópico del agua lluvia varía en función de la altura de precipitación que se toma siempre como la cota del pluviómetro o del recipiente de recolección de muestras. Las desviaciones a esta generalización están asociadas a las condiciones particulares de presión en las que ocurre cada evento de precipitación, razón por la cual conviene contar con muestras que representen una media de precipitación en un intervalo tan amplio como sea posible.

La evaluación, identificación y valoración de esta función permite determinar un gradiente orográfico de contenido isotópico en el agua lluvia, información clave para determinar las zonas de recarga. En la Figura 88 y la Figura 89 se encuentran estas funciones para Colombia, con información desde el nivel del mar hasta el Parque Los Nevados (Rodríguez, 1990).

Las ecuaciones generales para el conjunto del territorio colombiano indican que el contenido de Deuterio varía cerca de 1.2 unidades por cada 100 metros de cambio en la altura sobre el nivel del mar y el contenido de Oxígeno 18 cambia a razón de 1.4 unidades por cada 1000 metros de altura sobre el nivel del mar.

La evidencia isotópica, presentada de manera general para Colombia puede confirmarse para la vertiente oriental del Valle de Aburrá y para el área de interés de este proyecto, con los resultados obtenidos de los análisis isotópicos realizados para el presente informe que fueron presentados en la Tabla 23 y complementados con los de la Tabla 24. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 90 y Figura 91.

Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
OMO16	15/04/13	840101.30	1188537.29	2160	-83.3	-11.32	Altos de Oriente Tejas Arriba
OPB03	23/04/14	837340.15	1186344.78	1655	-79.1	-10.83	Qda. La Bermejala en estiaje
OPB05	26/05/14	837340.15	1186344.78	1655	-82.6	-11.53	Escorrentía en cuenca de Qda. La Bermejala
OPB06	16/05/14	839988.94	1189044.63	2060	-78.8	-10.77	Manantial
MAP11	21/06/14	837235.7	1186381.95	1630	-79.5	-10.96	Pozo

Se puede observar que las muestras de manantiales y quebradas tomadas en otros puntos de la vertiente oriental y las del proyecto como tal se ajustan a las líneas rectas de ajuste para Colombia, quedando dentro de las bandas que generan las muestras utilizadas para dicho ajuste. Los manantiales se han dividido en dos grupos, diferenciando aquellos que están por encima de la cota 2100 msnm de aquellos que están por debajo de dicha cota, lo cual se hace por las razones que se explican más adelante en el Numeral 8.4 de este mismo capítulo.

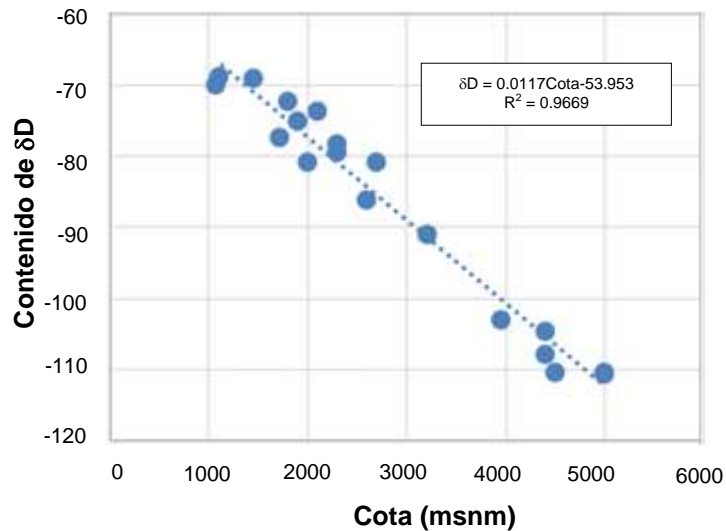


Figura 88. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

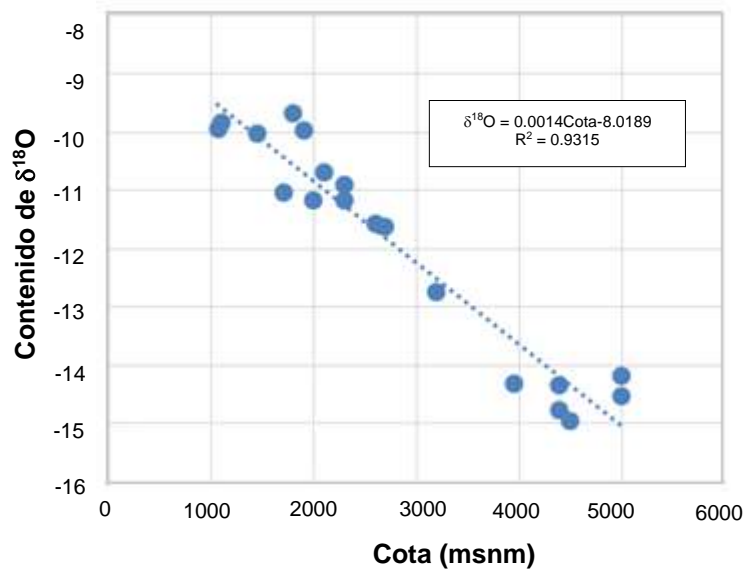


Figura 89. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

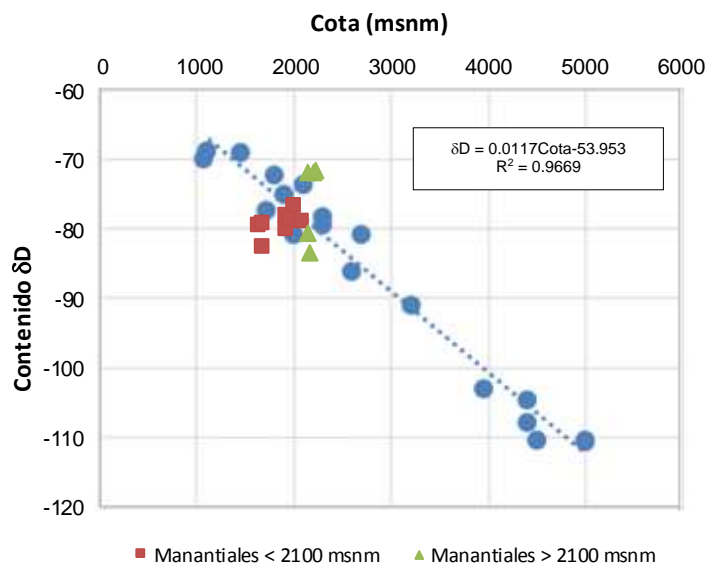


Figura 90. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

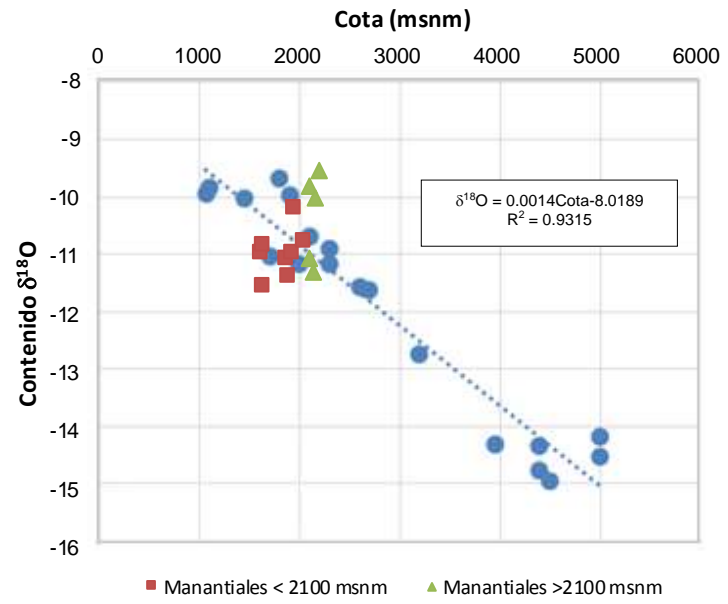




Figura 91. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

8.4 EL GRADIENTE NULO

A diferencia del agua de precipitación, el agua subterránea no necesariamente presenta esa regularidad de variación con la altura. Esta condición ha sido utilizada para identificar

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	
---	---	---

el área de recarga de las aguas subterráneas mediante la relación entre el contenido isotópico del agua subterránea cuyo origen se investiga y el contenido isotópico del agua de precipitación en el área de recarga.

En la Tabla 25 se encuentran los datos de contenidos isotópicos de agua de otras muestras de manantiales y quebradas utilizadas en otras investigaciones del autor que se viene citando en este capítulo.

Tabla 25. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
TAO-01	06/09/12	842599.43	1178844.76	2540	-85.3	-11.71	Quebrada Santa Elena
TAO-02	06/09/12	841909.11	1179439.69	2445	-83.1	-11.63	Sede Mediagua CORANTIOQUIA
TAO-03	06/09/12	841952.29	1179485.66	2350	-85.4	-11.87	Fuente surgente en el camino Santa Elena La Bocana
TAO-04	06/09/12	841835.34	1179452.18	2375	-82.3	-11.52	Amagamiento con aporte de agua de escorrentía
TAO-05	06/09/12	841844.84	1179553.55	2359	-86.2	-11.96	
TAO-06	06/09/12	841774.04	1179529.16	2346	-82.4	-11.49	Amagamiento con aporte de agua de escorrentía
TAO-07	06/09/12	841654.11	1179529.49	2314	-85.4	-11.76	
TAO-08	06/09/12	841641.73	1179498.79	2270	-86.3	-11.96	
TAO-09	06/09/12	841458.14	1179840.38	2120	-85.5	-11.91	
TAO-10	06/09/12	841108.11	1180037.99	2020	-85.7	-11.77	Quebrada, fuente de acueducto comunal
TAO-11	06/09/12	841092.72	1180034.96	2040	-82.8	-11.43	Pie de escarpe.
TAO-12	06/09/12	841978.34	1180020.27	2023	-82.7	-11.32	
TAO-13	06/09/12	841403.61	1180144.74	2005	-85.6	-11.83	Quebrada Santa Elena
TAO-14	07/09/12	841415.91	1180141.63	2007	-83.8	-11.55	Manantial en margen izquierda de QSE
TAO-15	07/09/12	841186.64	1180646.21	2040	-82.3	-11.37	Manantial
TAO-16	07/09/12	841239.10	1180713.67	2081	-85.0	-11.78	Vía Medellín Rionegro km 6+060
TAO-17	07/09/12	841116.02	1180686.35	2080	-85.5	-11.52	Vía Medellín Rionegro km 6+050
TAO-19	07/09/12	841090.06	1181316.36	2128	-83.1	-11.14	Via Medellín Rionegro K6+800
TAO-20	07/09/12	843169.62	1178170.28	2560	-86.2	-11.58	Quebrada San Pedro
TAO-22	07/09/12	844813.23	1177545.19	2610	-84.4	-11.81	Manantial
TAO-23	07/09/12	848135.78	1174466.79	2222	-81.9	-11.62	Quebrada Yarumal
TAO-28	07/09/12	839194.59	1179766.66	1933	-81.0	-11.13	Seminario Redemptoris Mater
TAO-31	07/09/12	843996.88	1178177.29	2570	-84.8	-11.71	Quebrada El Cartucho Acceso a

Tabla 25. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
							Montevivo
TAO-32	07/09/12	844073.75	1178170.94	2575°	-83.9	-11.62	Acueducto San Ignacio, Santa Elena
CON-05	13/10/10	840045.51	1192802.63	1295	-77.8	-10.40	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-06	13/10/10	840045.49	1192796.48	1295	-78.0	-10.57	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-08	13/10/10	840054.74	1192805.67	1305	-74.0	-9.58	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-21	12/11/10	840076.26	1192802.54	1295	-78.7	-10.56	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-22	12/11/10	840054.67	1192778.02	1305	-75°4	-9.68	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-23	12/11/10	840134.67	1192802.38	1335	-78.6	-10.71	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-24	12/11/10	840134.65	1192796.23	1340	-77.3	-10.61	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-25	12/11/10	840060.70	1192738.05	1360	-79.9	-10.85	Fosa de grava CONASFALTOS
HV-286		839485.94	1189494.67	1885	-80.2	-9.50	Rellano al sur de Planta Manantiales, EPM
HV-297		839410.99	1180180.91	1880	-78.3	-10.85	Vía Medellín Rionegro
HV-351		844896.06	1177471.23	2600	-84.3	-11.73	Santa Elena
HV-352		844010.39	1177473.58	2600	-83.8	-11.54	Santa Elena

Las muestras identificadas con el Acrónimo CON y dos dígitos corresponden a muestras tomadas en la Mina CONASFALTOS en el fondo del Valle de Aburrá. Las muestras identificadas con el Acrónimo TAO corresponden a muestras tomadas para el estudio hidrogeológico del Túnel Aburrá – Oriente. Las restantes muestras hacen parte del archivo personal del autor que se viene citando y corresponden a muestras tomadas desde el decenio de 1990.

En la Figura 92 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 25 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 23. Se ha consolidado entonces la información obtenida en diferentes investigaciones en el Valle de Aburrá para poder hacer la discriminación del flujo de aguas subterráneas hacia el Valle de Aburrá procedente del Planalto de Santa Elena y del Valle de San Nicolás. En este gráfico puede apreciarse que los contenidos isotópicos del agua de los manantiales se agrupan en dos conjuntos bien definidos: uno por encima de la cota 2100 msnm y otro por debajo de esta cota. Los manantiales que se encuentran en cotas inferiores a 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -80 por mil, en tanto que los manantiales que se encuentran en cotas mayores que 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -83 por mil.

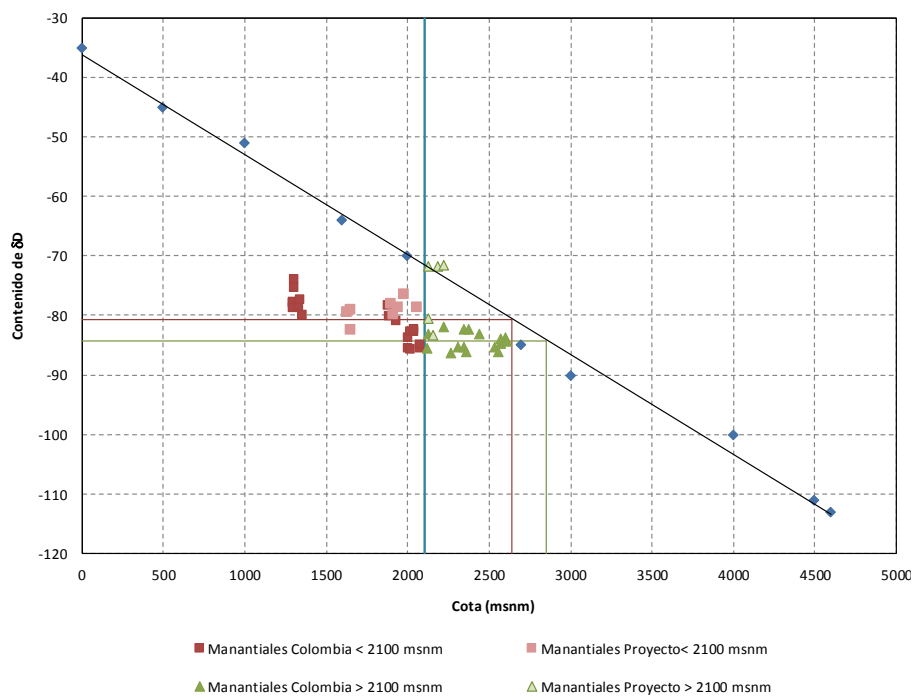




Figura 92. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)

La diferenciación mencionada indica que los manantiales ubicados por encima de la cota 2100 msnm y tienen su zona de recarga en una zona más alta que la de los manantiales ubicados por debajo de esta cota. La Figura 92 muestra los dos conjuntos de manantiales bien definidos, con sus límites en la cota 2100 msnm y en el $\delta D=81$. Se indican además las cotas correspondientes a las fuentes de alimentación de cada conjunto de manantiales según el ajuste lineal empleado.

La discriminación de los dos conjuntos se hace más clara cuando se depuran los datos con base en las observaciones de campo. Las Muestras TAO-04 y TAO-06 corresponden a dos amagamientos cuya posición topográfica permiten suponer que las muestras colectadas tenían un aporte de agua de escorrentía. Si se excluyen estos dos datos, la distribución del contenido de Deuterio define nítidamente los dos conjuntos ya enunciados.

En este punto es interesante anotar los valores obtenidos en las aguas de la Quebrada Santa Elena en las cotas 2540 msnm y 2005 msnm, Muestras TAO-01 y TAO-13. El contenido de Deuterio de ambas muestras es esencialmente igual, lo que implica que el agua aportada en la cuenca por exfiltración desde el macizo entre estas dos cotas tiene el mismo contenido isotópico del agua del Planalto de Santa Elena.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Si se tiene en cuenta la complejidad de los procesos hidrogeológicos, es más prudente afirmar que el agua lluvia infiltrada en el Planalto de Santa Elena es drenada en la parte alta de la ladera hasta una cota por encima de los 2000 msnm, en tanto que el agua lluvia infiltrada en el Valle de San Nicolás es drenada en la parte baja de la ladera por debajo de la cota 2000 msnm. En un intervalo altitudinal, que se encuentra aproximadamente entre las cotas 1900 msnm y 2100 msnm, los manantiales drenan una mezcla de agua lluvia infiltrada en ambas áreas de recarga.



Entre las cotas 2080 msnm y 2540 msnm, los valores de contenido de Deuterio y Oxígeno 18 de los manantiales son aproximadamente constantes y muy cercanos a -85 y -11, que corresponden al contenido isotópico del agua lluvia en el Planalto de Santa Elena. Ya fue anotado que la variación del contenido isotópico del agua de la Quebrada Santa Elena es mínima entre las cotas 2540 msnm, en el planalto y en la cota 2005 msnm en el cruce con la vía Medellín Rionegro, lo que implica que entre estas dos cotas el agua exfiltrada al cauce proviene en su totalidad. El agua de la pequeña quebrada que surte el acueducto comunal de La Bocana tiene el mismo contenido isotópico.

Los sitios donde fueron colectadas las Muestras TAO-02, TAO-04, TAO-06, localizadas por encima de la cota 2340 msnm, corresponden a sitios en los que el manantial se encuentra en una zona de quiebre de pendiente donde es posible la acumulación de agua de escorrentía. El contenido de Deuterio de las muestras colectadas en estos sitios tiene un valor mayor que el del agua del Planalto de Santa Elena.

Entre las cotas 2000 msnm y 2040 msnm, las medias de los valores de contenidos isotópicos se encuentran cercanos a -82,5 y -11,5, lo que indica una fuerte contribución de agua procedente del Valle de San Nicolás. La contribución del Valle de San Nicolás al flujo que aflora en manantiales entre las cotas 2000 msnm y 2040 msnm es aproximadamente de 50% con base en la propiedad aditiva de los contenidos isotópicos. Los manantiales cerca de la cota 1900 msnm presentan un contenido isotópico similar al del agua lluvia en el Valle de San Nicolás, lo que permite definir esta cota como límite de la zona de mezcla de la recarga procedente del Valle de San Nicolás y el Planalto de Santa Elena.

A medida que se desciende en las laderas del Valle de Aburrá, los valores de contenido de isótopos pesados aumentan, lo que puede ser interpretado como un incremento de la contribución de la recarga procedente del Valle de San Nicolás, cuyo contenido es del orden de -80, 11 y la correspondiente disminución del Planalto de Santa Elena.

En la cota 1900 msnm, los valores de contenido isotópico disminuyen hasta valores cercanos a 80 y -11, característicos de la precipitación en el Valle de San Nicolás. Este sería el límite inferior del flujo de agua procedente del Planalto de Santa Elena. Los valores de contenido isotópico que se encuentran en muestras de manantiales en cotas inferiores a 1900 msnm pueden ser explicados por la contribución de la escorrentía y la infiltración de agua lluvia en las laderas del Valle de Aburrá. En este punto debe tenerse en cuenta que estas muestras fueron colectadas sin tener en cuenta las condiciones de lluvia antecedente.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

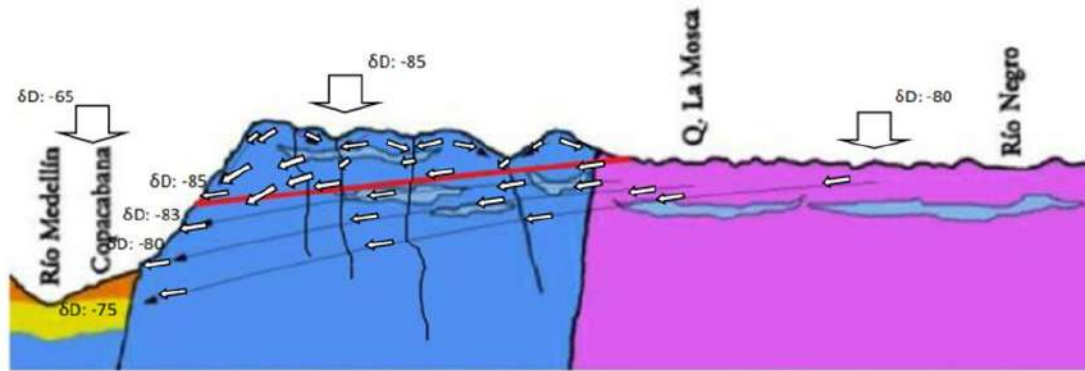
8.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La información disponible permite presentar un modelo conceptual del sistema hidrogeológico que comprende el Planalto de Santa Elena, el Valle de San Nicolás y la vertiente nororiental del Valle de Aburrá, cuya ilustración de encuentra en la Figura 93. Los límites del sistema pueden definirse por las vaguadas de los Ríos Negro y Medellín, las Quebradas Santa Elena, Yarumal y La Mosca.

8.5.1 Zonas de recarga

Las zonas de recarga, en el sistema hidrogeológico que descarga en el Valle de Aburrá, se encuentran por fuera de sus laderas y deben localizarse en los valles y planaltos vecinos localizados en cotas superiores a las del valle mismo y sus vertientes, en el Planalto de Santa Elena y el Valle de La Mosca y la porción occidental del Valle de San Nicolás. La información generada por medio del estudio que se presenta en este informe, permite validar esta afirmación.

El contenido isotópico del agua de los manantiales en la Comuna Nororiental se ajusta al par de valores $\delta D:80$, $\delta^{18}O:11$, que en investigaciones anteriores (Hoyos, 2012) permitieron establecer una discriminación de áreas de recarga del agua subterránea en la vertiente oriental del Valle de Aburrá y definir un flujo regional desde el Planalto de Santa Elena y el Valle de San Nicolás hacia el Valle de Aburrá.



CONVENCIONES








-  Qdl. Depósitos de ladera: limos, gravas, cantos y bloques de roca en la parte inferior de las laderas.
-  Qal. Depósitos aluviales: gravas y arenas, con limo.
-  Kqd. Cuarzodiorita del Batolito Antioqueño.
-  Pam. Anfibolitas de Medellín.
-  Acuíferos salobres.
-  Falla
-  Línea de Flujo



Figura 93. Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá

8.5.2 Caracterización del acuífero

El agua subterránea en este sistema se encuentra en las discontinuidades del macizo rocoso formado por anfibolitas, esquistos, dunitas, serpentinitas y granitoides y puede ser caracterizado como un acuífero confinado cuyo sello está formado por el regolito limoso de suelos residuales y depósitos de vertiente. El coeficiente de permeabilidad del sello, calculada a partir de ensayos de consolidación es del orden de 10^{-9} m/s. El coeficiente de permeabilidad del macizo rocoso, estimado a partir de información de infiltración en túneles excavados en este tipo de rocas, y corroborada con el cálculo de coeficiente de permeabilidad medio de cuencas a partir de caudales mínimos de corrientes, se encuentra entre $5 \cdot 10^{-7}$ m/s en el macizo diaclasado hasta $3 \cdot 10^{-5}$ m/s en zonas de falla.

8.5.3 Flujo regional y flujo local

La distribución del agua lluvia en la superficie y en el subsuelo después de su precipitación es objeto de afirmaciones genéricas, muchas de ellas equivocadas, aun por

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

personas que por su formación podrían entender mejor el fenómeno del flujo subterráneo. En este punto es preciso anotar que la energía que hace mover el agua en el subsuelo es la debida a la atracción gravitacional, y en menor medida la energía térmica que permite la evaporación, y la tensión superficial que da lugar al ascenso capilar y a la retención del agua contra la atracción gravitacional. El flujo del agua libre en el subsuelo es debido en su totalidad a la atracción gravitacional y procede desde puntos donde la energía es mayor a puntos donde ella es menor. En él influyen la distribución de los materiales del subsuelo y sus características hidráulicas y la morfología del terreno. En particular es necesario considerar que la permeabilidad al flujo gravitacional del regolito limoso es muy baja, lo que, combinado con las altas pendientes de las laderas del Valle de Aburrá, hace que la infiltración en ellas sea nula en la práctica.

A escala regional es preciso resaltar el papel de la topografía en el flujo del agua subterránea que es controlado en gran medida por los gradientes y discontinuidades topográficas locales y regionales y cada una de estas categorías determina la escala del flujo del agua subterránea.

En las regiones donde son comunes los valles pequeños y medianos puede definirse un sistema de flujo local cuyo nivel de base está dado por las vaguadas de los valles. Este es el caso de las cuencas de la Quebrada Santa Elena, La Mosca, Honda y Yarumal. A su vez, las divisiones fisiográficas mayores dan lugar a un flujo a escala regional que circula por debajo de las celdas locales que en este caso corresponde al flujo que se establece entre el Altiplano de Rionegro y el Valle de Aburrá. Este sistema complejo de flujos subterráneos a escala local y regional, tiene interés en la medida en que permite introducir un criterio de discriminación en el flujo de agua subterránea.

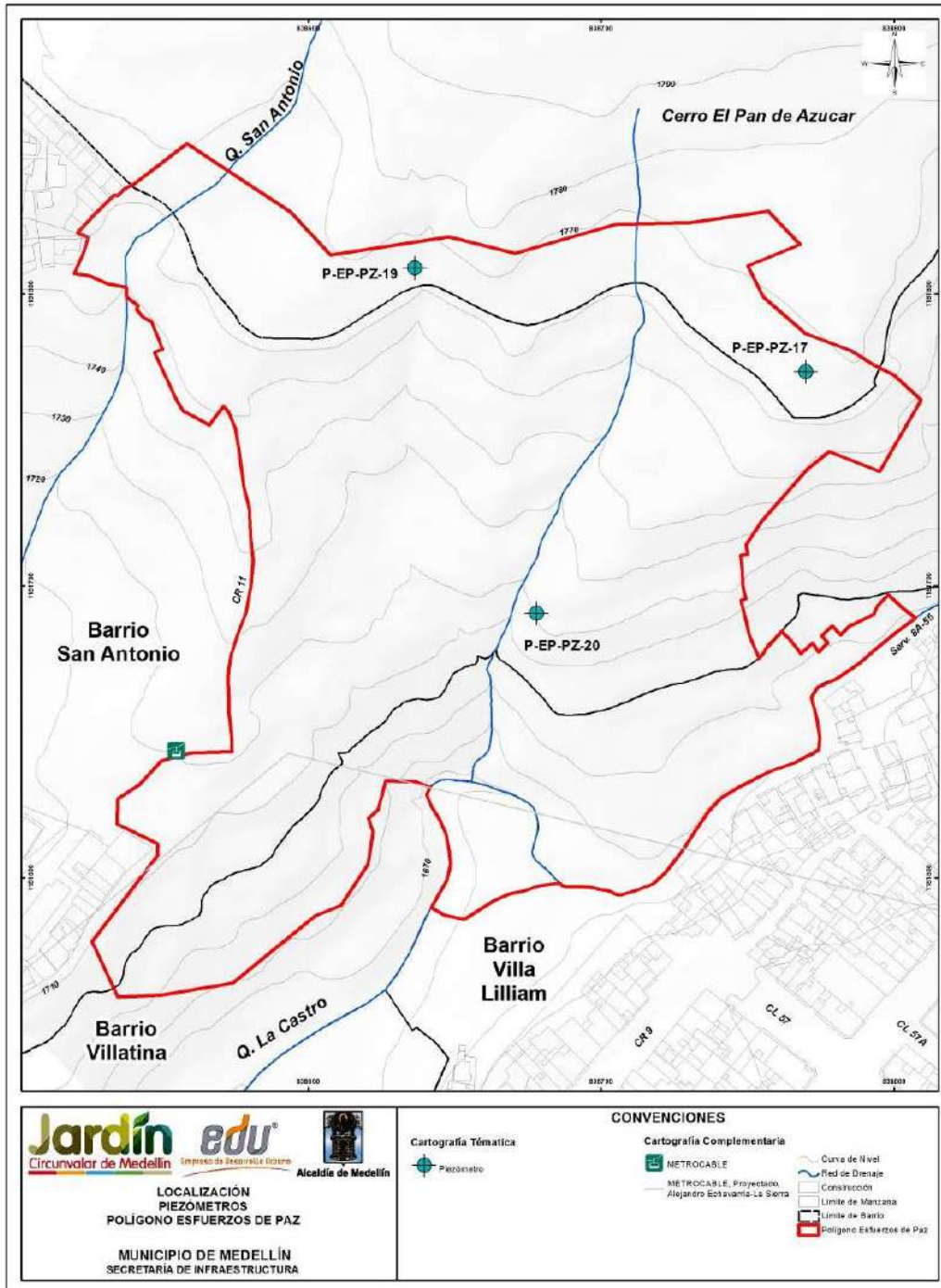
8.5.4 Zonas de descarga

La descarga de agua subterránea tiene lugar a lo largo y ancho de la vertiente. No se cuenta con un inventario de manantiales sistemático en el Valle de Aburrá que permita presentar un patrón de descarga del agua subterránea y su relación con los rasgos estructurales que la controlan. Puede postularse que, si se mantienen iguales las condiciones estructurales, la densidad de afloramientos aumenta a medida que se descende en la ladera, y que en la misma faja altitudinal la densidad de manantiales es función de la densidad de diaclasamiento y el máximo está asociado a las zonas de falla.

En la UMI Esfuerzos de Paz, se hicieron recorridos de campo detallados con el fin específico de levantar los manantiales existentes. De acuerdo con estos recorridos, es posible determinar que en la zona no se tienen manantiales.

8.6 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Con el fin de determinar las condiciones de flujo en los polígonos en estudio del Proyecto Barrios Sostenibles se instalaron piezómetros de alambre vibrátil. Los piezómetros fueron localizados en las Perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-19 y P-EP-PR-20 realizadas en el Polígono Esfuerzos de Paz (Mapa 22).



Mapa 22. Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil (EDPInstrumentacion_Medellin_C)

Los piezómetros instalados fueron denominados como Piezómetros P-EP-PZ-17B, P-EP-PZ-17D, P-EP-PZ-19B, P-EP-PZ-19D, P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D, como se muestra en la Figura 94.

Estos equipos registran una lectura que se relaciona directamente con la frecuencia de vibración de un alambre debido a la presión ejercida por el agua en sus alrededores. Esta frecuencia se usa para calcular las presiones de poros o la altura de la lámina de agua por encima de la cota de instalación del equipo o la profundidad del nivel freático o la cota piezométrica. El cálculo de la presión de poros con base en la frecuencia de vibración del alambre se hace por medio de ecuaciones de calibración suministradas por el fabricante.

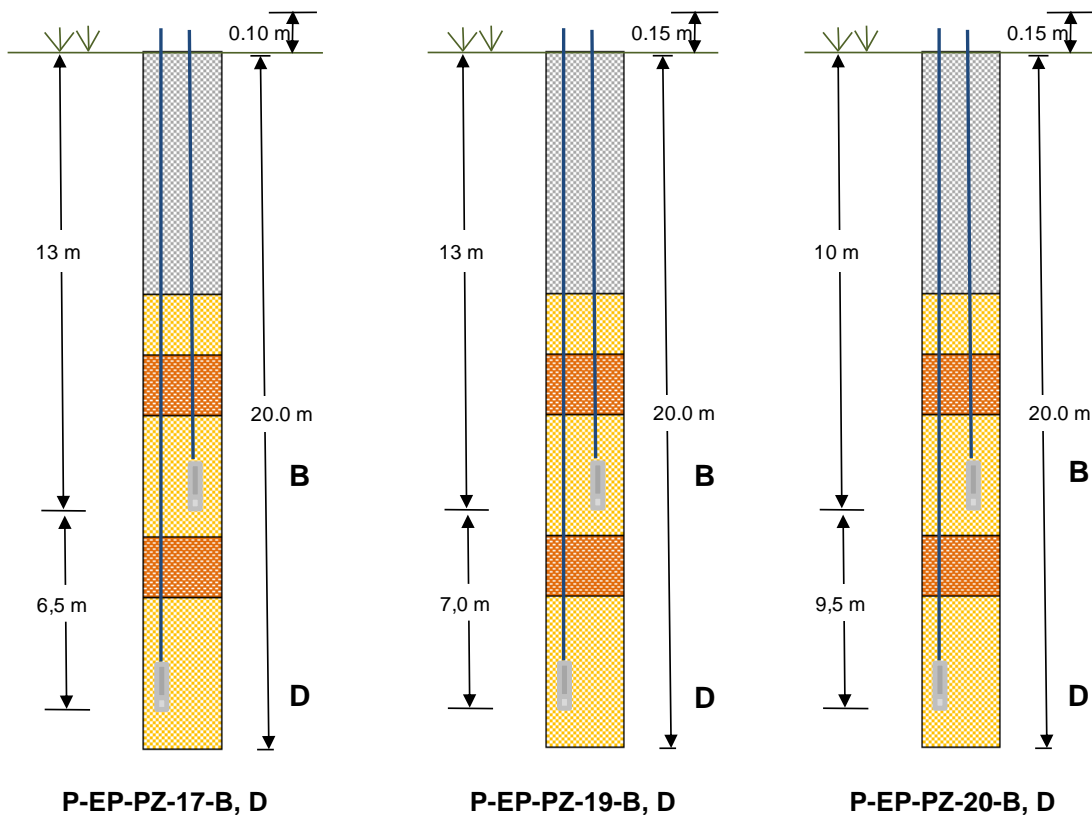


Figura 94. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil

Se debe entender entonces a la cota piezométrica como la suma de la cabeza de posición, es decir, la cota de instalación con respecto al nivel del mar (z) y la cabeza de presión, es decir, la presión de poros dividida por el peso unitario del agua (u/γ_w):

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

De estos equipos se vienen haciendo lecturas continuas de las presiones de poros, valores con base en los cuales se calculan las correspondientes cotas piezométricas. En los siguientes tres numerales se presentan y discuten las gráficas de variación de dichas cotas piezométricas con el tiempo para cada uno de estos piezómetros. En cada una de estas gráficas, las líneas continuas corresponden a la cota de instalación del equipo y las líneas discontinuas corresponden a las cotas piezométricas. La cabeza de presión es entonces la diferencia entre la cota de instalación y la cotas piezométrica.

En el Anexo 10 se presenta la carta de calibración, el acta de verificación de la calibración y el acta de instalación, de cada uno de los piezómetros instalados en el Polígono Esfuerzos de Paz.

8.6.1 Piezómetros P-EP-PZ-17B y P-EP-PZ-17D

La Figura 95 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EP-PZ-17B y P-EP-PZ-17D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IC de Batolito Antioqueño.

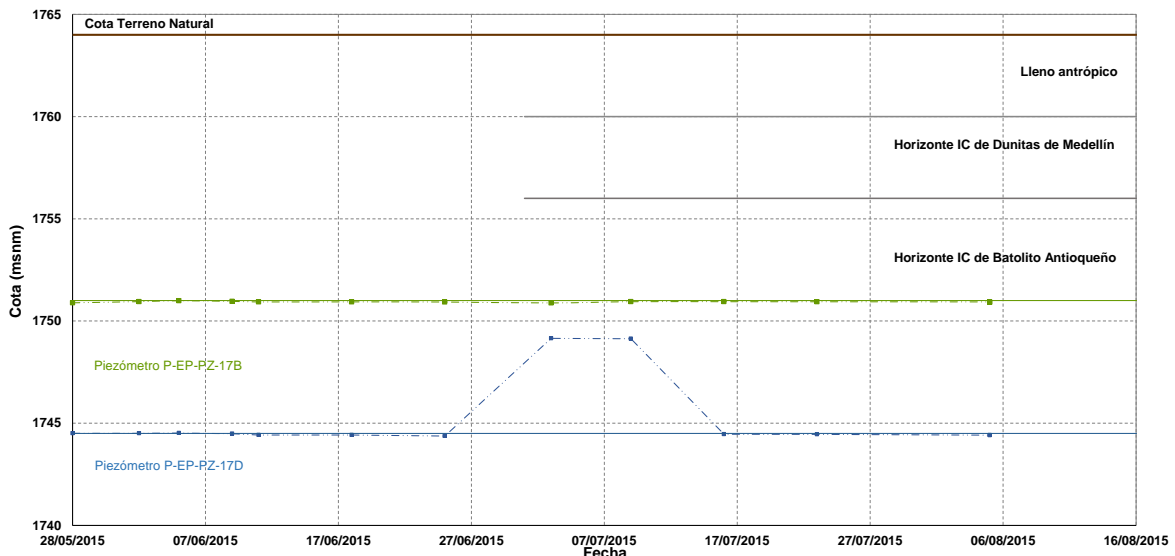


Figura 95. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-17B y P-EP-PZ-17D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EP-PR-17, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

Solamente en el caso del Piezómetro P-EP-PZ-17D se tienen dos aparentes ascensos en las cotas piezométricas en junio y julio de 2015, valores que se consideran imprecisiones en las lecturas.

8.6.2 Piezómetros P-EP-PZ-19B y P-EP-PZ-19D

La Figura 96 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EP-PZ-19B y P-EP-PZ-19D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IC de Batolito Antioqueño.

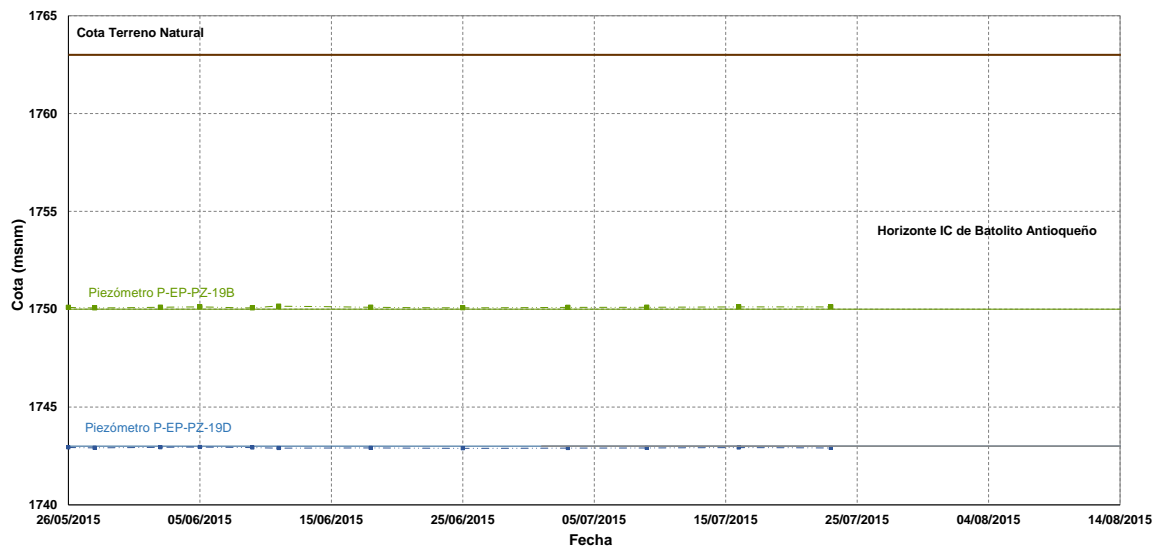


Figura 96. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-19B y P-EP-PZ-19D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EP-PR-19, vale la pena destacar el hecho de que no se registró nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

8.6.3 Piezómetros P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D

La Figura 97 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IC de Batolito Antioqueño.

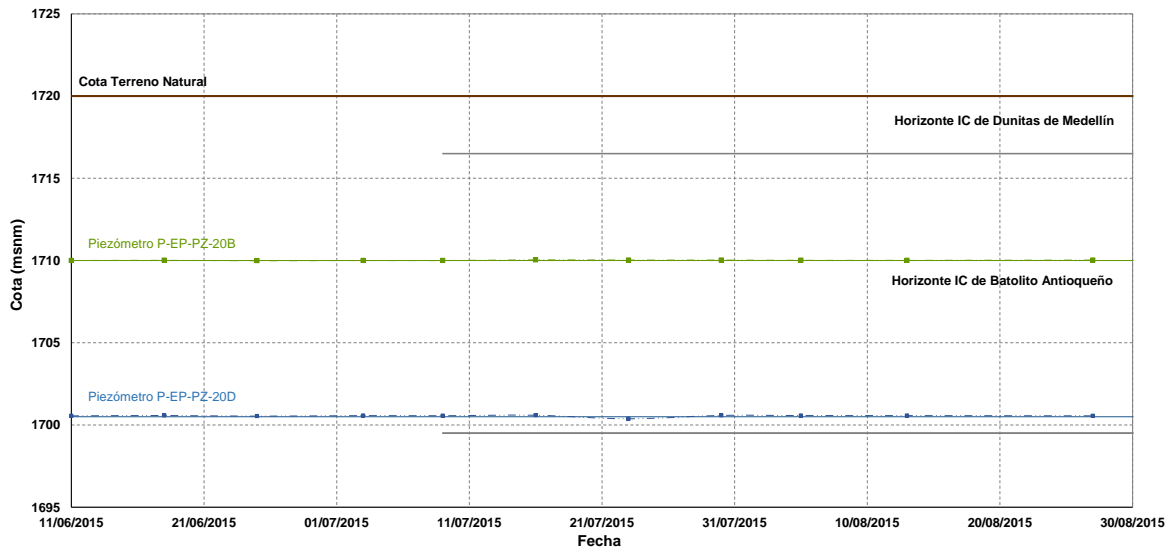


Figura 97. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EP-PZ-20B y P-EP-PZ-20D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EP-PR-20, vale la pena destacar el hecho de que el nivel freático reportado en la mañana, fue de 4 m de profundidad. Sin embargo, de acuerdo con los registros del piezómetro obtenidos hasta el momento, se puede establecer que no se tiene un nivel freático debido a que los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

8.6.4 Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto

El modelo hidrogeológico propuesto, ha citado dos tipos de flujo. En primer lugar, el flujo local cuyo nivel de base está dado por las vaguadas de los valles, siendo este el caso de las cuencas de la Quebrada Santa Elena, La Mosca, Honda y Yarumal. A su vez, las divisiones fisiográficas mayores dan lugar a un flujo a escala regional que circula por debajo de las celdas locales que en este caso corresponden al flujo que se establece entre el Altiplano de Rionegro y el Valle de Aburrá.

La instrumentación instalada en la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, no parece haber ayudado a ratificar estas afirmaciones. Los piezómetros no interceptaron el flujo subterráneo regional y tampoco el flujo local.

Las condiciones de flujo del agua subterránea en el Polígono Esfuerzos de Paz pueden ser esquematizadas en la red de flujo que se presenta en la Figura 98.

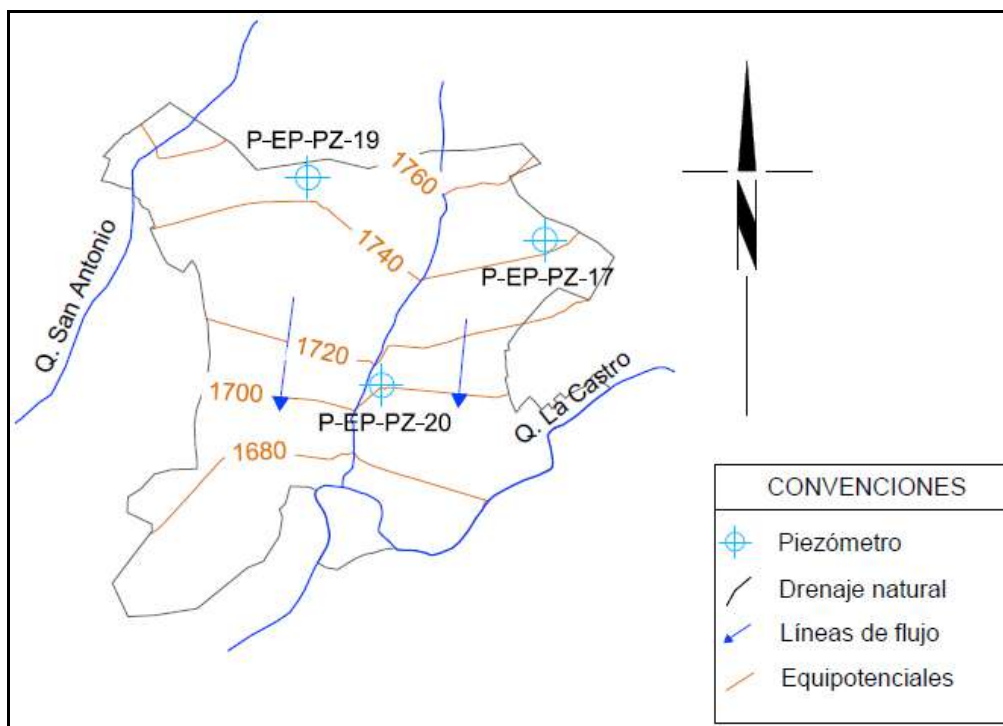




Figura 98. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono Esfuerzos de Paz

Las líneas equipotenciales fueron definidas a partir las líneas de drenaje superficial con corrientes permanentes (Quebradas La Castro y La Castro 1), bajo la suposición razonable de que ellas corresponden a la intersección del nivel freático con la superficie del terreno. Ellas siguen de manera aproximada la topografía del terreno. Las líneas de flujo, a su vez, fueron trazadas ortogonalmente a las líneas equipotenciales, con las líneas de drenaje de las corrientes permanentes utilizadas como control físico para su trazado geométrico.

8.7 AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Algunos movimientos en masa en laderas de alta montaña, pueden ser explicados como un proceso de falla progresiva en razón de las condiciones hidrogeológicas particulares del medio en el que el regolito limoso de baja permeabilidad constituye el sello o acuicludo del acuífero confinado formado por el basamento rocoso. La presión hidrostática en el techo del basamento puede alcanzar una magnitud capaz de fracturar el manto de regolito, lo que inicia un proceso de falla progresiva.

Los análisis de estabilidad de taludes y laderas se basan en modelos en los que se hace un balance de fuerzas/momentos motores versus fuerzas/momentos resistentes. Cualquier elemento externo (sobrecargas, cargas dinámicas, estructuras de contención, elementos de refuerzo, etc.) es integrado al sistema que queda reducido a un sistema cerrado cuyo equilibrio es calculado en forma iterativa.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

La presión artesiana en las laderas de alta montaña ha sido una variable pasada por alto en el análisis de estabilidad de taludes y laderas. Los esfuerzos asociados a la presión artesiana en la base del manto del suelo que suprayace el macizo rocoso fracturado en las laderas de alta montaña es un elemento externo que bien puede explicar algunos movimientos de masa. Un incremento excepcional de dicha presión o la disminución de la carga del regolito sobre el macizo rocoso debido al efecto de la erosión secular o a cortes del terreno, pueden dar lugar al desequilibrio de fuerzas que dé lugar a la ruptura desencadenando un proceso de movimiento de masa.

En las laderas de alta pendiente, donde el regolito limoso constituye el sello impermeable sobre el acuífero confinado del basamento rocoso, debe considerarse una condición adicional de estabilidad: la resistencia mecánica del sello impermeable debe ser mayor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del acuífero. Esta es una condición necesaria de estabilidad. Cuando la resistencia mecánica del sello impermeable sea menor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del acuífero habrá lugar para que se rompa el sello y se inicie un proceso de falla progresiva (Hoyos, 1990, 1992, 2006).

A partir de estas consideraciones, puede proponerse como mecanismo de falla un proceso falla progresiva (Skempton, 1964) que puede presentarse donde un manto de regolito con baja permeabilidad suprayace al basamento rocoso, de manera que este constituye un acuífero confinado en cuyo techo el agua puede encontrarse a presión mayor que la presión atmosférica. El mecanismo de falla es ilustrado en Figura 99 y en la Figura 100.

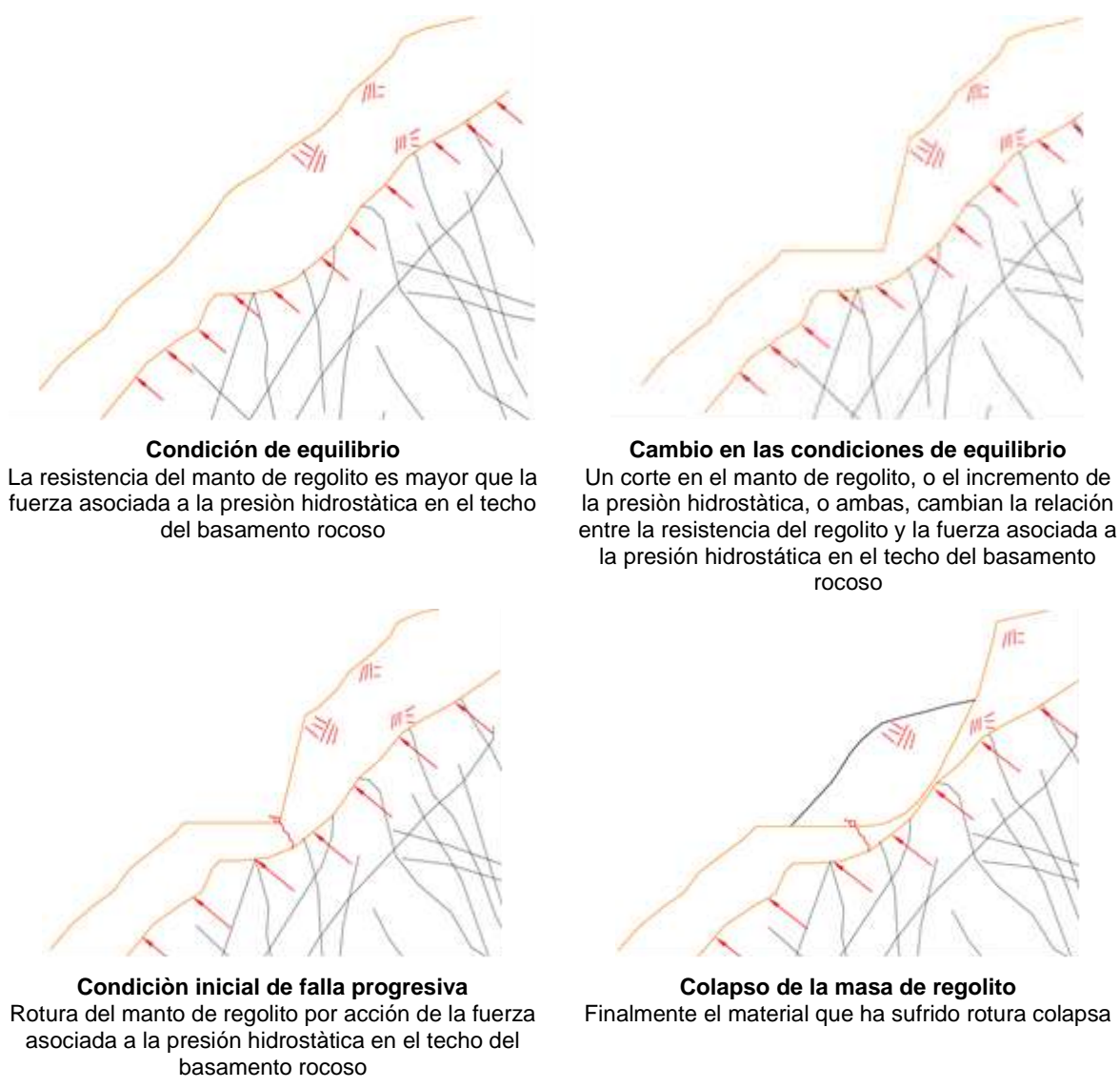
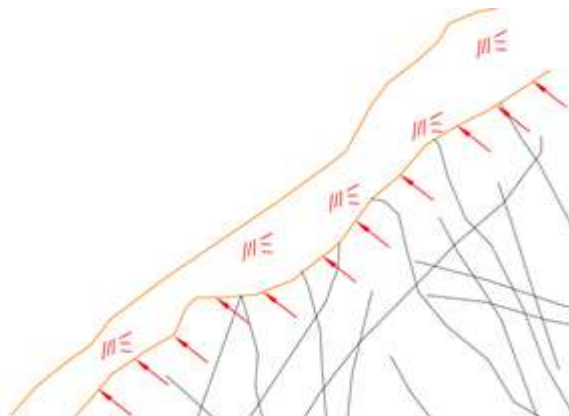


Figura 99. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica



Condición de equilibrio

La resistencia del manto de regolito es mayor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



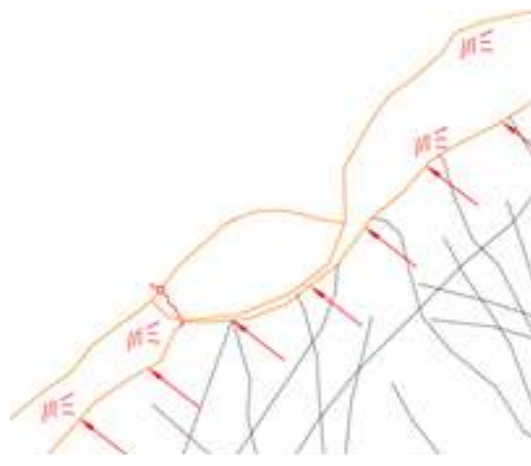
Cambio en las condiciones de equilibrio

Una disminución del espesor del manto de regolito por erosión secular, o el incremento de la presión hidrostática, o ambas, cambian la relación entre la resistencia del regolito y la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



Condición inicial de falla progresiva

Rotura del manto de regolito por acción de la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso





Colapso de la masa de regolito

Finalmente el material que ha sufrido rotura colapsa

Figura 100. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica

Dicho mecanismo puede ser descrito en términos de los eventos enumerados y descritos a continuación:

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

- ✓ Disminución del espesor del regolito hasta el punto en que la resistencia del manto de regolito es menor que la fuerza generada por la presión hidrostática en el techo del acuífero.
- ✓ Aumento del nivel piezométrico hasta el punto en que la resistencia del manto de regolito es menor que la fuerza generada por la presión hidrostática en el techo del acuífero.
- ✓ El manto de regolito, sometido a tensión, sufre una primera fractura o conjunto de fracturas que pueden permitir el drenaje de agua desde el acuífero hasta superficie.
- ✓ La fractura inicial constituye una zona de debilidad a partir de la cual se inicia un proceso de falla progresiva (Skempton, 1964).
- ✓ Colapso de la masa de suelo. La geometría de la superficie de deslizamiento puede ser esferoidal, poliédrica o en cuña, dependiendo de las condiciones particulares del terreno.

En el caso de la UMI Esfuerzos – Villa Turbay, la amenaza por deslizamientos producto del modelo hidrogeológico propuesto se descarta. Esto, principalmente porque las presiones generadas por el flujo subterráneo que se pueden esperar, comparada con la de la carga que representa el regolito, son bajas a nulas. Aunque se descarta la amenaza por deslizamientos producto del modelo hidrogeológico propuesto, se considera necesario continuar con el monitoreo de los piezómetros instalados en la zona de estudio. Es importante determinar si ascienden los niveles freáticos regionales en temporadas lluviosas.

9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 101 presenta el mapa de zonas homogéneas de la Microzonificación Sísmica de Medellín y sobre este se han superpuesto los respectivos polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, destacándose en este caso en particular el Polígono Esfuerzos de Paz.

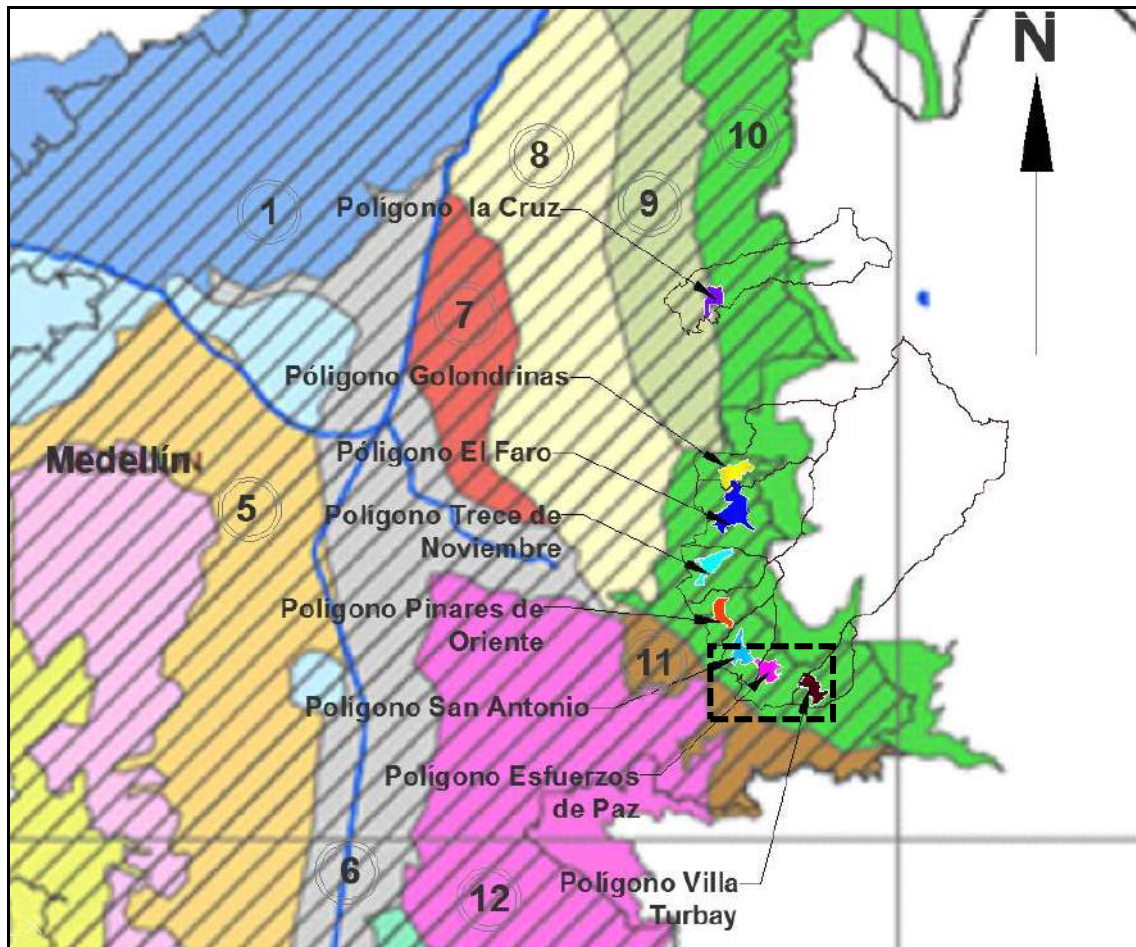




Figura 101. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)

Se puede observar que desde el punto de vista de la sismica, los Polígonos El Faro, Golondrinas, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay con sus respectivas UMI, que hacen parte del proyecto de Barrios Sostenibles y que son objeto de estudio, se encuentran localizados según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (MZSM, 1999) sobre la Zona

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Homogénea 10, la cual corresponde a los suelos residuales de las Dunitas de la parte alta.

El Polígono La Cruz, que también hace parte del proyecto de Barrios Sostenibles, se encuentra ubicado entre las Zonas Homogéneas 9 y 10. Según la MZSM (1999), la Zona Homogénea 9 corresponde a los suelos residuales de la anfibolita y según la geología local del Polígono, las unidades geológicas encontradas corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín, por lo tanto, en el Polígono La Cruz prevalece la Zona Homogénea 10.



El Polígono Esfuerzos de Paz, objeto principal del estudio presentado en este informe, se encuentra en su totalidad dentro de la denominada Zona Homogénea 10. Esta zona homogénea limita al norte con el municipio de Bello al occidente con las Zonas Homogéneas 8 y 9, al sur con la Quebrada Santa Elena, y al oriente con la frontera urbana de la ciudad de Medellín.

La Zona Homogénea 10 cubre en el sector de la Comuna 1 (Popular) los Barrios La Avanzada, parte de Santo Domingo Savio No. 1 y No. 2, La Esperanza No.2, Carpinelo, Aldea Pablo VI, El Compromiso y parte de Granizal. En el sector de la Comuna 3 (Manrique) los Barrios San José La Cima No. 1 y No. 2, María Cano Carambola, Bello Oriente, La Cruz, Versalles No. 2. Finalmente, en el sector de la Comuna 8 (Villa Hermosa) los barrios Llanaditas, Los Mangos, El Pinal, Trece de Noviembre, La Libertad, Pinares de Oriente, Villa Tina, San Antonio, Esfuerzos de Paz, Villa Turbay, Villa Liliam, Santa Lucía, Las Estancias y parte del Batallón Girardot, La Ladera y Sucre.

Para la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín en su descripción de las Zonas Homogéneas, los terrenos de la Zona Homogénea 10 están constituidos predominantemente por Dunitas muy fracturadas debido a efectos tectónicos como se describió previamente en los aspectos geológicos locales (Capítulo), las cuales aparecen cubiertas en forma local por depósitos coluviales. En estos terrenos predominan los afloramientos de carácter rocoso como consecuencia del lavado por escorrentía de las capas de suelo, proceso favorecido por la fuerte pendiente y el escaso espesor o desarrollo de los mismos. Los suelos residuales de las Dunitas se presentan en sectores localizados de relieve suave.

En las vertientes modeladas sobre las Dunitas, caracterizadas por sus declives entre empinados y escarpados, se presentan formas típicas del relieve de la zona que corresponden a lomos o narices topográficas de extensión variable con topes desde suaves y redondeados hasta casi planos, flanqueados por laderas empinadas. Estos aparecen a manera de peldaños o escalones colgados sobre estas vertientes.

En el Numeral 4.2 se presentan los perfiles geológico-geotécnicos generales determinados con base en la exploración disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo. En la UMI en estudio, las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA) y de las Anfibolitas de Medellín (TRaM).

 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Todas estas unidades son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos aluviotorrenciales (Qalt), depósito de talus (Qt) y depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En el Mapa 7 y Mapa 8 se presentaron los perfiles estratigráficos representativos.

La Tabla 26 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). Así las cosas, se puede establecer que el perfil geológico general de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

Tabla 26. Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10

Perfil	Materiales	Sigla	Espesores (m)
1	Depósitos coluviales	Qc	0 – 15
	Flujos de lodos y/o escombros frescos	Qff	0 – 30
	Dunitas de Medellín	KuM - SuM	10 – 30
2	Depósitos coluviales	Qc	5
	Flujos de lodos y/o escombros frescos	Qff	5
	Stock de las Estancias	KcE - ScE	20
3	Dunitas de Medellín	SuM	5
	Dunitas de Medellín	KuM	51
	Anfibolitas Margen Derecha	KaM	-
4	Depósitos Coluviales	Qc	10
	Dunitas de Medellín	SuM – KuM	22
	Anfibolitas margen Derecha	KaM	-

Teniendo en cuenta lo anterior, las construcciones y edificaciones de cualquier índole que se levanten sobre la Zona Homogénea 10, deberán considerar para tal efecto el espectro para los sismos de servicio (fracción de amortiguamiento crítico del 2%) y de diseño (fracción de amortiguamiento crítico del 5 %), de acuerdo con el espectro generalizado.

El coeficiente espectral para la Zona Homogénea 10 para el sismo de diseño corresponde a 0.38g la aceleración de la gravedad el cual corresponde a un sismo de diseño para periodo de retorno de 475 años (Tabla 27).

Tabla 27. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños

Zona Homogénea	Sismo de control de daños						Sismo de diseño					
	a_{Smax}	F_a	$S_{amax/l}$	T_0	T_c	α	a_{Smax}	F_a	$S_{amax/l}$	T_0	T_c	α
1	0.05	4.50	0.23	0.10	0.50	1.43	0.27	2.60	0.70	0.10	0.60	1.34
2	0.08	2.80	0.22	0.10	0.30	1.17	0.34	2.35	0.80	0.10	0.40	1.17
3	0.07	3.57	0.25	0.10	0.50	1.48	0.30	2.66	0.80	0.20	0.70	1.52
4	0.05	3.60	0.18	0.10	0.60	1.46	0.23	2.17	0.50	0.10	0.65	1.22
5	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
6	0.05	2.81	0.14	0.10	0.40	1.11	0.20	2.50	0.50	0.10	0.50	1.07
7	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
8	0.08	2.25	0.18	0.10	0.65	1.52	0.23	2.40	0.55	0.10	0.75	1.37
9	0.06	3.75	0.23	0.10	0.40	1.31	0.26	2.70	0.70	0.10	0.55	1.28
10	0.09	2.78	0.25	0.10	0.40	1.35	0.38	2.10	0.80	0.10	0.50	1.29
11	0.06	3.75	0.23	0.10	0.50	1.43	0.26	2.88	0.75	0.10	0.65	1.43
12	0.06	4.16	0.25	0.10	0.65	1.67	0.26	3.07	0.80	0.15	0.70	1.52
13	0.06	4.16	0.25	0.10	0.40	1.35	0.26	3.07	0.80	0.10	0.50	1.29
14	0.05	2.81	0.14	0.10	0.50	1.23	0.20	3.00	0.60	0.10	0.55	1.21

No obstante, la magnitud del coeficiente establecido es alto, por lo que se recurrirá a trabajar con magnitudes de este coeficiente no menores a 2/3, equivalente a un coeficiente espectral de 0.25 g.

10. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

10.1 SONDEOS EXPLORATORIOS

Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron sondeos profundos y líneas geofísicas, los cuales fueron localizados en función del modelo geológico-geotécnico que debía determinarse. Se tuvo en cuenta además la ubicación de los sondeos existentes en los estudios recopilados.

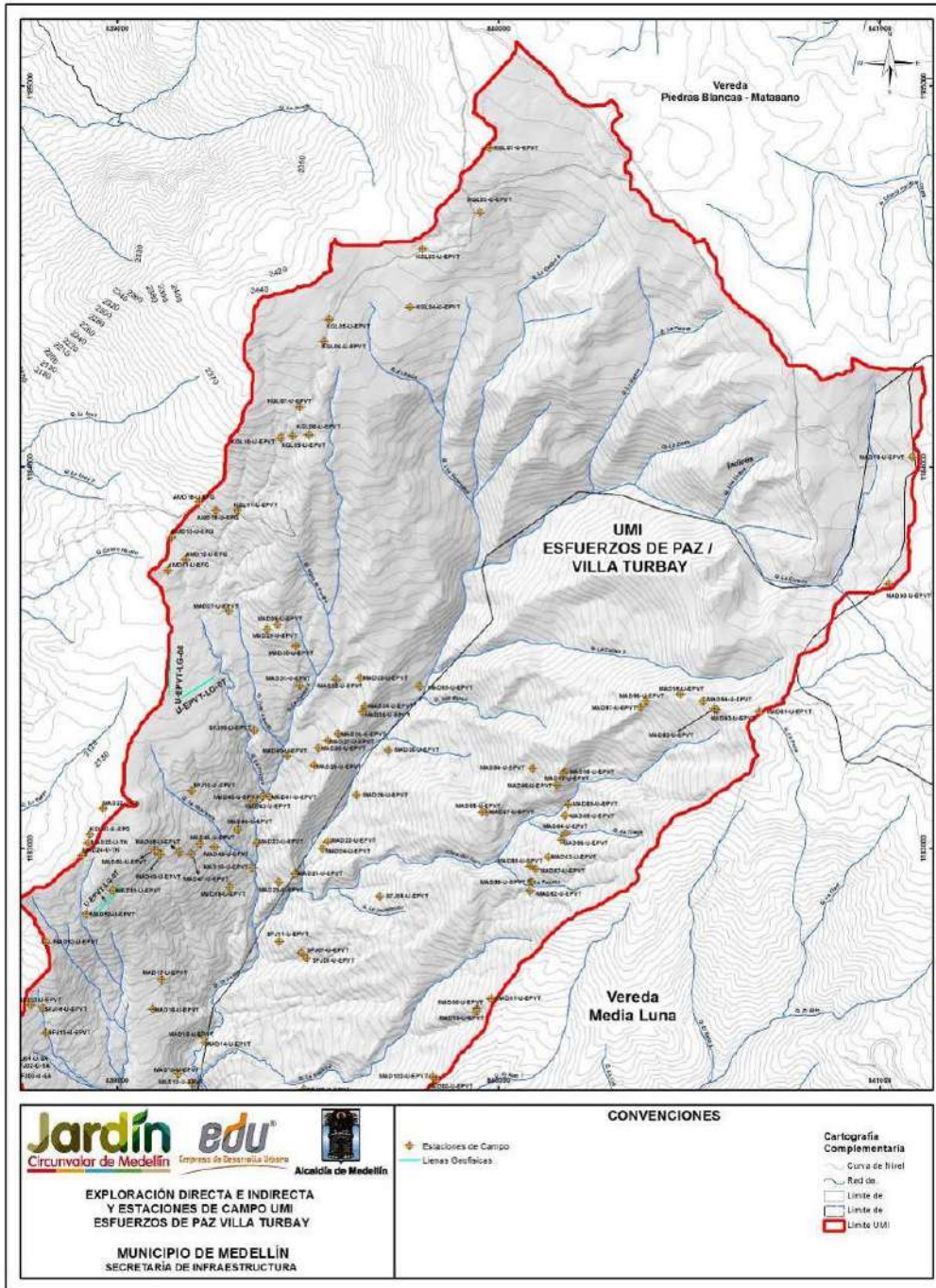
El Mapa 23 y el Mapa 24 presentan la localización de la exploración considerada para la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay. Se pueden observar los sondeos tanto de tipo directo (perforaciones) como indirecto (líneas de geofísica), que en conjunto conforman un sistema de exploración que cubre ampliamente la zona de estudio a nivel local y regional.

10.1.1 Perforaciones

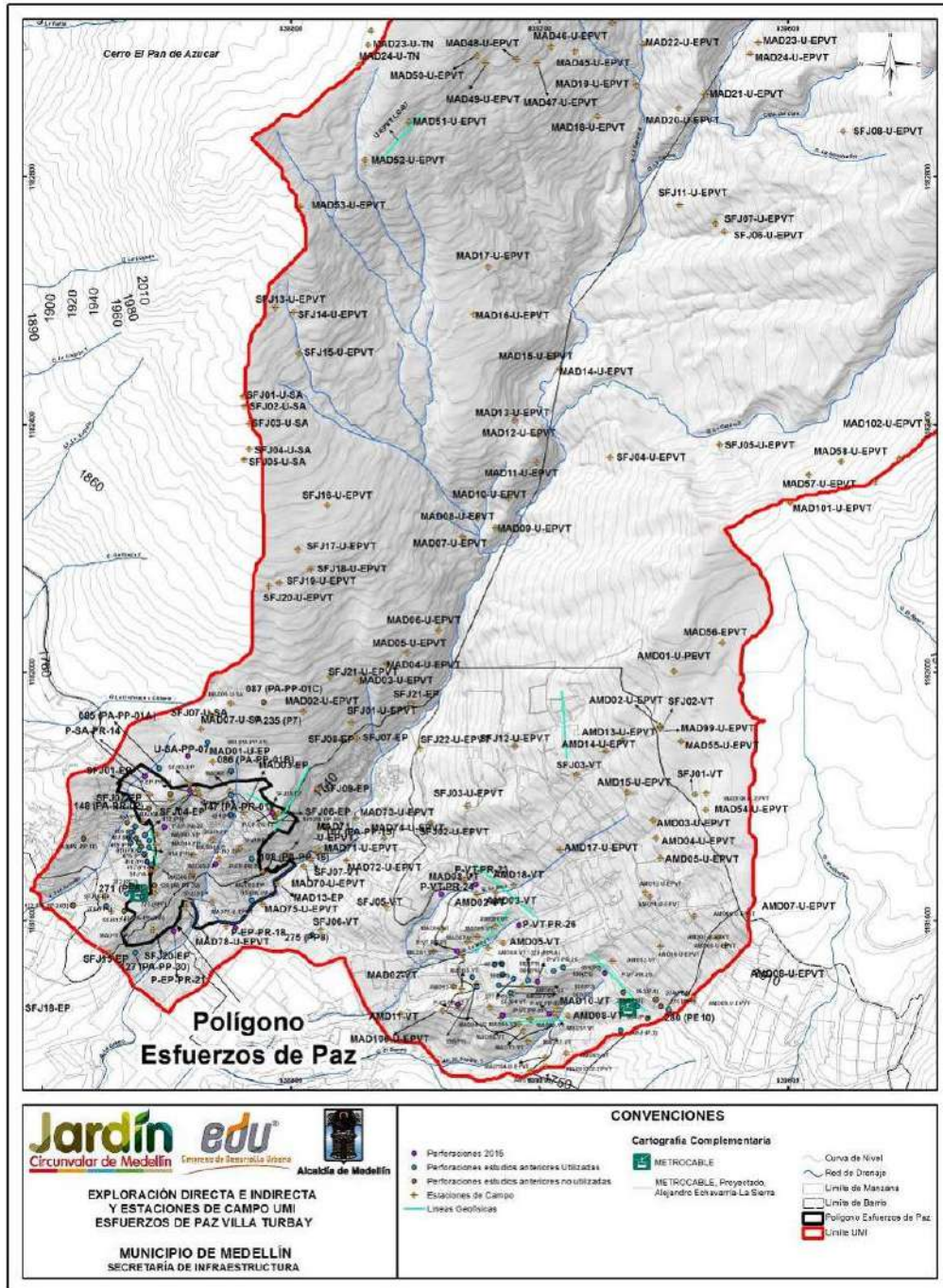
En la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay se realizaron en total trece perforaciones a rotación, seis dentro del Polígono Esfuerzos de Paz correspondientes a las Perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-19, P-EP-PR-20, P-EP-PR-21 y P-EP-PR-22, y siete dentro del Polígono Villa Turbay correspondientes a las Perforaciones P-VT-PR-20, P-VT-PR-21, P-VT-PR-22, P-VT-PR-23, P-VT-PR-24, P-VT-PR-25 y P-VT-PR-26. Además se realizaron cuatro perforaciones a percusión denominadas P-VT-PP-01, P-VT-PP-02, U-EP-PP-02 y U-EP-PP-03 (Mapa 24).

Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI también fue considerada la información obtenida de treinta y un perforaciones realizadas en estudios anteriores por INCIGAM (2015), DEACIVIL (2014), INTEINSA (2011) y TECNISUELOS-ICC (2010). Las perforaciones correspondientes a cada estudio son presentadas en la Tabla 28. En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el y proyecto los de estudios anteriores que fueron considerados.

En la Tabla 28 se presenta la profundidad alcanzada, el nivel freático, la cota del terreno y las coordenadas de cada una de las perforaciones tenidas en cuenta en el presente estudio.



Mapa 23. Localización de la exploración directa e indirecta (13_EDPExploracion_Medellin_C y 13_EDPExploracion_Medellin_T)



Mapa 24. Localización de la exploración directa e indirecta (Continuación)
(13A_EDPExploracion_Medellin_C y 13A_EDPExploracion_Medellin_T)



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 28. Exploración geotécnica utilizada en la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay

Perforación	Prof. (m)	Prof. N.F. (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte	
Prectooy (2015)	P-EP-PR-17	20.0	Seco	1766	838770.009	1181773.268
	P-EP-PR-18	25.0	7.0	1682	838710.033	1181587.304
	P-EP-PR-19	20.0	Seco	1763	838636.537	1181808.762
	P-EP-PR-20	20.5	4.0	1721	838629.675	1181694.743
	P-EP-PR-21	25.0	4.0	1674	838611.429	1181582.174
	P-EP-PR-22	20.5	Seco	1742	838595.904	1181750.705
	U-EP-PP-02	13.45	Seco	2166	839116.142	1183484.140
	U-EP-PP-03	9.90	Seco	2120	838902.453	1182956.968
	P-VT-PR-20	20.0	Seco	1816	839304.646	1181514.178
	P-VT-PR-21	20.0	Seco	1804	839196.455	1181500.143
	P-VT-PR-22	25.0	Seco	1755	839068.550	1181464.078
	P-VT-PR-23	20.0	6.0	1770	839100.988	1181664.818
	P-VT-PR-24	20.0	6.0	1747	839045.076	1181639.530
	P-VT-PR-25	14.0	Seco	1750	839066.942	1181549.893
	P-VT-PR-26	25.0	9.0	1790	839166.653	1181591.674
	P-VT-PP-01	9.50	Seco	1764	839140.132	1181445.712
P-VT-PP-02	8.30	Seco	1766	839215.704	1181449.090	
Inteinsa (2011)	050 (P1)	25.00	Seco	1812	839222.626	1181517.645
	051 (P2)	21.20	Seco	1814	839238.175	1181523.043
	052 (P3)	24.40	Seco	1804	839330.343	1181421.257
Deacivil (2014)	084 (PA-PP-01)	8.45	Seco	1796	838665.469	1181887.022
	085 (PA-PP-01A)	8.45	Seco	1766	838587.303	1181844.908
	086 (PA-PP-01B)	8.45	Seco	1779	838703.515	1181840.082
	108 (PA-PP-16)	7.45	Seco	1720	838736.763	1181699.289
	119 (PA-PP-25)	5.45	4.95	1683	838736.757	1181631.355
	127 (PA-PP-30)	5.45	Seco	1680	838549.171	1181546.562
	147 (PA-PR-01)	25.00	10.0	1761	838703.207	1181801.697
Tecnisuelos ICC (2010)	270 (PP-6)	15.50	12.0	1704	838502.555	1181622.040
	271 (PE-6)	9.20	Seco	1718	838535.139	1181643.154
	272 (PE-7)	13.45	Seco	1720	838542.236	1181655.315
	273 (PP-7)	15.45	10.0	1718	838559.723	1181637.632
	275 (PP-8)	20.00	Seco	1704	838834.022	1181576.184



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 28. Exploración geotécnica utilizada en la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay

Perforación		Prof. (m)	Prof. N.F. (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
Tecnisuelos ICC (2010)	277 (PP-9)	13.45	Seco	1793	839158.237	1181505.799
	278 (PP-9A)	8.45	Seco	1802	839183.797	1181503.545
	279 (PP-10)	13.45	Seco	1820	839357.604	1181460.791
	280 (PE-10)	15.45	Seco	1836	839408.173	1181455.353
Incigam 2015	405 (P2)	6.50	Seco	1739	838548.970	1181751.426
	406 (P3)	7.50	Seco	1733	838542.723	1181741.165
	407 (P4)	7.50	Seco	1728	838537.897	1181732.589
	409 (P6)	7.50	Seco	1725	838541.259	1181724.380
	410 (P7)	7.50	Seco	1730	838555.213	1181724.409
	411 (P8)	8.50	Seco	1726	838555.561	1181713.473
	412 (P9)	12.50	Seco	1738	838564.853	1181737.416
	413 (P10)	10.50	Seco	1739	838571.201	1181728.335
	414 (P11)	11.50	Seco	1736	838570.332	1181717.120
	415 (P12)	9.50	Seco	1730	838564.121	1181706.539
	416 (P13)	10.50	Seco	1730	838568.144	1181694.091
417 (P14)	8.50	Seco	1732	838574.677	1181689.943	

De la Figura 102 a la Figura 116 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos, a excepción de las perforaciones P-VT-PR-21, P-VT-PR-25 y 147 (PA-PR-01) en las que no se realizó el ensayo de penetración estándar. Adicionalmente, se ha incluido en las figuras la estratigrafía y la profundidad del nivel freático donde fue detectado. Luego de presentadas estas figuras, se hacen algunos comentarios generales de interés sobre la estratigrafía que pudo ser determinada con base en estos sondeos. La descripción efectuada corresponde con la descripción geológica de los materiales presentada en el Numeral 4.2 de este informe.

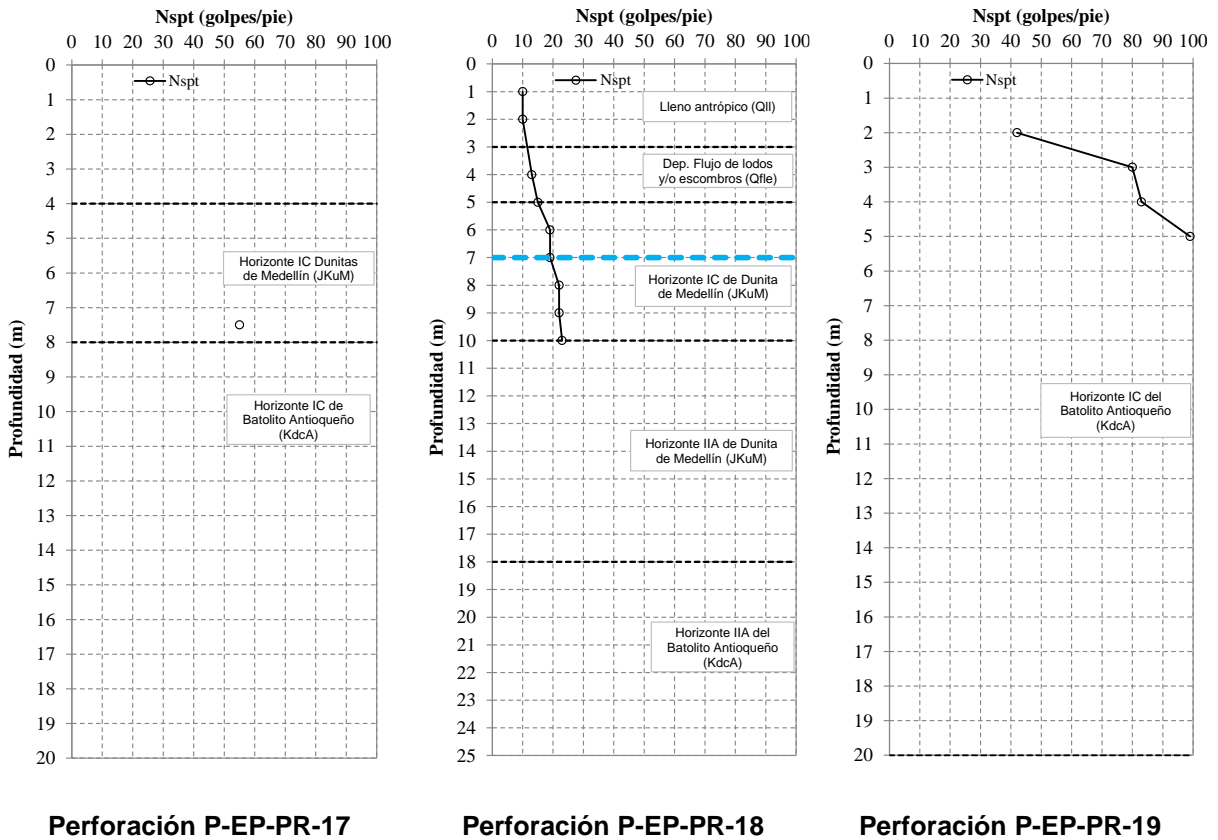


Figura 102. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay

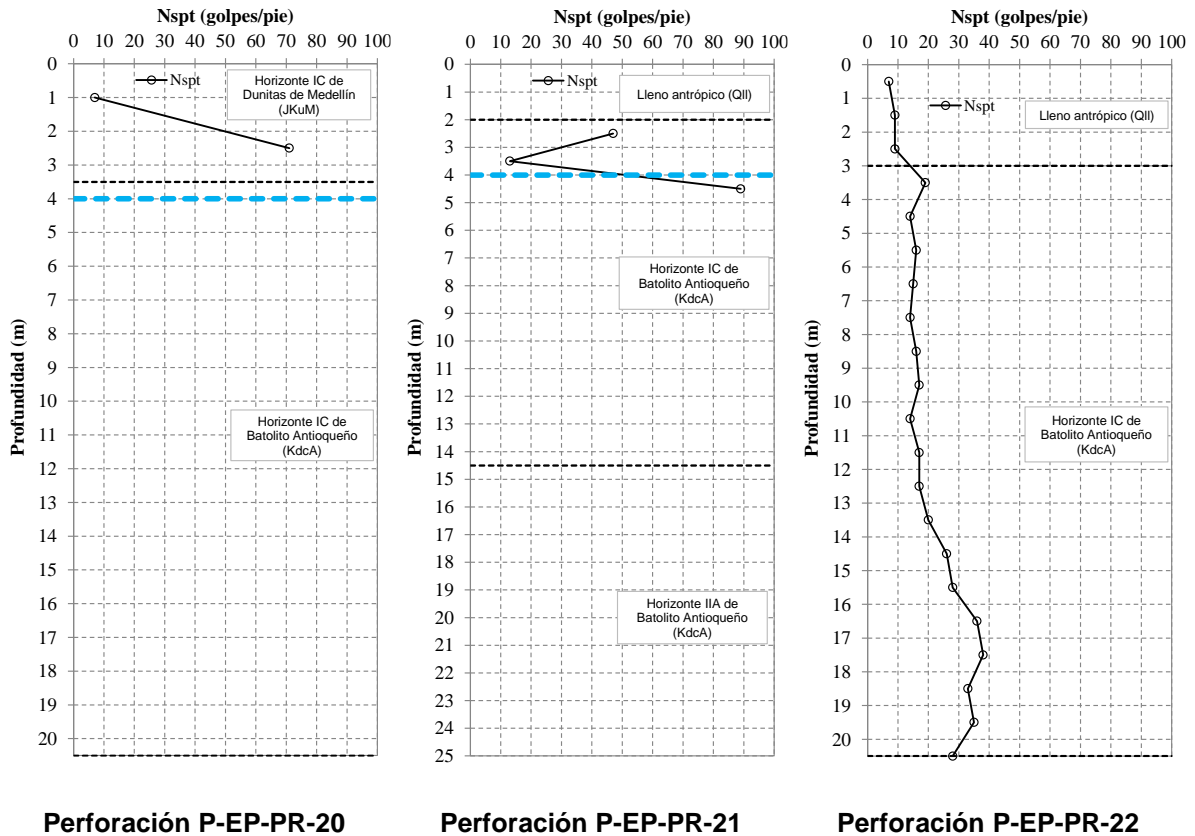


Figura 103. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

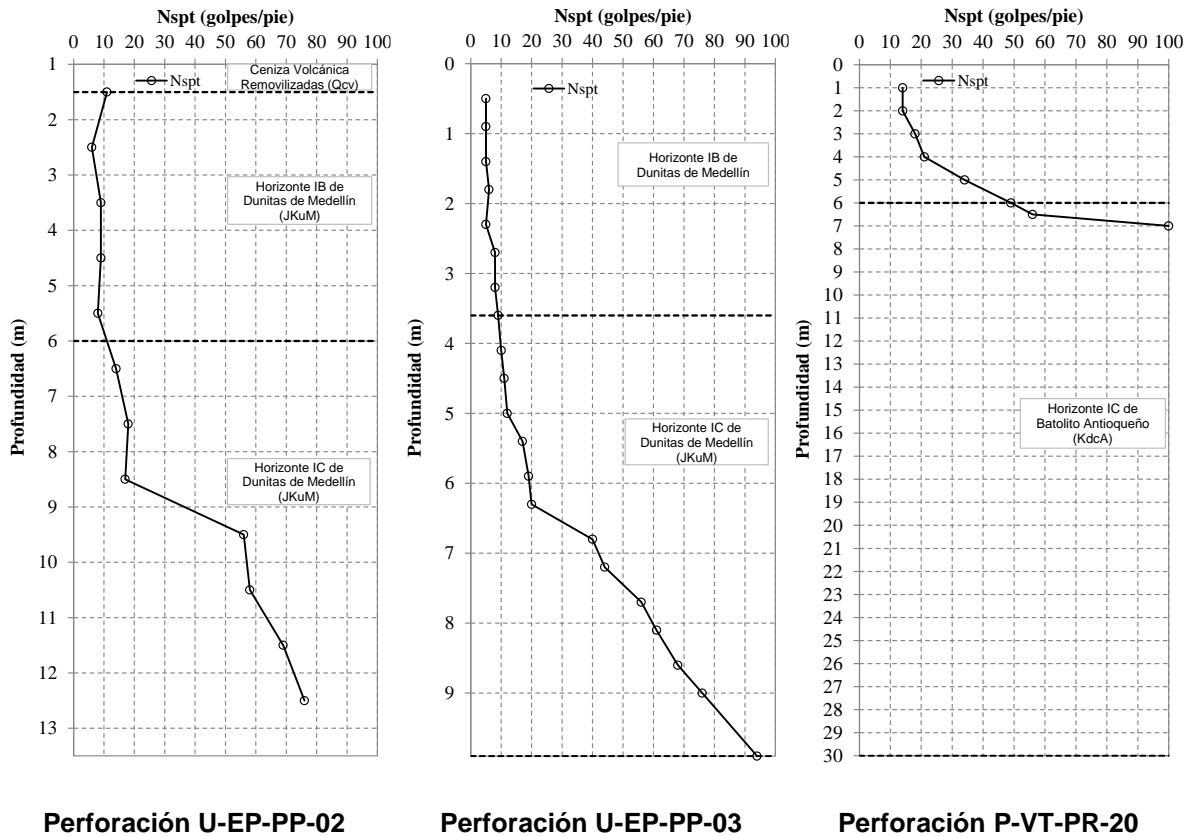
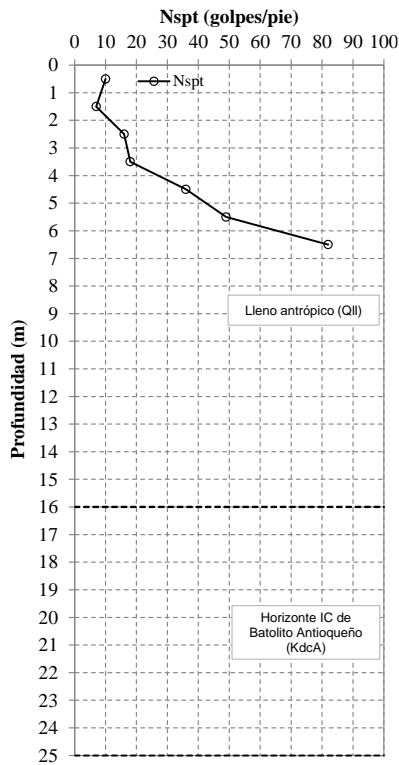
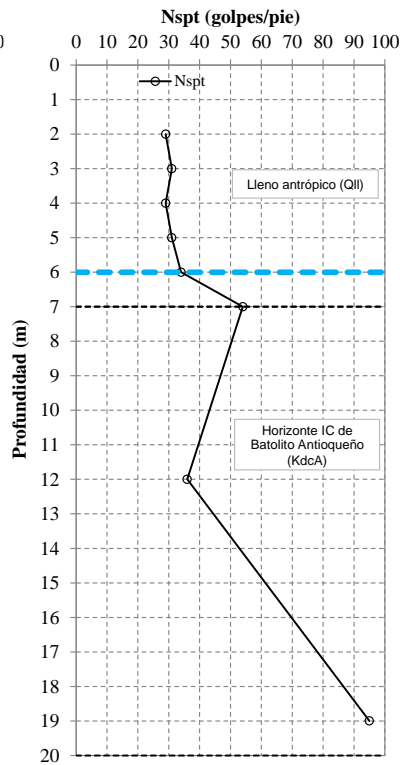


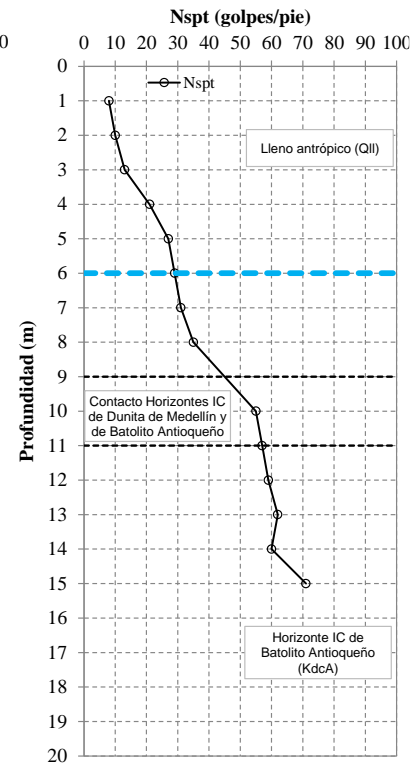
Figura 104. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación P-VT-PR-22

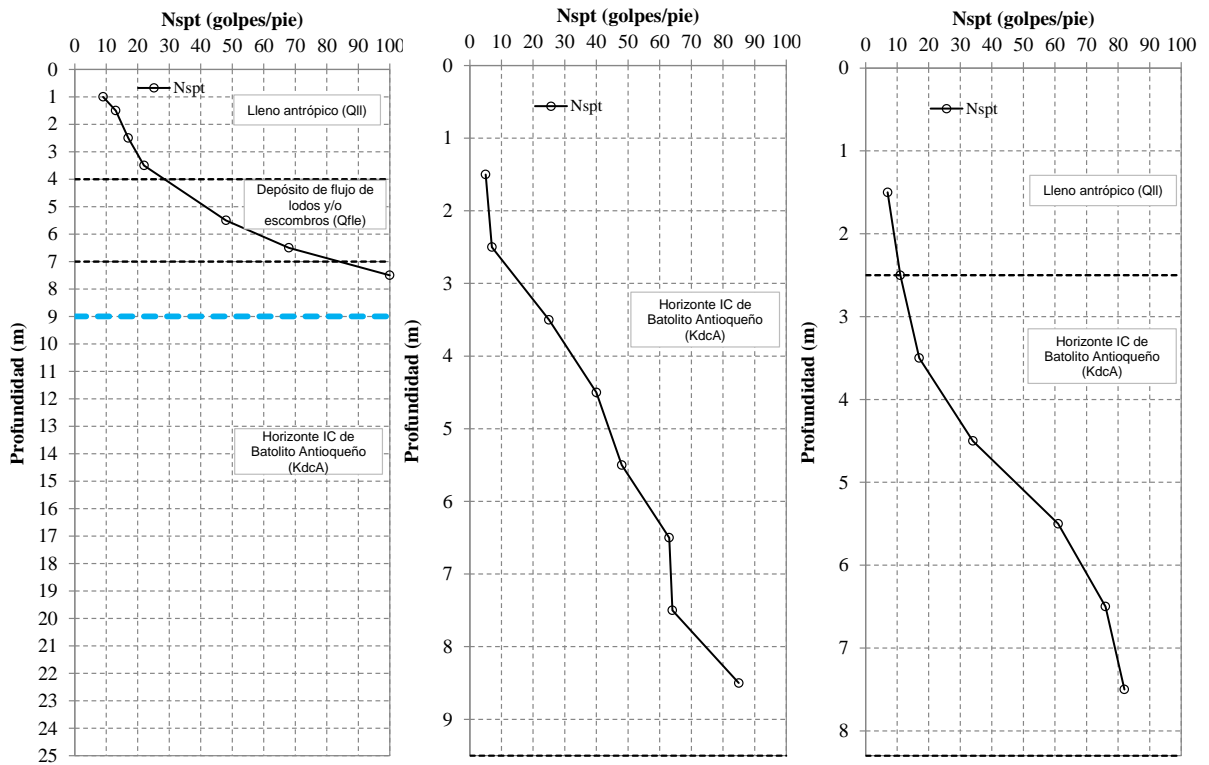


Perforación P-VT-PR-23



Perforación P-VT-PR-24

Figura 105. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación P-VT-PR-26

Perforación U-VT-PP-01

Perforación U-VT-PP-02

Figura 106. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

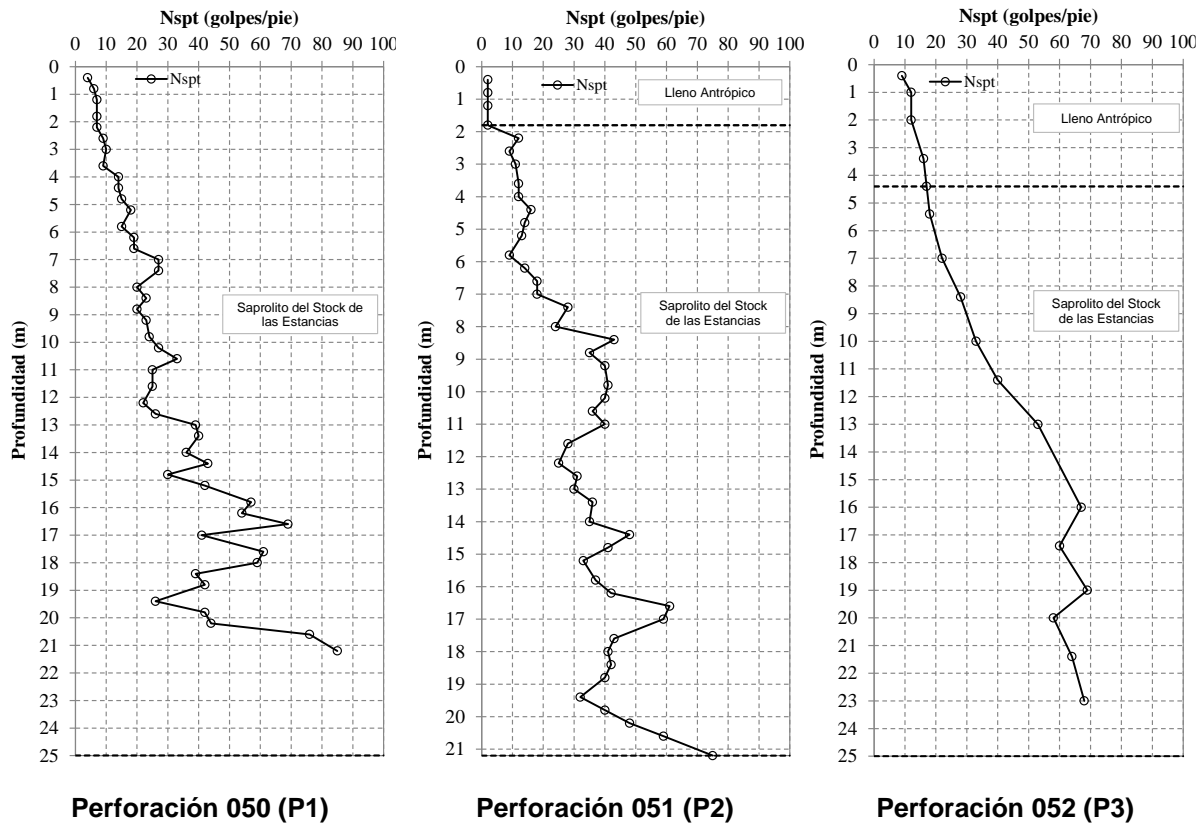
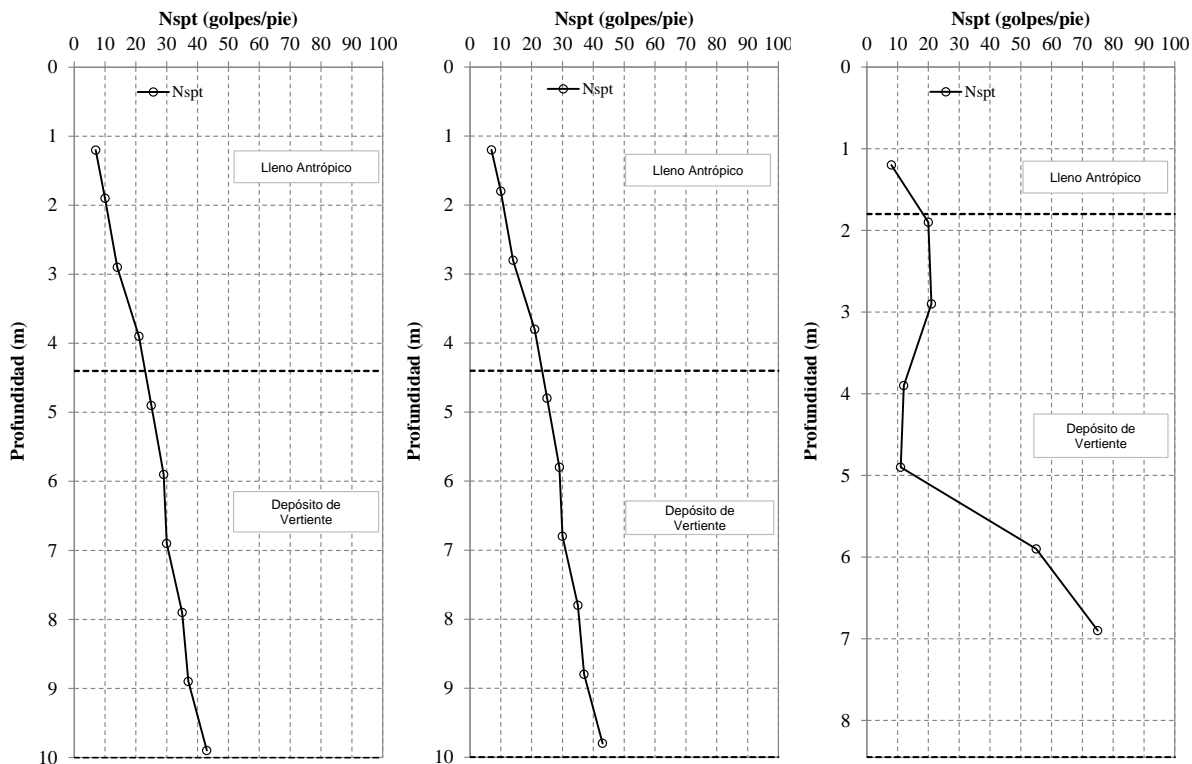
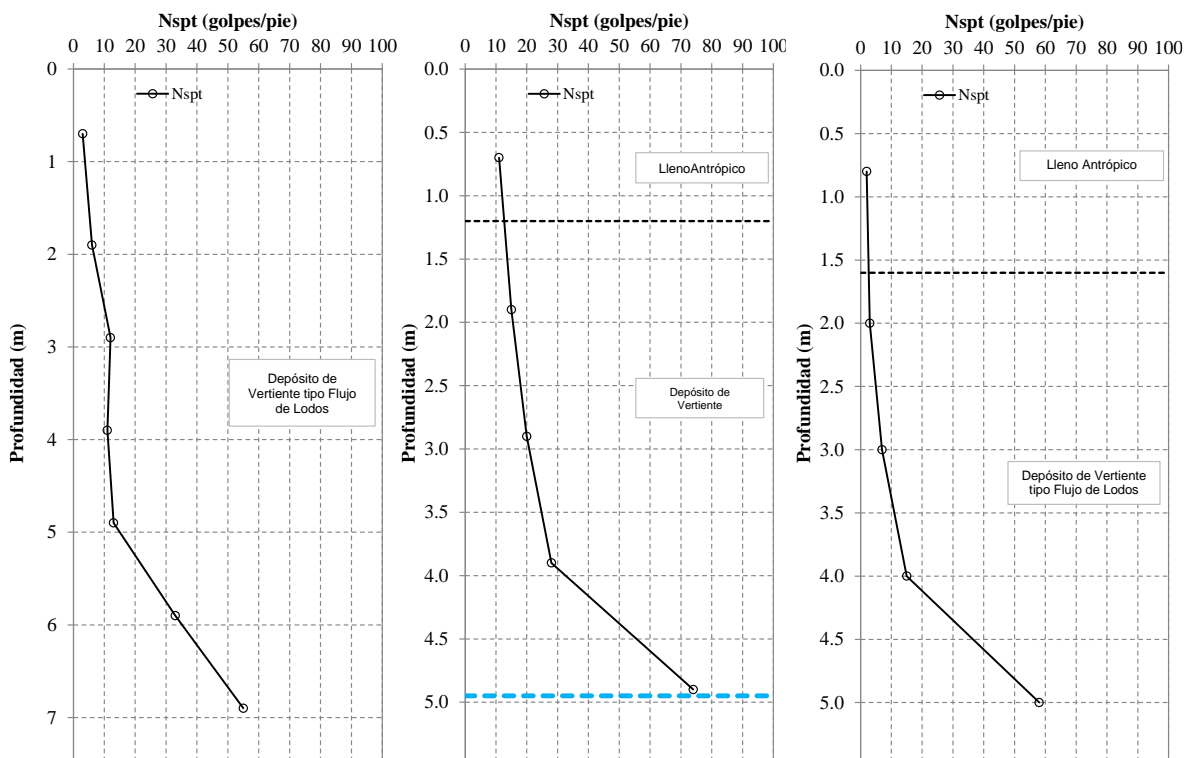


Figura 107. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación 084 (PA-PP-01) Perforación 085 (PA-PP-01A) Perforación 086 (PA-PP-01B)

Figura 108. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación 108 (PA-PP-16)

Perforación 119 (PA-PP-25)

Perforación 127 (PA-PP-30)

Figura 109. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

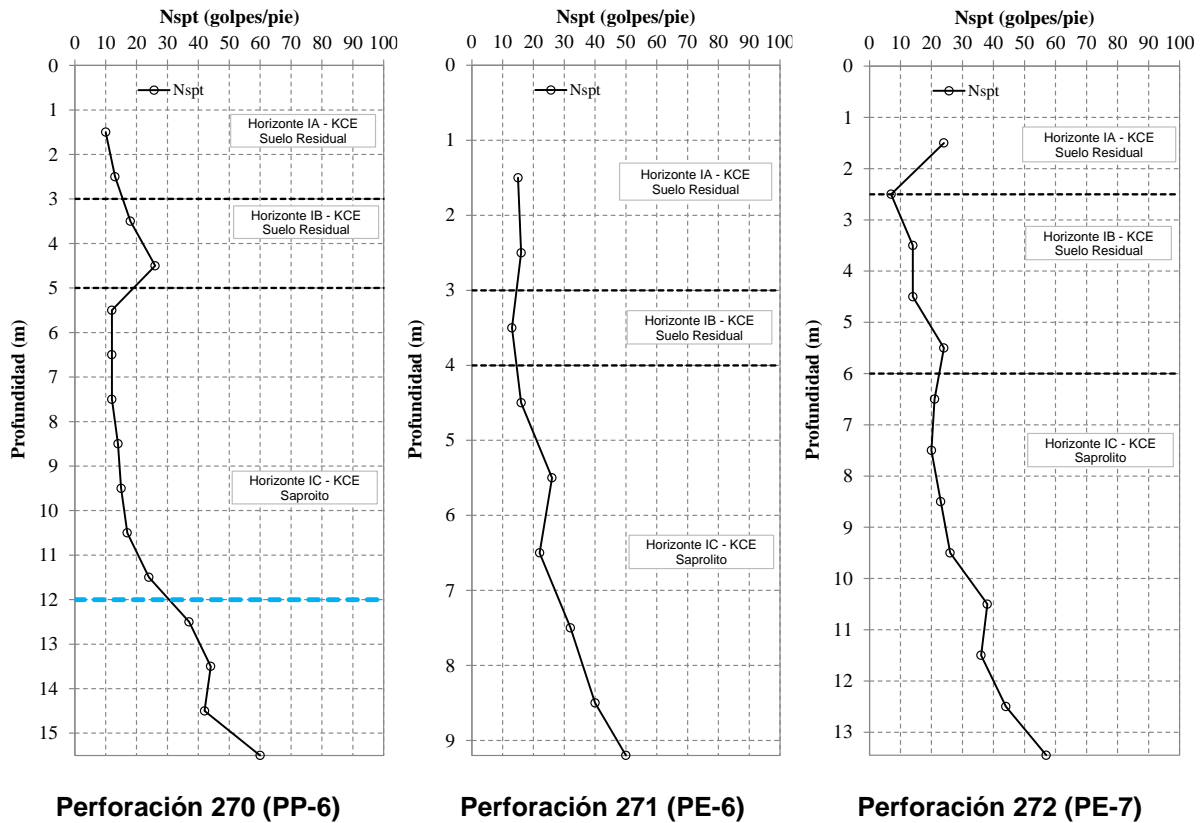
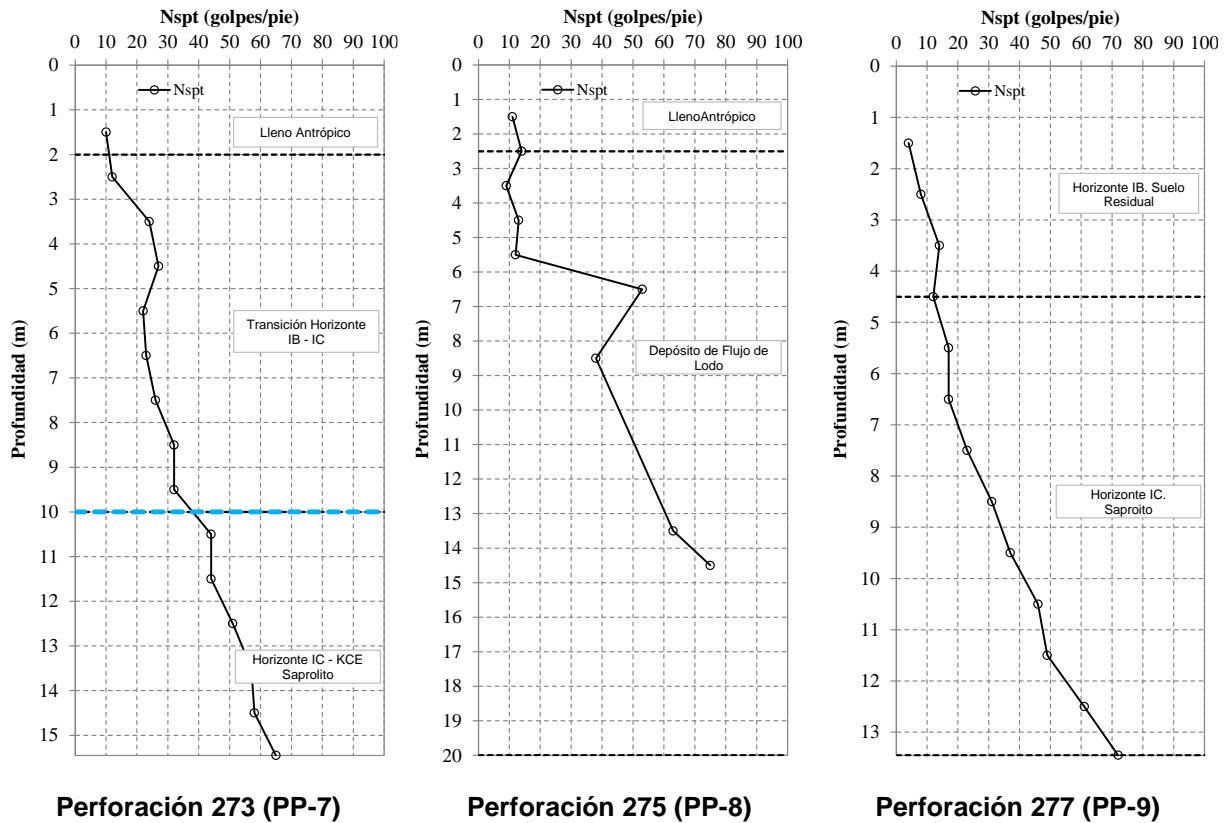
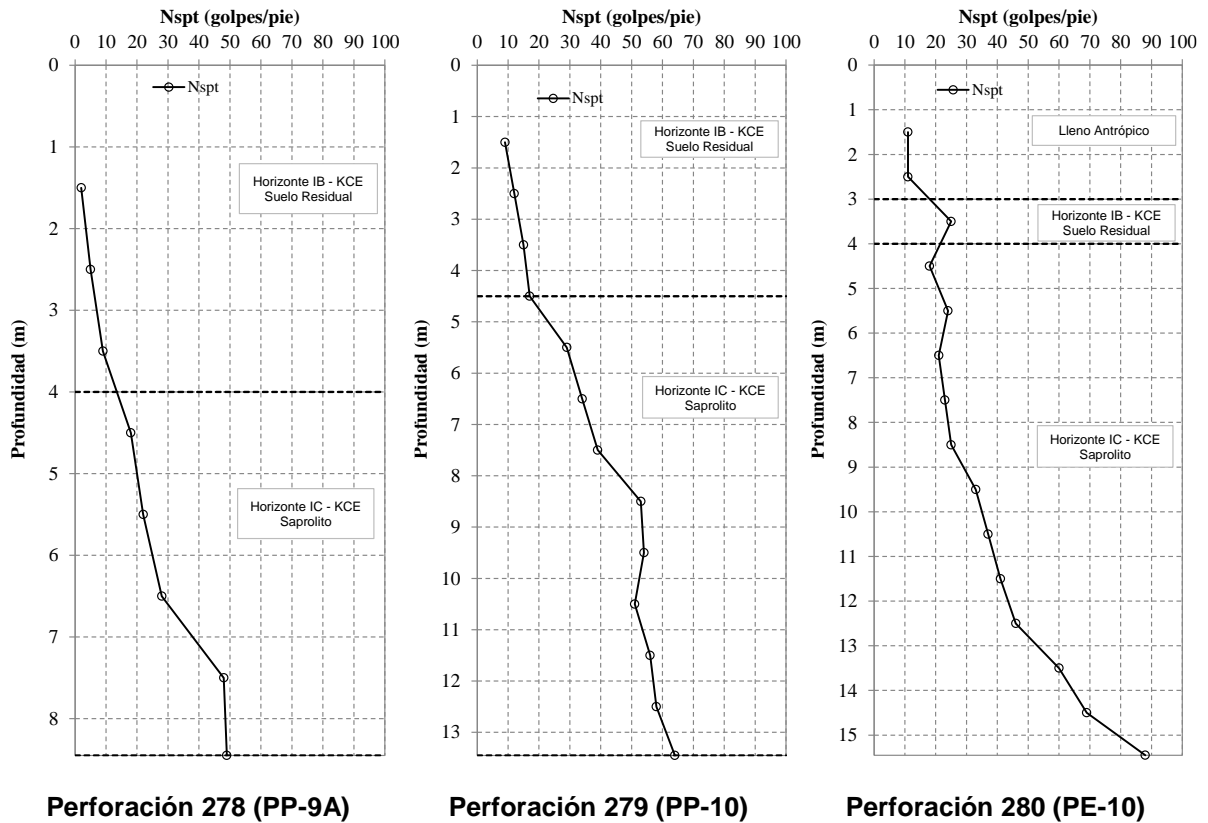


Figura 110. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación 273 (PP-7) Perforación 275 (PP-8) Perforación 277 (PP-9)

Figura 111. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación 278 (PP-9A) Perforación 279 (PP-10) Perforación 280 (PE-10)

Figura 112. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

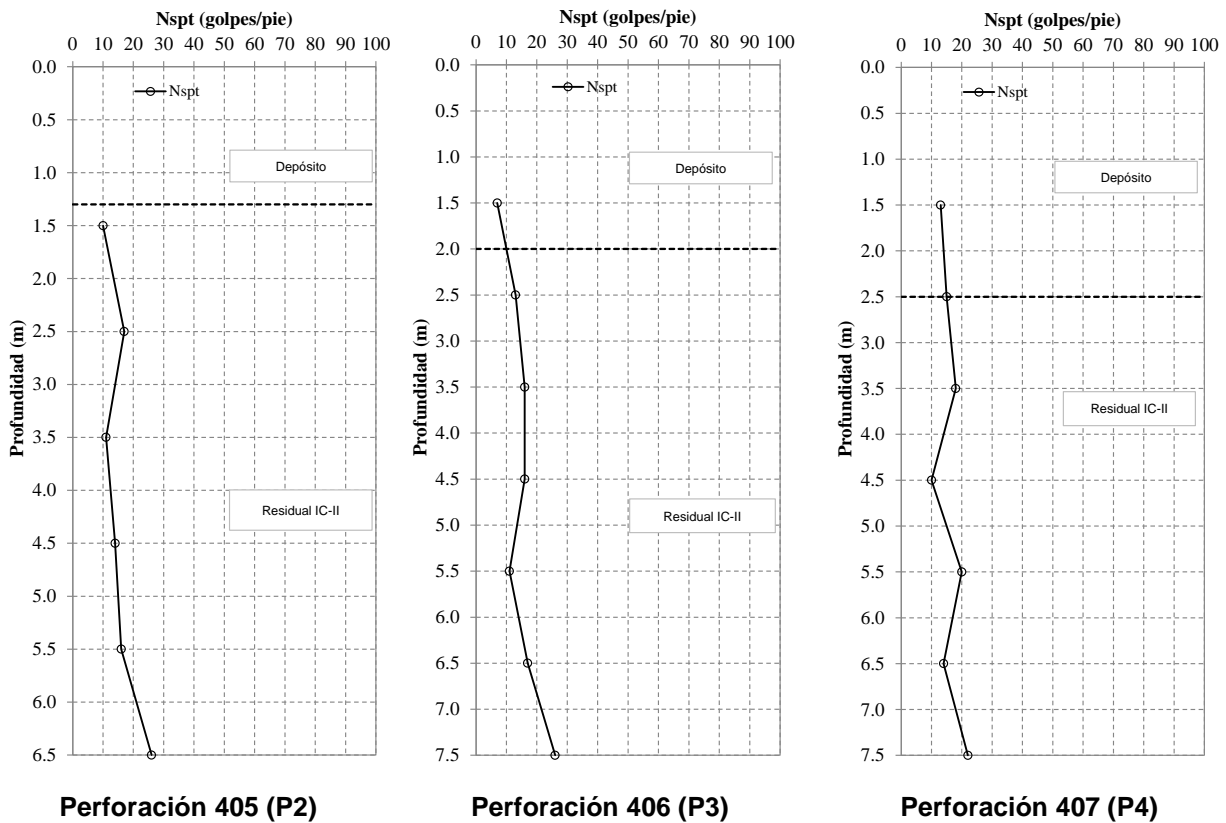


Figura 113. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

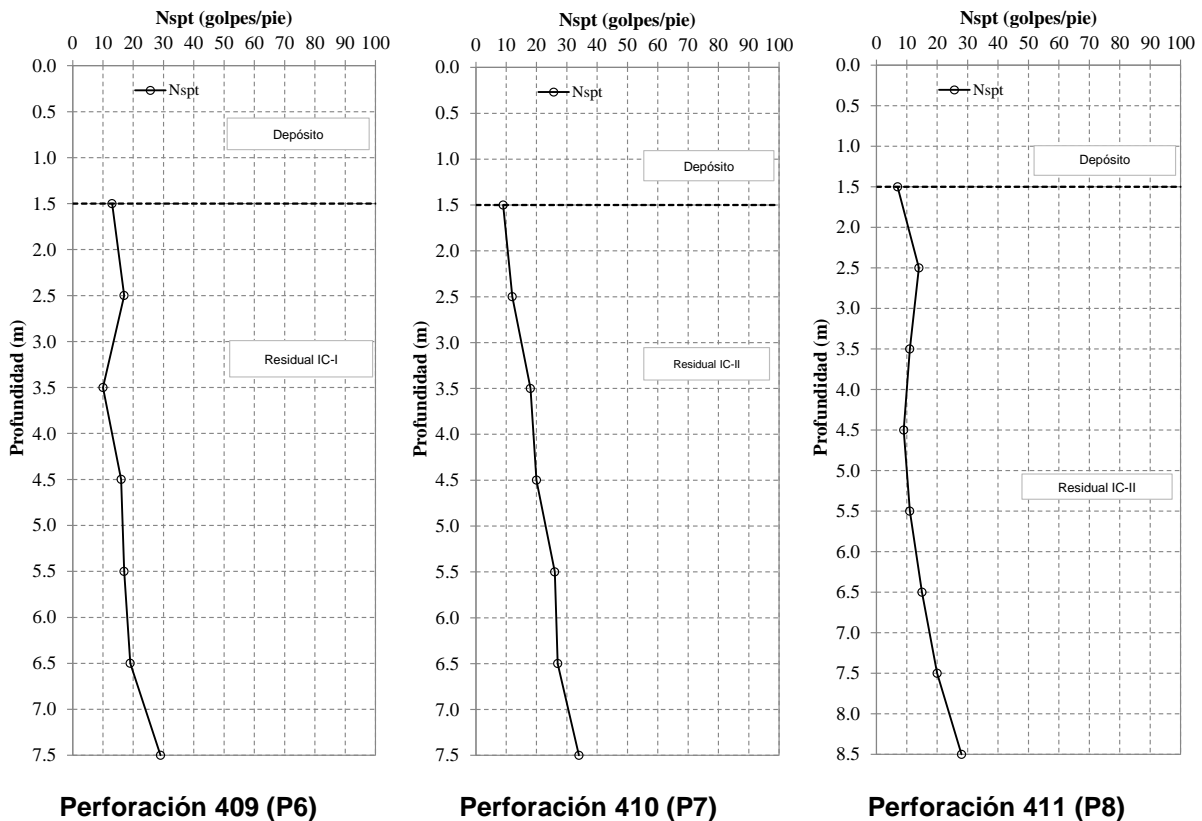
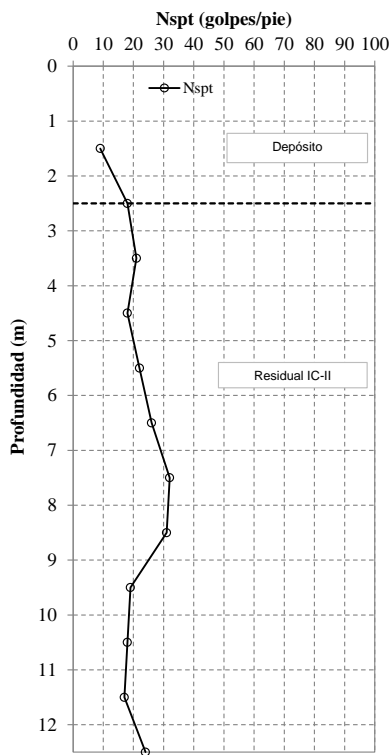
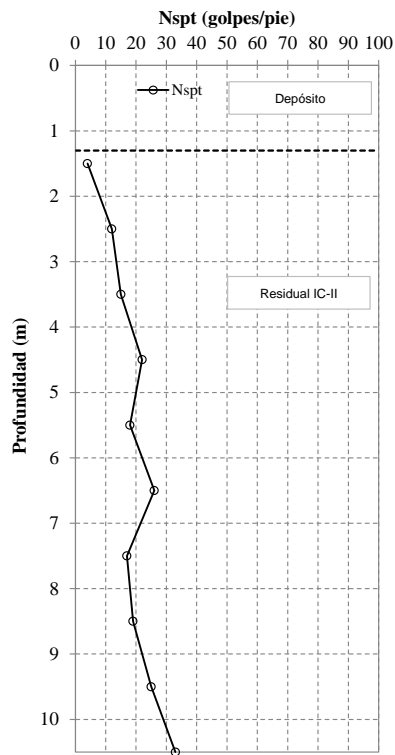


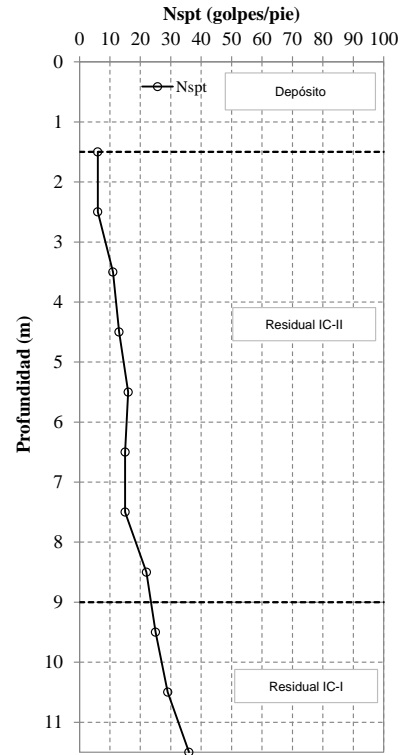
Figura 114. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)



Perforación 412 (P9)



Perforación 413 (P10)



Perforación 414 (P11)

Figura 115. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

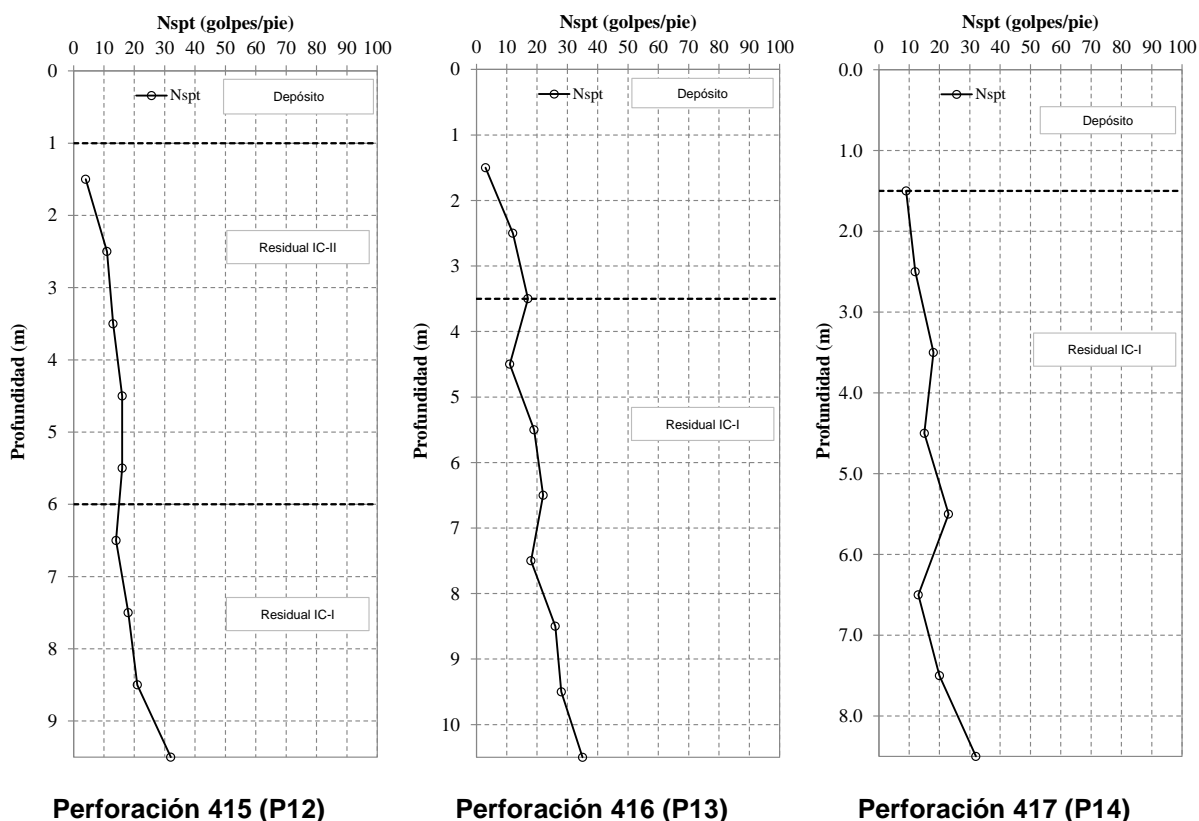




Figura 116. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay (Continuación)

En la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 4 m y 113 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.2 m y 16.0 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-21, P-EP-PR-22, P-VT-PR-20, P-VT-PR-21, P-VT-PR-22, P-VT-PR-23, P-VT-PR-24, P-VT-PR-26, P-VT-PP-02, 051 (P2), 052 (P3), 084 (PA-PP-01), 085 (PA-PP-01A), 086 (PA-PP-01B), 119 (PA-PP-25), 127 (PA-PP-30), 273 (PP-7), 275 (PP-8) y 280 (PE-10), suprayaciendo los suelos residuales de la Dunita de Medellín y del Batolito Antioqueño y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 2 golpes/pie y 35 golpes/pie e incluso 82 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Se encuentran ocho cuerpos distribuidos en la parte superior, central y baja de la UMI. Estos depósitos fueron identificados en las Perforaciones P-EP-PR-18, P-VT-PR-25, P-VT-PR-26, 084 (PA-PP-01), 085 (PA-PP-01A), 086 (PA-PP-01B), 108 (PA-PP-16), 119 (PA-PP-25), 127 (PA-PP-30), 275 (PP-8), 405 (P2), 406 (P3), 407 (P4), 410 (P7), 411 (P8), 412 (P9), 413 (P10), 414 (P11),

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

415 (P12), 416 (P13), 417 (P14). La resistencia a la penetración varía considerablemente entre 3 golpes/pie y 75 golpes/pie, entre la superficie y 15.0 m de profundidad.

La Dunita de Medellín fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Se halla en las Perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-20, U-EP-PP-02, U-EP-PP-03 y P-VT-PR-24. En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos, milonitas, salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunita cizallada. Las resistencias a la penetración estándar también mejoran notablemente con la profundidad, presentando resistencias del orden de 5 golpes/pie a 94 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-EP-PR-20 y U-EP-PP-03.

En esta UMI también se identificaron cuerpos asociados al Batolito Antioqueño, encontrando el desarrollo de los Horizontes IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Se halla en las Perforaciones P-EP-PR-17, P-EP-PR-18, P-EP-PR-19, P-EP-PR-20, P-EP-PR-21, P-EP-PR-22, P-VT-PR-20, P-VT-PR-21, P-VT-PR-22, P-VT-PR-23, P-VT-PR-24, P-VT-PR-25, P-VT-PR-26, P-VT-PP-01 y P-VT-PP-02, y en la parte alta la UMI. Las resistencias a la penetración estándar también mejoran notablemente con la profundidad, presentando resistencias del orden de 5 golpes/pie a 100 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-EP-PR-19 y P-VT-PP-01.

10.1.2 Líneas geofísicas

En la zona de estudio se ejecutaron doce líneas geofísicas, en once de ellas se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor) para complementar el análisis geológico geotécnico de la UMI y en la otra línea se realizó un Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V) para determinar las condiciones hidrogeológicas en el polígono Esfuerzos de Paz. La localización en planta de estos ensayos se muestra en el Mapa 23 y en el Mapa 24.

El ensayo ReMi (Refraction Microtremor) es un método de refracción sísmica empleado para evaluar la velocidad propagación de ondas de corte (V_s) con base en la determinación de la dispersión de la propagación de ondas superficiales. El ensayo está definido por dos ideas tecnológicas básicas, las cuales se exponen a continuación:

- ✓ Los geófonos empleados para registrar el ruido ambiental son dispuestos a lo largo de una línea recta. Estos geófonos registran las ondas superficiales con frecuencias tan bajas como 2 Hz, dependiendo del tipo de sensores que se utilicen.
- ✓ Una transformada en dos dimensiones, lentitud (inverso de la velocidad de propagación de los componentes de ondas superficiales) y frecuencia (p-f), de un registro de micro tremores (vibraciones ambientales o inducidas) permite separar la llegada de las ondas Rayleigh de la llegada de otras ondas sísmicas. Una vez las ondas Rayleigh son identificadas, es posible determinar su verdadera velocidad de fase y no su velocidad aparente (Louie, 2001).

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es un método eléctrico de resistividades empleado para determinar el espesor de las capas permeables en profundidad con base en el estudio de campos de potencial eléctrico. La determinación de la distribución de la resistividad en el subsuelo a través de mediciones realizadas en la superficie terrestre puede entregar informaciones útiles acerca de la estructura o la composición de las formaciones geológicas, que constituyen el subsuelo. El método común consiste en la transmisión de corriente directa en el subsuelo a través de una configuración de cuatro electrodos (varillas metálicas de $\pm 20\text{cm}$ de largo), un par tiene la función de introducir la corriente en el subsuelo y el otro par permite medir la diferencia de potencial asociado con la corriente introducida en el terreno. La Tabla 29 muestra algunos valores teóricos de resistividad de algunos materiales encontrados en la corteza terrestre.

Tabla 29. Tabla de Valores de Resistividad eléctrica (Arias, 2011)

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

Las líneas en las que se realizó el ensayo ReMi fueron denominadas P-EP-LG-01, P-EP-LG-02, P-EP-LG-03, P-VT-LG-01, P-VT-LG-02, P-VT-LG-03, P-VT-LG-04, U-EPVT-LG-03, U-EPVT-LG-06, U-EPVT-LG-07 y U-EPVT-LG-08. La línea en la que se realizó el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) fue denominada P-EP-SEV-03. Cabe mencionar que en esta UMI se hizo necesaria la implementación de la línea adicional denominada U-EPVT-LG-08 para determinar y/o correlacionar los espesores aproximados de suelo. Esta línea fue realizada en la parte alta de la UMI en los límites entre la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay y la UMI Trece de Noviembre.

En la Tabla 30 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los ensayos ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

Tabla 30. Coordenadas de las líneas ReMi realizadas en la UMI Esfuerzos de Paz - Villa Turbay y de la Línea SEV realizada en el Polígono Esfuerzos de Paz

Nomenclatura	Coordenada Inicial			Coordenada Final		
	Este	Norte	Cota	Este	Norte	Cota
P-EP-LG-01	838829.703	1181847.558	1762.88	838772.705	1181742.966	1749.91
P-EP-LG-02	838573.580	1181751.810	1747.05	838584.020	1181683.300	1728.70
P-EP-LG-03	838727.815	1181804.370	1765.93	838768.774	1181783.250	1768.56
P-VT-LG-01	839284.525	1181543.839	1832.99	839370.041	1181453.650	1822.02
P-VT-LG-02	839151.516	1181615.930	1792.00	839096.837	1181546.770	1756.91
P-VT-LG-03	839096.766	1181688.935	1780.13	839193.254	1181606.097	1798.48
P-VT-LG-04	839136.670	1181435.310	1762.15	839242.539	1181437.947	1763.65
U-EPVT-LG-03	839235.753	1181968.915	1900.76	839244.112	1181859.366	1892.90
U-EPVT-LG-06	839009.973	1182900.683	2087.07	838940.335	1182823.071	2083.36
U-EPVT-LG-07	839256.226	1183449.355	2155.82	839168.704	1183394.515	2153.29
U-EPVT-LG-08	839141.007	1183510.842	2169.75	839135.468	1183402.271	2158.52
P-EP-SEV-03	838637.946	1181807.588	1762.53	838701.996	1181799.780	1760.30

La Figura 117 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-EP-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 118, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 119 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 120 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 155 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.2 m hasta los 6.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 264 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 6.4 m hasta los 11.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 324 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa más profunda desde 11.6 m hasta los 21.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 336 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.

- ✓ Una última capa desde los 21.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 607 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

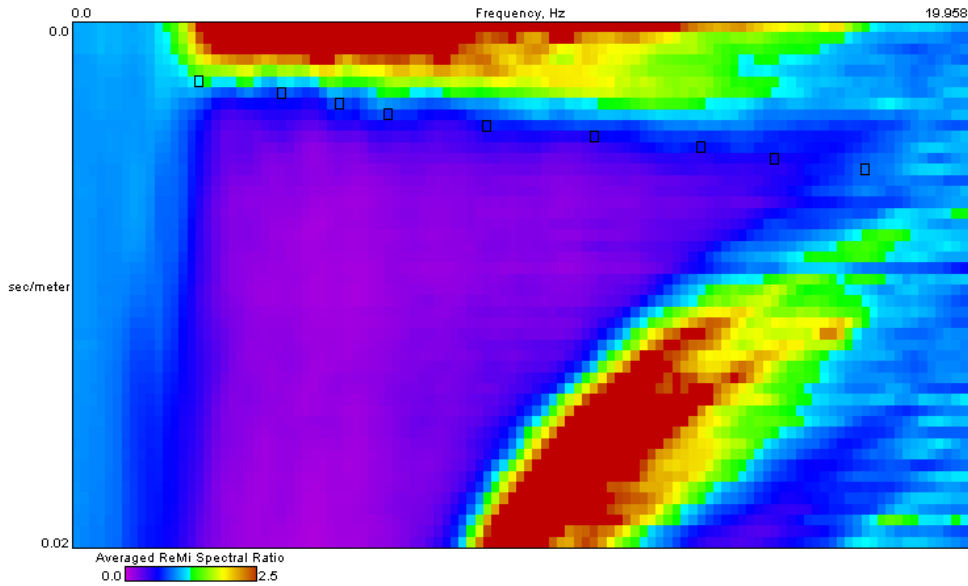


Figura 117. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-01

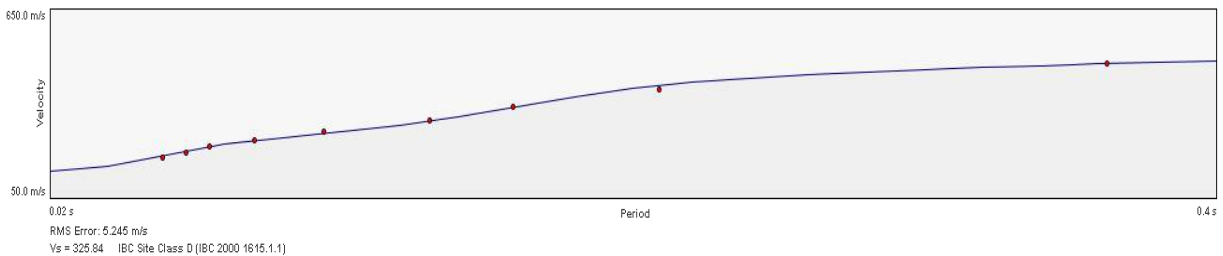
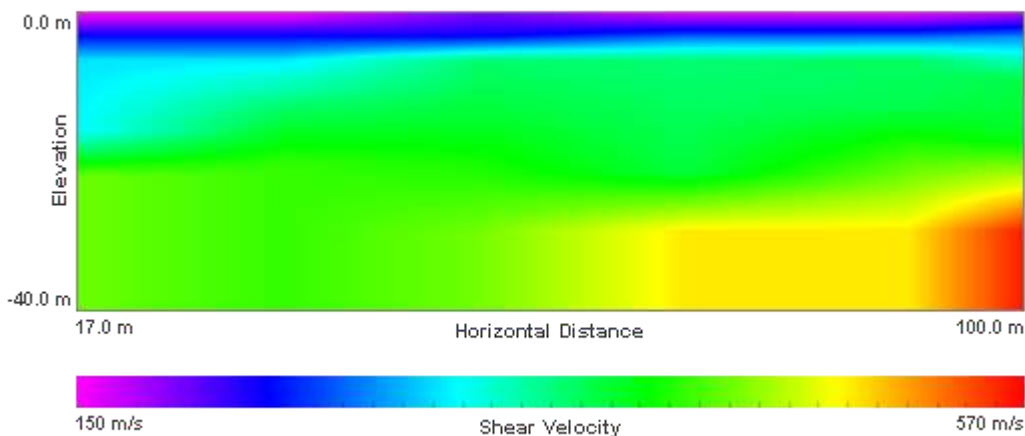


Figura 118. Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-01

	Density	Shear Velocity
3.2 m	1.8 g/cc	154.801 m/s
6.4 m	1.8 g/cc	263.892 m/s
11.6 m	1.8 g/cc	323.953 m/s
21.8 m	1.8 g/cc	335.598 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	607.099 m/s

Figura 119. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-01



**Figura 120. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-EP-LG-01**

La Figura 121 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-EP-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 122, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 123 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En este caso, debido a las condiciones del terreno fue necesario realizar corrección por topografía utilizando la disposición geométrica de cada sensor. Para este ensayo la cota inicial y final fueron 1750.0 y 1734.0 respectivamente, generando una pendiente de 10° respecto a la horizontal. En la Figura 124 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 175 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.4 m hasta los 14.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 210 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 14.6 m hasta los 26.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 304 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una última capa desde los 26.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 500 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

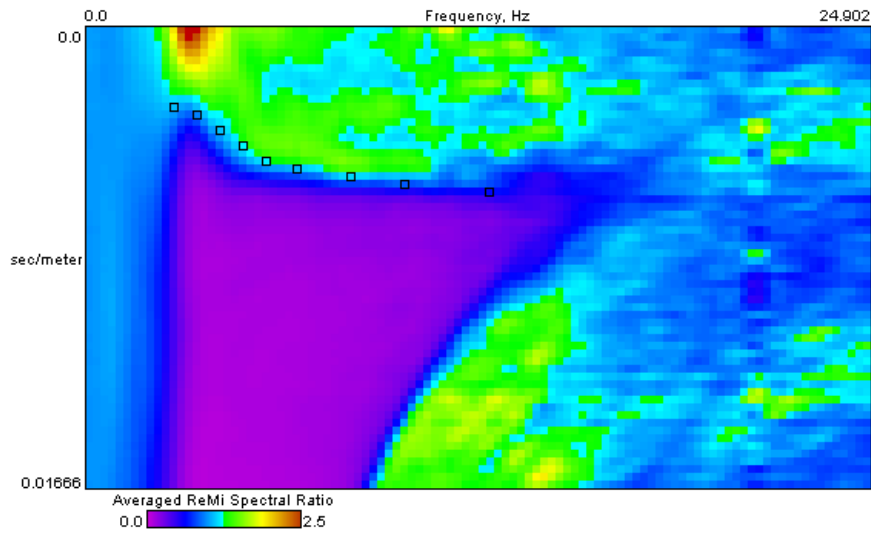


Figura 121. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-02

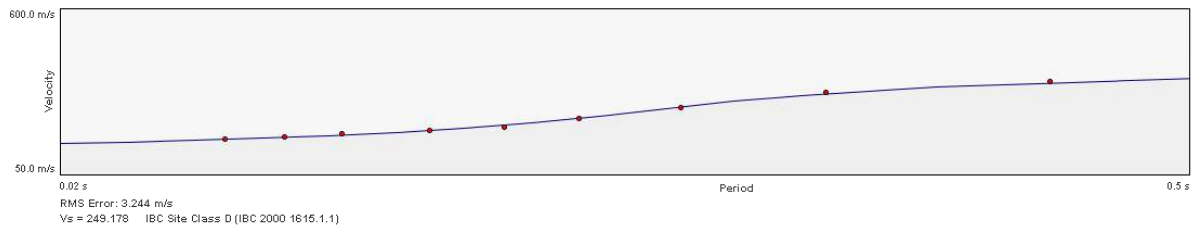


Figura 122. Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-02

	Density	Shear Velocity
5.4 m	1.81 g/cc	174.719 m/s
14.6 m	1.81 g/cc	209.551 m/s
26.8 m	1.81 g/cc	303.933 m/s
40.0 m	1.81 g/cc	499.438 m/s

Figura 123. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-02

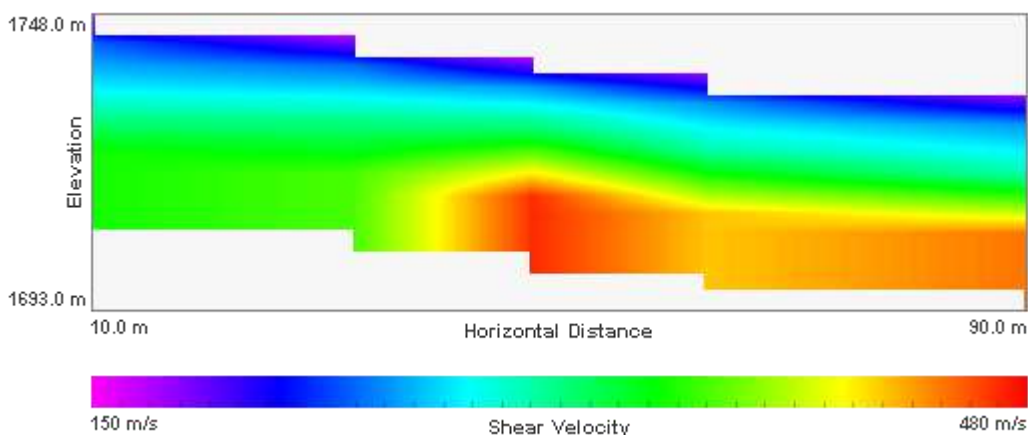


Figura 124. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-02

La Figura 125 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-EP-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 126, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 127 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 128 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 205 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.4 m hasta los 12.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 406 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 12.4 m hasta los 21.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 412 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 21.2 m hasta los 26.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 434 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 26.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 609 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

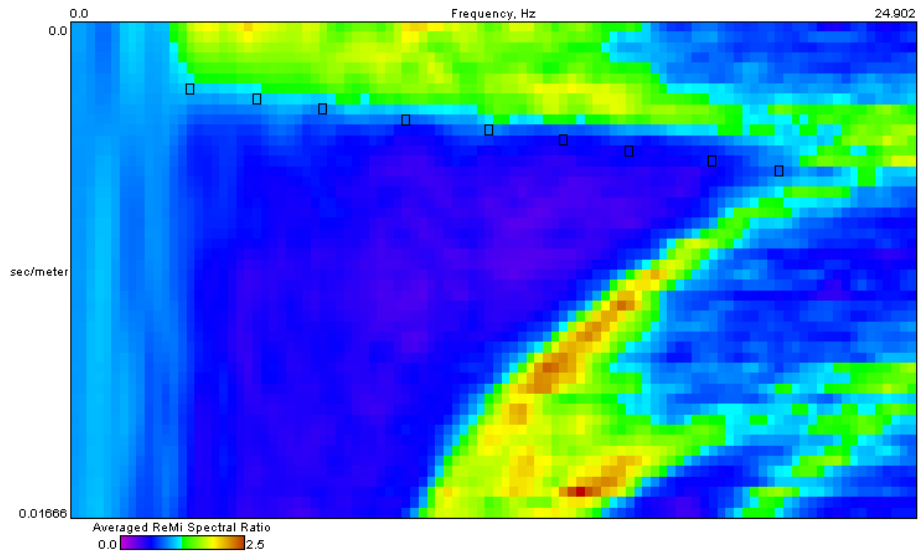


Figura 125. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EP-LG-03

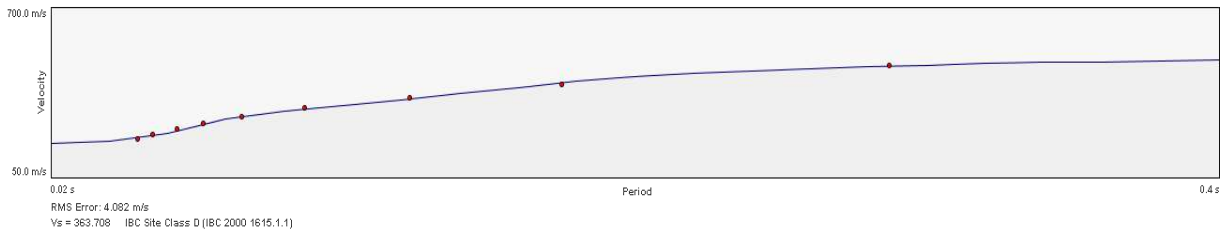


Figura 126. Dispersión y ajuste para la Línea P-EP-LG-03

	Density	Shear Velocity
5.4 m	1.8 g/cc	204.75 m/s
12.4 m	1.8 g/cc	406.231 m/s
21.2 m	1.8 g/cc	411.593 m/s
26.6 m	1.8 g/cc	433.81 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	609.244 m/s

Figura 127. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-03

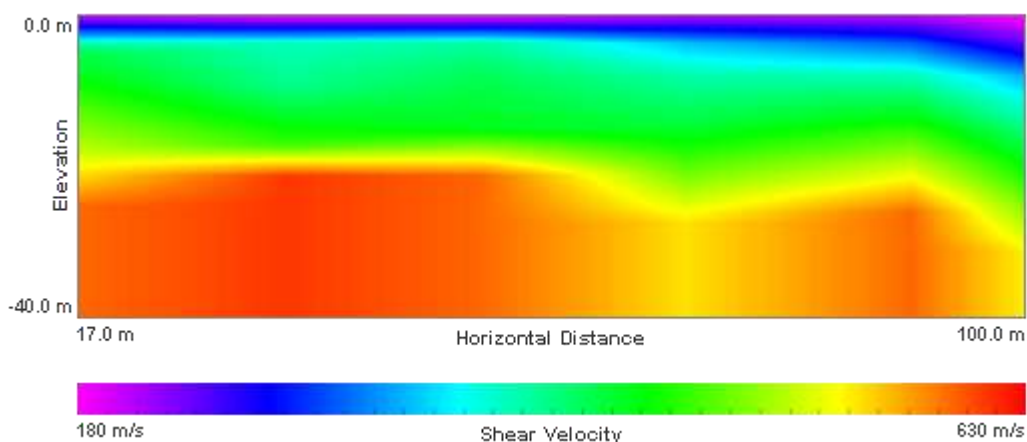


Figura 128. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EP-LG-03

La Figura 129 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-VT-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 130, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 131 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 132 se observa la tomografía realizada para esta la línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.0 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 168 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 5.0 m y 11.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 260 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia entre 11.4 m y 20.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 391 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia densa o como roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda entre 20.4 m y 28.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 423 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o como roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde los 28.8 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 703 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o como una roca blanda.

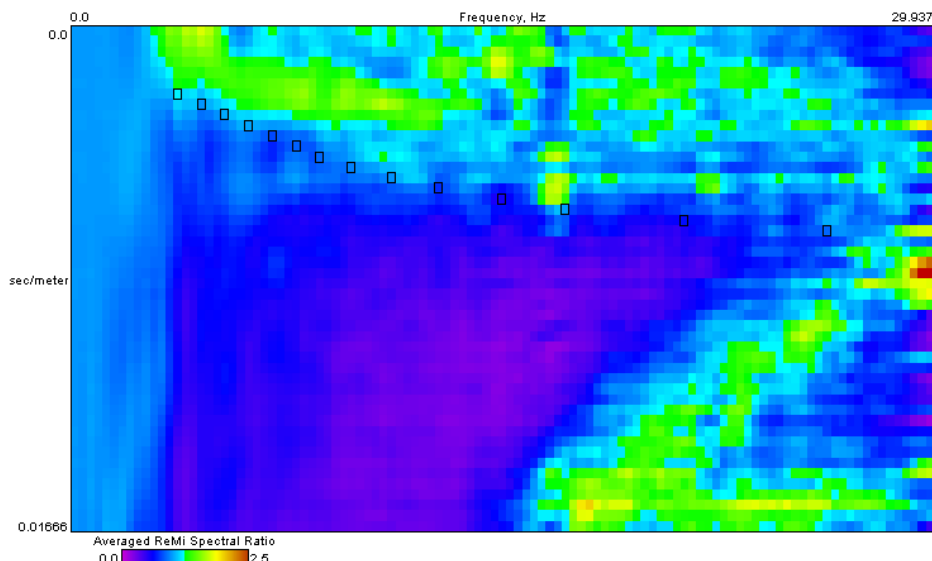


Figura 129. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-01

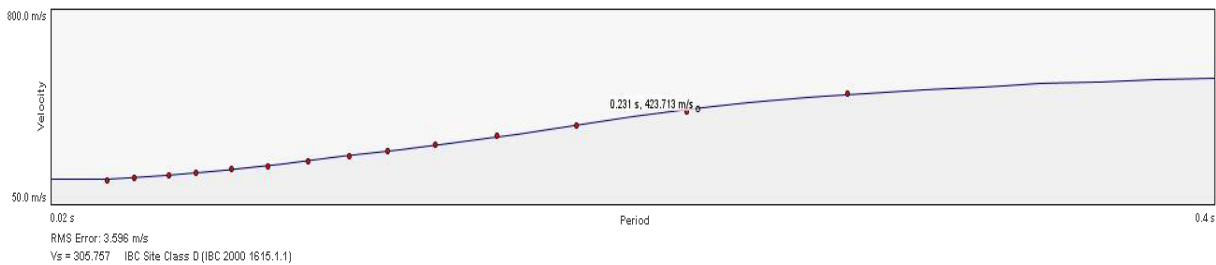
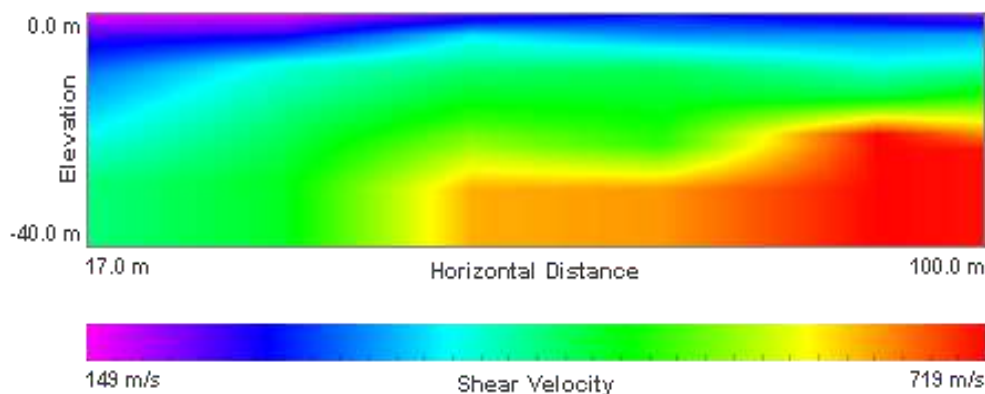


Figura 130. Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-01

	Density	Shear Velocity
5.0 m	1.8 g/cc	167.518 m/s
11.4 m	1.8 g/cc	260.47 m/s
20.4 m	1.8 g/cc	390.909 m/s
28.8 m	1.8 g/cc	423.085 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	703.473 m/s

Figura 131. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-01



**Figura 132. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-VT-LG-01**

La Figura 133 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-VT-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 134, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 135 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 65 m de longitud. En este caso, debido a las condiciones del terreno fue necesario realizar corrección por topografía utilizando la disposición geométrica de cada sensor. Para este ensayo la cota inicial y final fueron 1790.0 y 1774.0 respectivamente, generando una pendiente de 13° respecto a la horizontal. En la Figura 136 se observa la tomografía realizada para esta la línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 174 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda, asimilable al lleno antrópico.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.8 m hasta los 11.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 311 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 11.4 m hasta los 21.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 407 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 21.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 513 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.

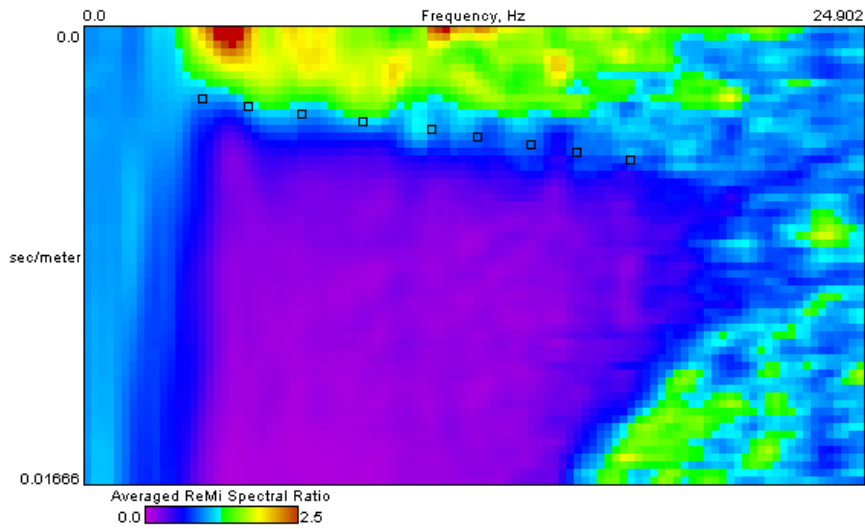


Figura 133. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-02

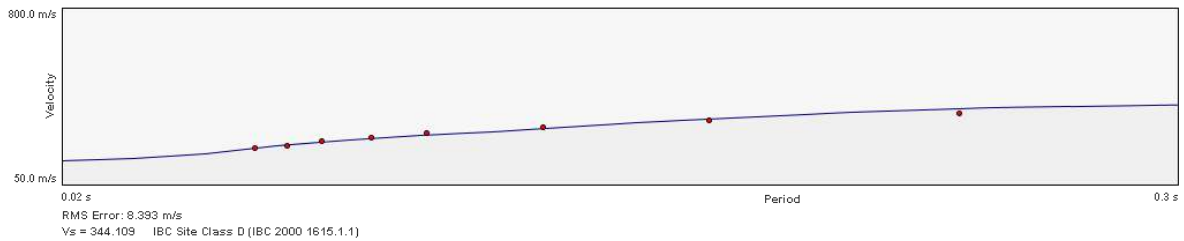
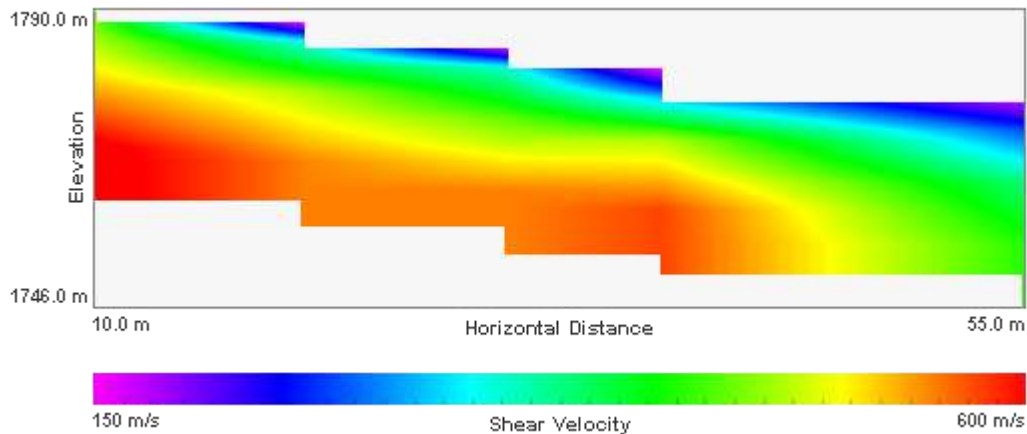


Figura 134. Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-02

	Density	Shear Velocity
3.75 m	1.81 g/cc	174.106 m/s
11.4 m	1.81 g/cc	311.236 m/s
21.75 m	1.81 g/cc	406.997 m/s
30.0 m	1.81 g/cc	512.717 m/s

Figura 135. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-02



**Figura 136. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-VT-LG-02**

La Figura 137 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-VT-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 138, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 139 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 140 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 169 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda
- ✓ Una segunda capa entre los 3.6 m y 8.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 280 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una tercera capa entre los 8.4 m y los 12.8 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 395 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre los 12.8 m y los 22.2 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 490 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda entre los 22.2 m y los 26.4 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 513 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 26.4 m en adelante de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S superior a 814 m/s, la cual corresponde a roca.

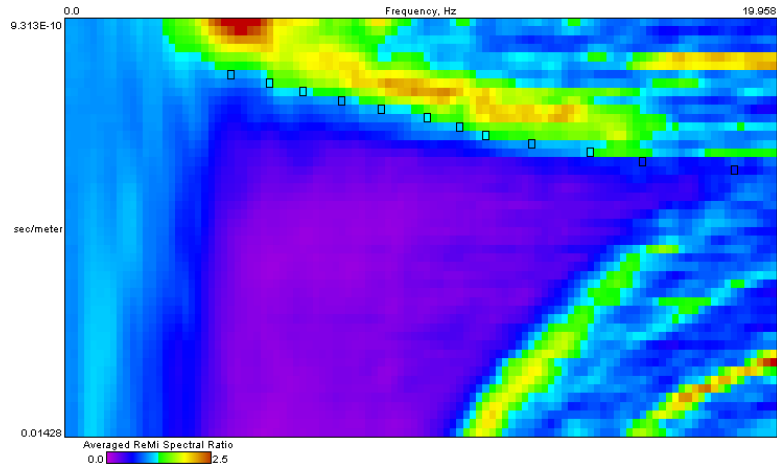


Figura 137. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-03

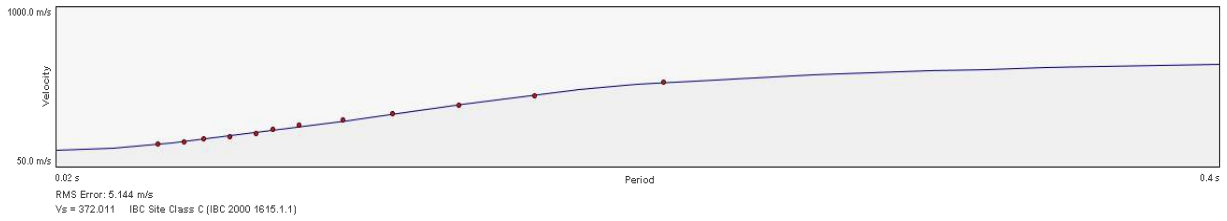


Figura 138. Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-03

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.8 g/cc	169.356 m/s
8.4 m	1.8 g/cc	279.98 m/s
12.8 m	1.8 g/cc	395.455 m/s
22.2 m	1.8 g/cc	489.581 m/s
26.4 m	1.8 g/cc	512.87 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	813.687 m/s

Figura 139. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-03

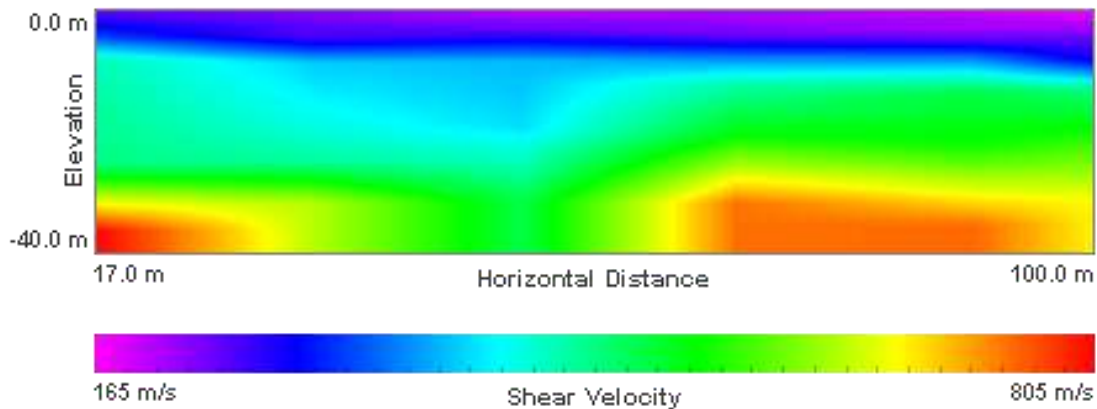


Figura 140. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-03

La Figura 141 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica P-VT-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 142, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 143 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 144 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 157 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.6 m hasta los 12.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 306 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 12.6 m hasta los 22.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 448 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 22.2 m hasta los 32.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 479 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 32.4 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 636 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

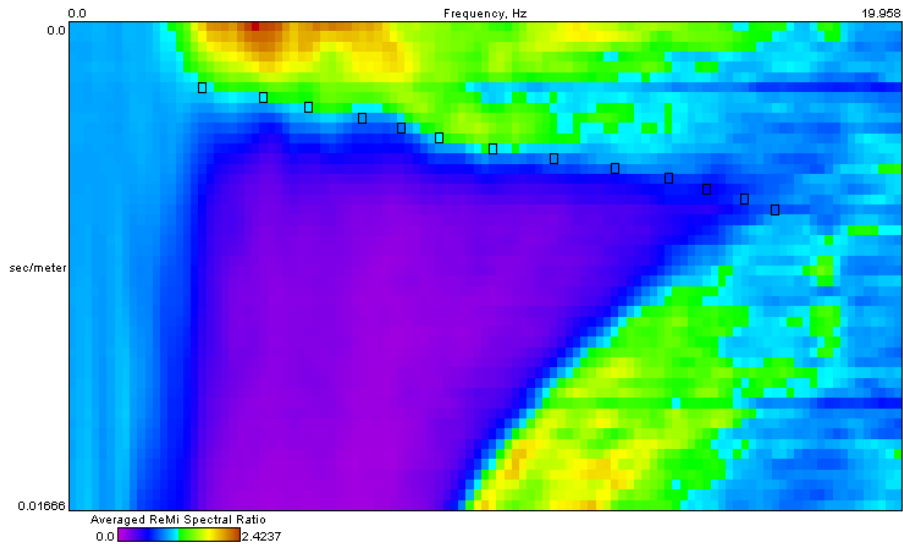


Figura 141. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-VT-LG-04

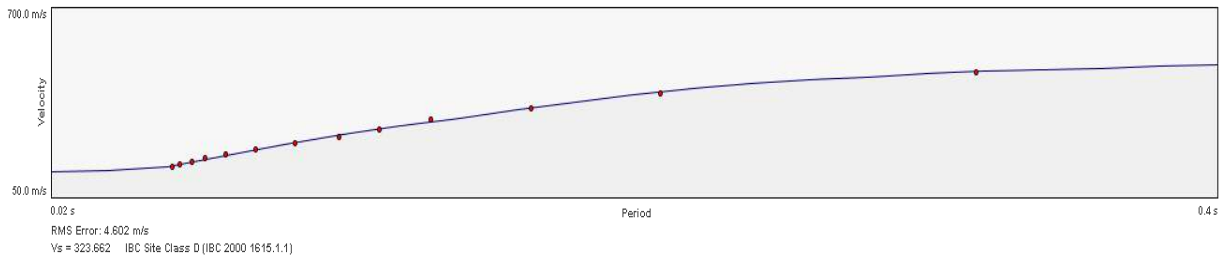
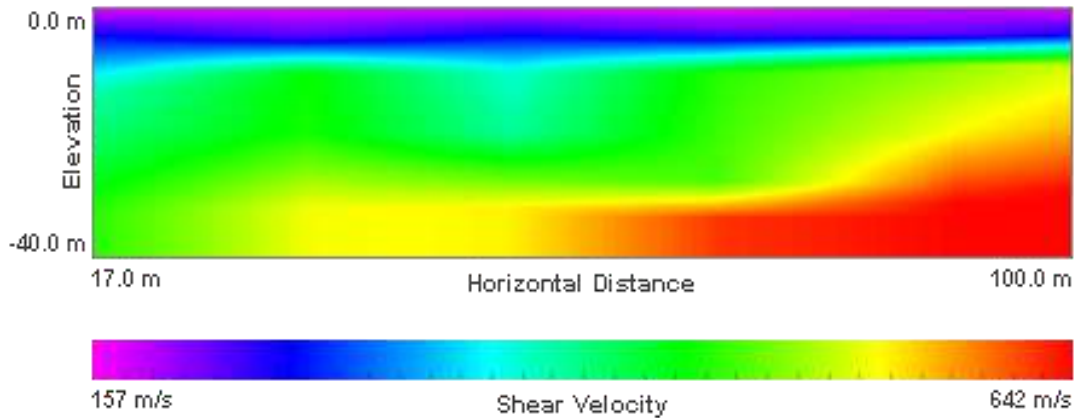


Figura 142. Dispersión y ajuste para la Línea P-VT-LG-04

	Density	Shear Velocity
4.6 m	1.8 g/cc	156.895 m/s
12.6 m	1.8 g/cc	306.282 m/s
22.2 m	1.8 g/cc	447.702 m/s
32.4 m	1.8 g/cc	478.907 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	636.261 m/s

Figura 143. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-VT-LG-04



**Figura 144. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-VT-LG-04**

La Figura 145 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea de Geofísica U-EPVT-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 146, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 147 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 148 se observa la tomografía realizada para esta línea en imagen suavizada. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 198 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.4 m hasta los 7.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 274 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 7.8 m hasta los 22.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 780 m/s, la cual corresponde a roca.
- ✓ Una capa más profunda desde 22.0 m hasta los 28.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 842 m/s, la cual corresponde a roca.
- ✓ Una última capa desde los 28.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 986 m/s, la cual puede definirse como roca.

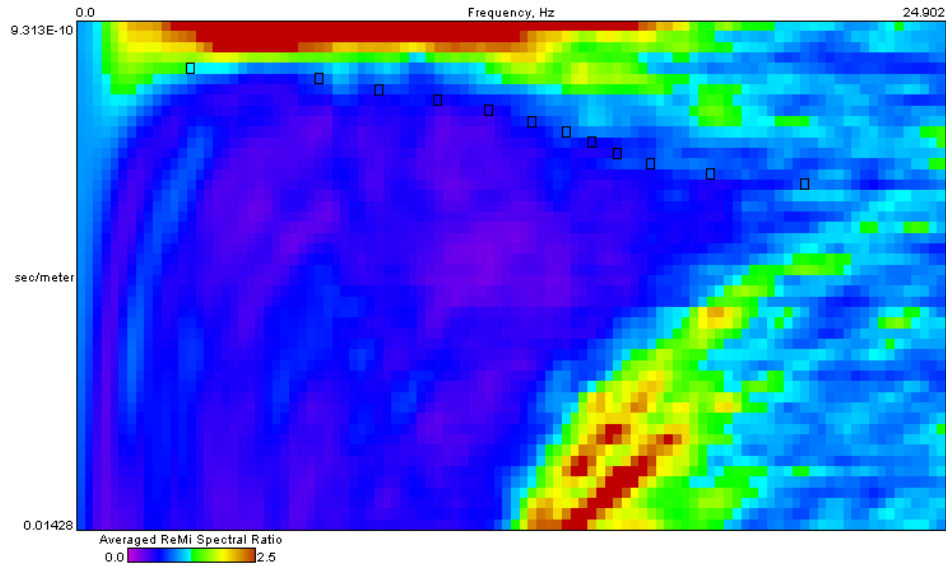


Figura 145. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-03

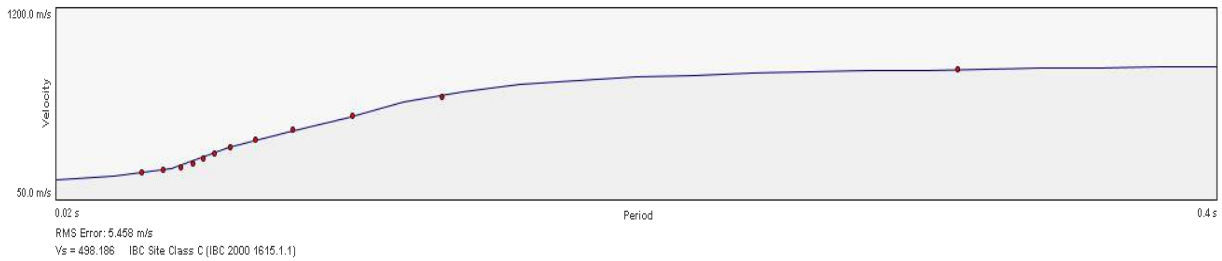
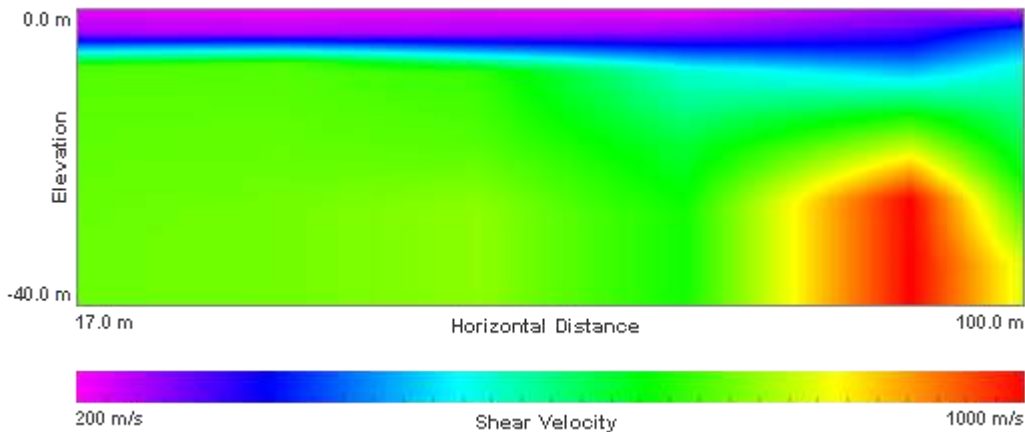


Figura 146. Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-03

	Density	Shear Velocity
3.4 m	1.8 g/cc	198.008 m/s
7.8 m	1.8 g/cc	274.362 m/s
22.0 m	1.8 g/cc	780.644 m/s
28.8 m	1.8 g/cc	841.726 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	986.21 m/s

Figura 147. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-03



**Figura 148. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea U-EPVT-LG-03**

La Figura 149 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-EPVT-LG-06. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 150, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 151 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 136 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 6.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 502 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 6.8 m hasta los 11.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 601 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 11.8 m hasta los 26.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 677 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 26.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 794 m/s, la cual puede definirse como roca.

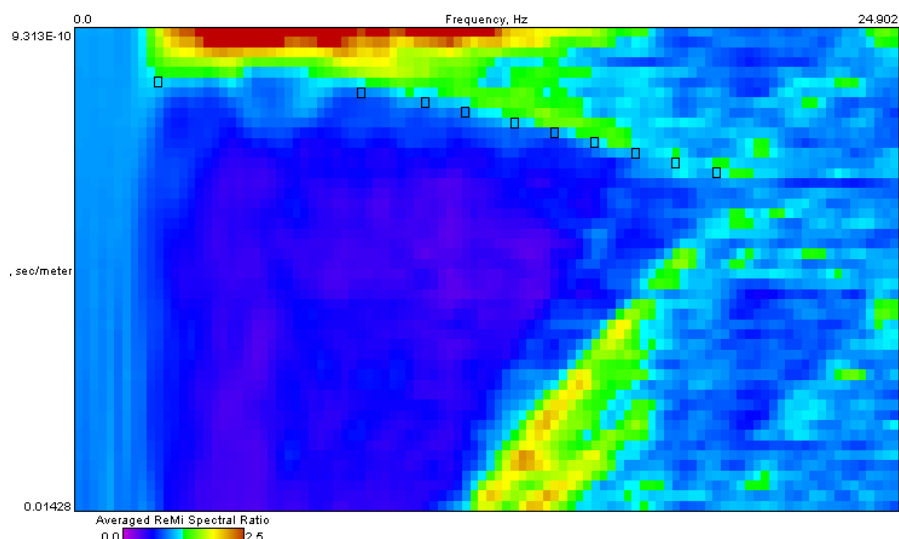


Figura 149. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-06



Figura 150. Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-06

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	135.802 m/s
6.8 m	1.8 g/cc	501.992 m/s
11.8 m	1.8 g/cc	601.175 m/s
26.6 m	1.8 g/cc	676.66 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	793.871 m/s

Figura 151. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EPVT-LG-06

La Figura 152 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-EPVT-LG-07. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 153, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 154 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 120 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.2 m hasta los 8.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 153 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.6 m hasta los 17.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 409 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 17.2 m hasta los 26.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 536 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 26.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 730 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

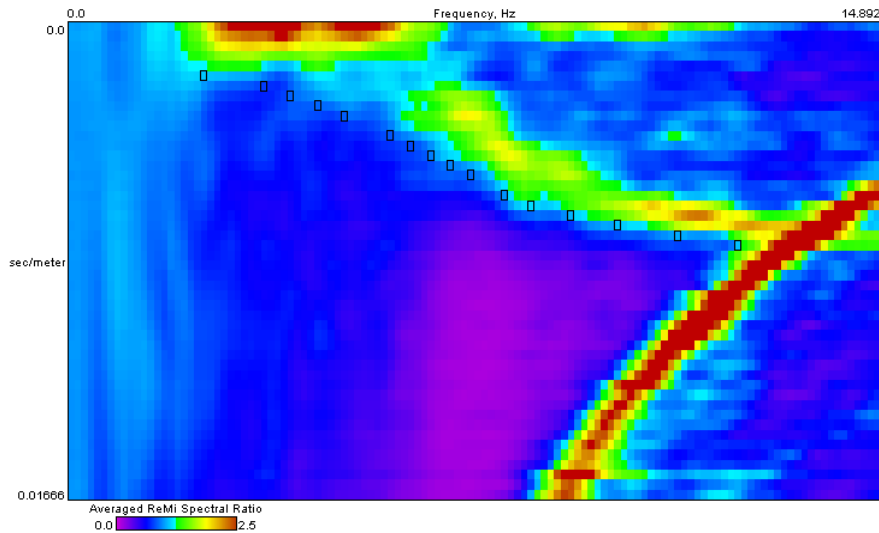


Figura 152. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-07

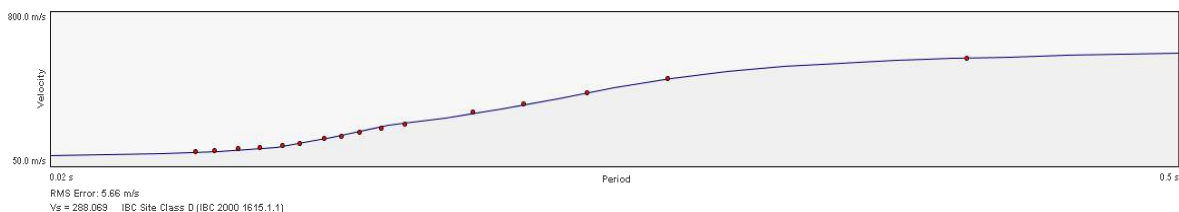


Figura 153. Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-07

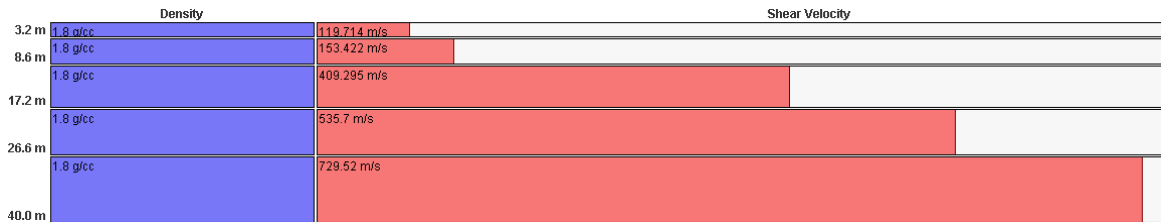


Figura 154. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-07

La Figura 155 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-EPVT-LG-08. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 156, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 157 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 116 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.8 m hasta los 8.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 148 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.4 m hasta los 14.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 410 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 14.0 m hasta los 24.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 514 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 24.4 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 746 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

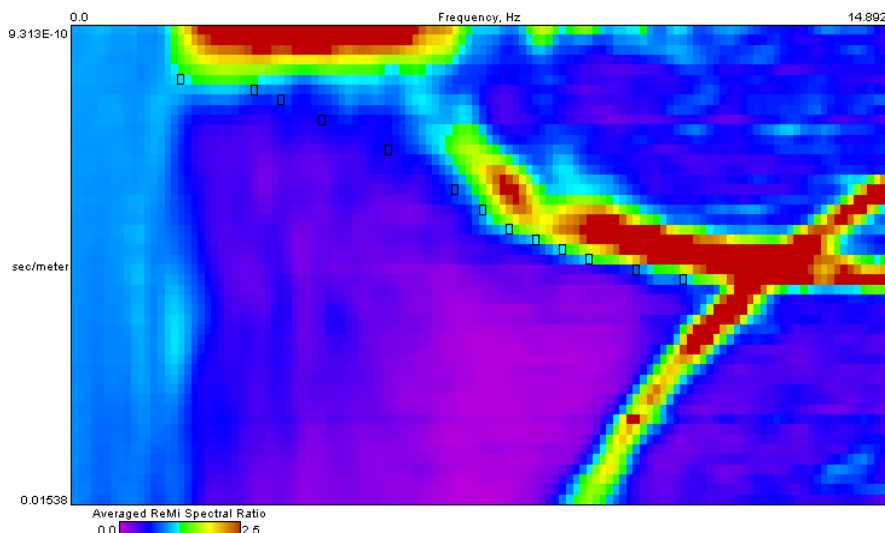


Figura 155. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EPVT-LG-08

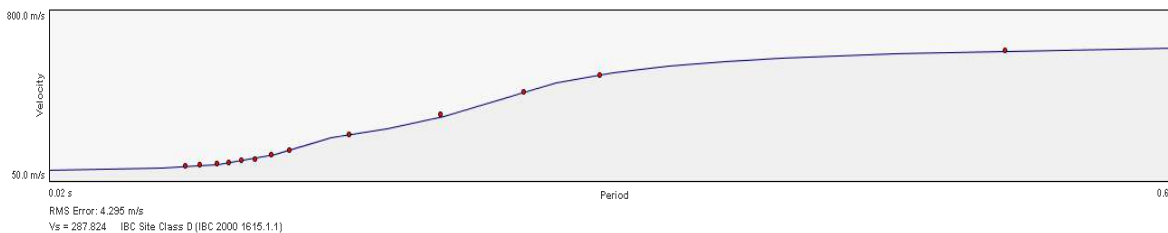


Figura 156. Dispersión y ajuste para la Línea U-EPVT-LG-08

	Density	Shear Velocity
3.8 m	1.8 g/cc	115.884 m/s
8.4 m	1.8 g/cc	148.059 m/s
14.0 m	1.8 g/cc	410.061 m/s
24.4 m	1.8 g/cc	514.249 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	745.608 m/s

Figura 157. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-EPVT-LG-08

En la Figura 158 se muestra el resultado del sondeo eléctrico vertical P-EP-SEV-03 en el que se observa la presencia de cuatro capas debido a sus cambios de resistividad. La forma de la curva de resistividad aparente (curva negra) se aproximó al modelo teórico (curva roja), con un porcentaje de error del 7.08%. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía:

- ✓ La primera capa cuenta con un espesor de 1.8 m con resistividad de 7.9 Ω.m.
- ✓ La segunda capa tiene un espesor de 5.94 m con resistividad de 3.8 Ω.m.

- ✓ Desde los 7.74 m hasta 40 m de profundidad se registró una resistividad de 27.9 Ω .m.

En el sondeo P-EP-SEV-03 se distinguieron tres capas que se interpretan en su orden por un depósito del tipo flujo de lodo el cual no supera los 1.8 m de espesor; seguido por un depósito de vertiente del tipo flujo de escombros altamente meteorizado, con un espesor de 5.94 m, saturado de líquidos y con presencia de cobre en suspensión; por último se encuentra el material arcillo limoso moderadamente húmedo producto de la meteorización de la Dunita de Medellín.

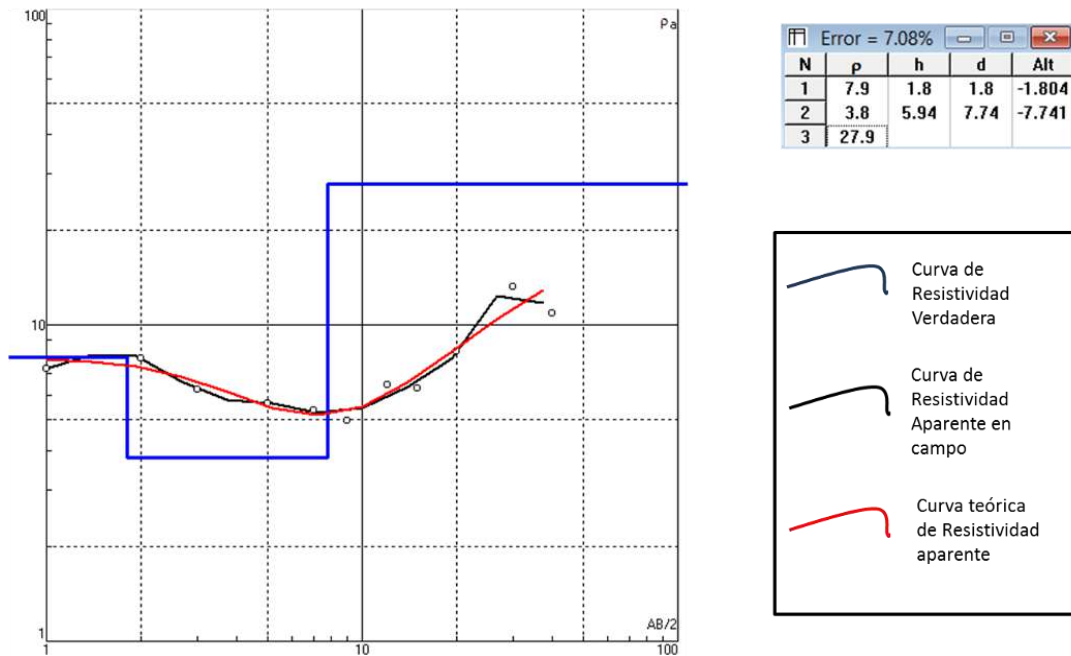


Figura 158. Curva de resistividad vs profundidad (AB/2), P-EP-SEV-03.

10.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos.

Durante la etapa de exploración en campo (superficial y profunda), se recuperaron muestras alteradas e inalteradas a diferentes profundidades. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son: humedad natural (ASTM D2216), límites de consistencia (ASTM D4318), granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 (ASTM D422), y gravedad específica (ASTM D854). Sobre las

muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo según la norma ASTM D3080 el cual está únicamente estandarizado para condiciones consolidadas drenadas (CD), debido a la imposibilidad de garantizar que la muestra falla en condiciones no drenadas.

La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales, no obstante esta se concentró principalmente en la búsqueda y conformación de una base de datos de ensayos de resistencia al cortante. Para los ensayos de clasificación no se consideró relevante procesar una base de datos, dado el volumen de información que en este aspecto se tiene, pero principalmente por el hecho de que dicha información no juega un papel importante en la modelación de la estabilidad y la obtención de la amenaza, estableciéndose que la información generada propiamente para este estudio en cuanto a la obtención de las propiedades índice, se considera información adecuada y suficiente.

En cuanto a los ensayos de resistencia al cortante, sólo fueron tenidos en cuenta aquellos ensayos que se encontraron cerca de la zona de estudio y que correspondieran a ensayos que modelaran condiciones drenadas y presentaran parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas. Estos ensayos fueron entonces cortes directos modalidad consolidado drenado (CD) y ensayos de compresión triaxial modalidad consolidado drenado (CD) y consolidado no drenado (CU), en estos últimos siempre y cuando se tuviera lectura de presiones de poros. Ensayos de resistencia al corte en modalidad consolidado no drenado (CU) o no consolidado no drenado (UU) que presentan parámetros de resistencia al corte en condiciones totales no fueron tenidos en cuenta para la compilación y procesamiento de la base de datos.

En el Anexo 03 de este informe se presentan los resultados completos de los ensayos de clasificación y resistencia al corte ejecutados para este proyecto y adicionalmente se presenta la base de datos conformada para la caracterización mecánica de los materiales.

10.2.1 Ensayos de clasificación

La Tabla 31 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 32 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

Tabla 31. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
U-EP-PP-02	M1	1-1.45	Cenizas volcánicas removilizadas	0.8	49	NP		0	1	99	ML

Tabla 31. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EP-PR-17	M2	1.55-2	Lleno antrópico	17.7	40	7	3.2	63.0	23.0	14.0	GM
P-EP-PR-18	M2	1.00 - 1.45	Lleno antrópico	4.30	49.00	7.00	6.39	33.00	22.00	45.00	GM
P-EP-PR-22	M2	1.00 - 1.45	Lleno antrópico	10.60	30.00			0.00	54.00	46.00	SM
P-EP-PR-18	M4	3.00 - 3.45	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	26.80	43.00	9.00	1.80	3.00	24.00	73.00	ML
U-EP-PP-02	M3	3-3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	1.2	57	5	11.2	3.0	7.0	90.0	MH
U-EP-PP-02	M6-M7	6-7.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	52.1	61	5	1.8	1.0	17.0	82.0	MH
U-EP-PP-02	M10-M11	10-11.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	19.5	45	7	3.6	6.0	27.0	67.0	ML
U-EP-PP-03	M6	2.3-2.7	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	50.9	54	NP		0.0	16.0	84.0	ML
U-EP-PP-03	M12-M13	5-5.9	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.8	63	18	1.1	44.0	23.0	33.0	GM
U-EP-PP-03	M18-M19	7.7-8.6	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.2	64	26	1.0	22.0	28.0	50.0	MH
P-EP-PR-17	M8	7-7.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.0	100	50	1.3	63.0	22.0	15.0	GM
P-EP-PR-18	M6	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	28.00	58.00	9.00	3.33	0.00	28.00	72.00	MH
P-EP-PR-18	M8	7.00 - 7.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	18.50	57.00	7.00	5.50	1.00	18.00	81.00	MH
P-EP-PR-18	M10	9.00 - 9.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	19.10	60.00	6.00	6.82	0.00	16.00	84.00	MH

Tabla 31. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EP-PR-20	M1	0.00 - 1.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.30	54.00	19.00	0.88	16.00	17.00	67.00	MH
P-EP-PR-20	M3	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.90	38.00	1.00	0.10	0.00	30.00	70.00	ML
P-EP-PR-17	M10	8-9.0	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	22.6		0		0.0	96.0	4.0	SP
P-EP-PR-17	M14	12-13.0	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	22.1		0		0.0	96.0	4.0	SP
P-EP-PR-17	M17	15-16.0	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	22.0		0		0.0	94.0	6.0	SP-SM
P-EP-PR-17	M21	19-20.0	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	12.3		0		43.0	57.0	0.0	SW
P-EP-PR-19	M2	2.55-3	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	9.6	26	0		0.0	78.0	22.0	SM
P-EP-PR-19	M4	4.55-5	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	12.4		0		0.0	81.0	19.0	SM
P-EP-PR-19	M6	6-7.55	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	20.8		0		0.0	86.0	14.0	SM
P-EP-PR-19	M10-M11-M12	10.55-13	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	16.7		0		0.0	87.0	13.0	SM
P-EP-PR-19	M14	14.55-15	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	16.3		0		1.0	86.0	13.0	SM
P-EP-PR-19	M19	19-20	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	7.9	38	15	2.0	31.0	51.0	18.0	SC
P-EP-PR-21	M3	2-2.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	15.3		0		6.0	79.0	15.0	SM
P-EP-PR-21	M5	4-4.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	19.4	24	1	4.6	68.0	26.0	6.0	GW-GM

Tabla 31. Resumen de resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EP-PR-21	M10	8.45-9.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	0.8				3.0	92.0	6.0	SP-SM
P-EP-PR-21	M12	10.45-11.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	15.2		0		5.0	92.0	3.0	SP
P-EP-PR-21	M15	13.45-14.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	9.8				5.0	87.0	7.0	SW-SM
P-EP-PR-22	M7	6.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	11.40	31.00			0.00	57.00	43.00	SM
P-EP-PR-22	M9	8.00 - 8.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	12.80	34.00			0.00	56.00	44.00	SM
P-EP-PR-22	M13	12.00 - 12.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	13.50	31.00			1.00	58.00	41.00	SM
P-EP-PR-22	M16-M17-M18	15.00 - 17.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	15.50	27.00			0.00	61.00	39.00	SM
P-EP-PR-22	M19	18.00 - 18.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	14.40	30.00	1.00	15.60	0.00	60.00	40.00	SM
P-EP-PR-22	M21	20.00 - 20.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	17.50	30.00	2.00	6.25	1.00	62.00	37.00	SM
P-EP-PR-18	M15	14.00 - 15.00	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	12.90	48.00	3.00	11.70	0.00	16.00	84.00	ML
P-EP-PR-21	M23	22-23.0	Transición (IIA) de Batolito Antioqueño	0.4		0		30.0	69.0	1.0	SW

Tabla 32. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S [%]
U-EP-PP-02	M6-M7	6-7.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	52.1	3.03	1.64	96.0
U-EP-PP-03	M12-M13	5-5.9	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.8	3.00	1.46	88.0
P-EP-PR-20	M3	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.90	3.10	1.45	80.98
P-EP-PR-17	M21	19-20.0	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	12.3	2.79	0.72	47.8
P-EP-PR-19	M14	14.55-15	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	16.3	2.752	0.75	59.5
P-EP-PR-21	M3	2-2.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	15.3	2.79	0.76	55.9
P-EP-PR-21	M5	4-4.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	19.4	2.83	0.85	64.4
P-EP-PR-22	M9	8.00 - 8.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	12.80	2.69	0.66	51.97
P-EP-PR-22	M19	18.00 - 18.45	Residual (IB-IC) de Batolito Antioqueño	14.40	2.70	0.69	56.24
P-EP-PR-18	M15	14.00 - 15.00	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	12.90	3.08	1.16	34.28

Para el análisis de esta información se trazaron las gráficas que se presentan en la Figura 159 hasta la Figura 162. El conjunto de gráficas mencionado muestra la clasificación de la fracción fina de los materiales en la Carta de Plasticidad de Casagrande, la variación en profundidad de la distribución granulométrica de las muestras, así como de la consistencia, relación de vacíos y saturación.

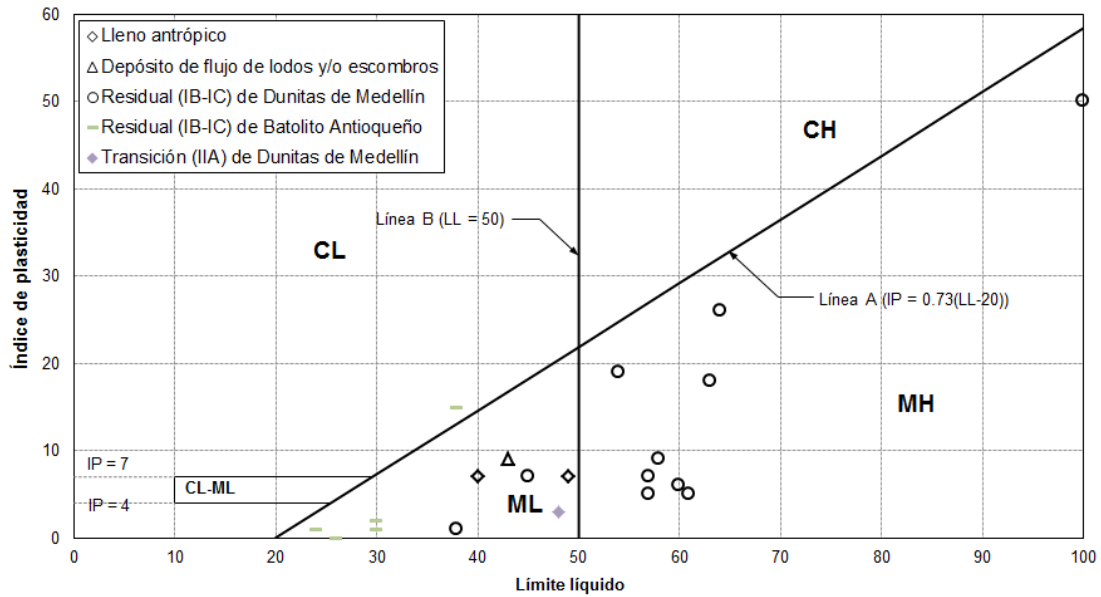


Figura 159. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande

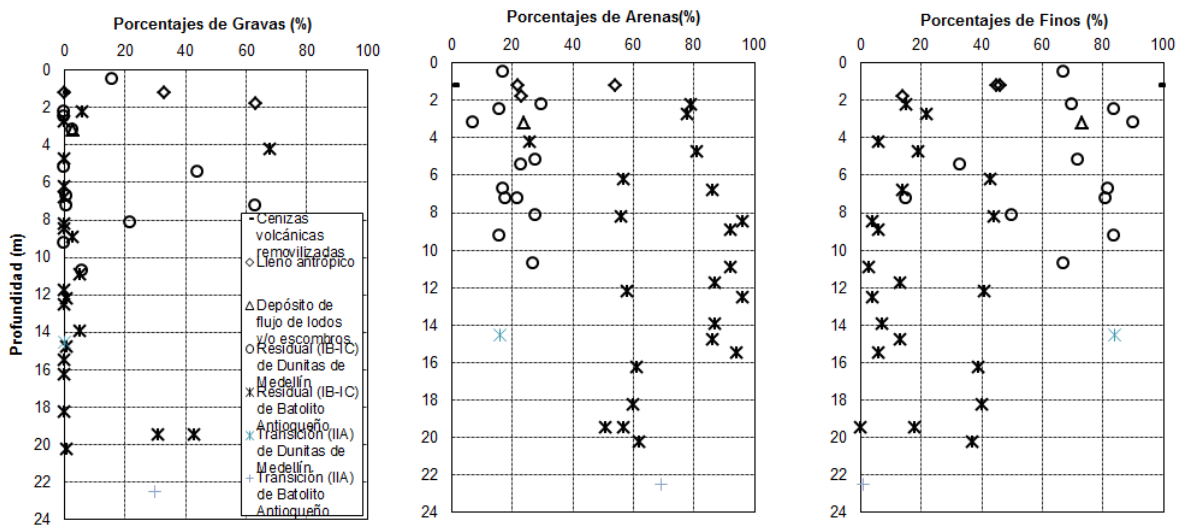


Figura 160. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad

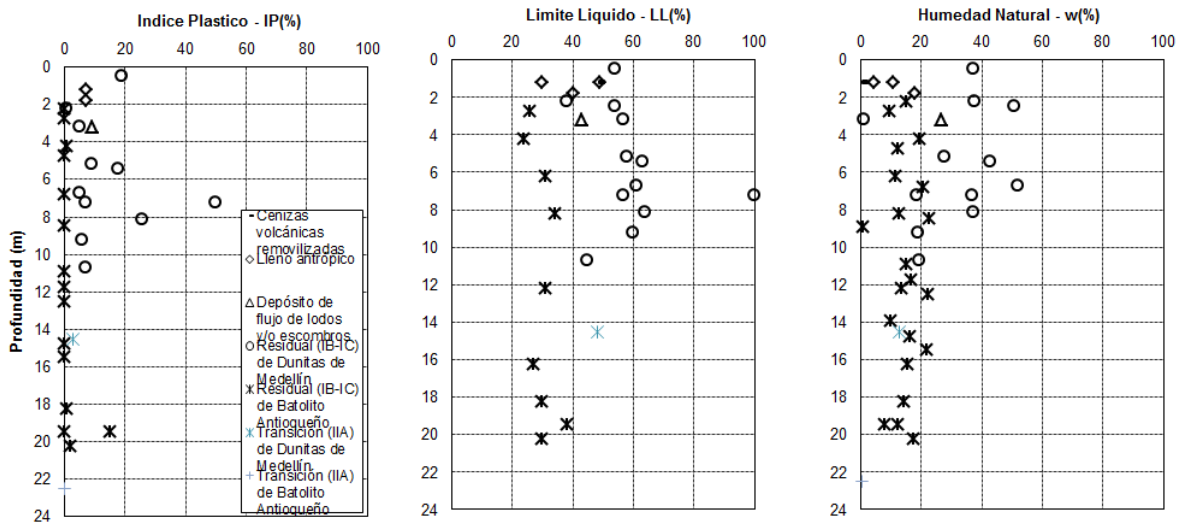


Figura 161. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad

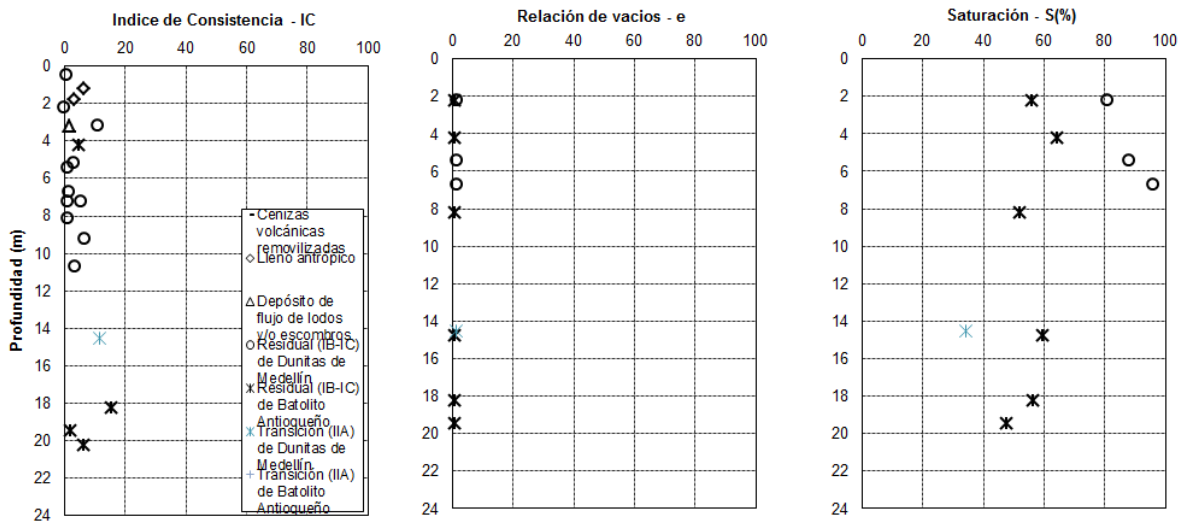




Figura 162. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad

En las cenizas removilizadas se tiene un predominio de fracción fina con un contenido del 99 %, arenas del 1 % y gravas del 0%. El límite líquido tiene un valor de 49, mientras que el límite plástico tiene un valor de 50, obteniendo un índice de plasticidad negativo, el cual indica que se está ante un suelo no plástico. De acuerdo con esto el material clasifica como un limo de baja plasticidad (ML).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

En el llano antrópico predominó la fracción gruesa con 0% a 63% de gravas, 22% a 54% de arenas y 14% a 46% de finos. El límite líquido tiene un valor entre 30 y 40 (a la izquierda de la línea B), el límite plástico varía entre 33 y 42, obteniendo un índice plasticidad de 7 (debajo de la línea A) lo que indica que los materiales son de baja plasticidad. Por lo anterior, el material en su mayoría clasifica como una grava limosa (GM), de acuerdo con el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, no obstante también se encontró material que clasifica como arena limosa (SM).

En los suelos residuales (IB-IC) de Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido entre 15 % y 90 % de finos, 7 % a 30 % de arenas y 0 % a 63 % de gravas. La fracción fina de la mayoría de las muestras presentó límites líquidos superiores a 50 (derecha de la línea B), límites de plasticidad entre 35 y 56, e índices de plasticidad variando de 0 a 50 (debajo de la línea A). De acuerdo con lo anterior, la mayoría de las muestras analizadas clasificaron como limos de alta (MH) y baja plasticidad (ML), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos. La gravedad específica de los materiales tiene un valor medio de 3.0, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, se tiene una relación de vacíos promedio de 1.5, mostrando que se tienen materiales porosos, con saturaciones superiores al 80 %.

En los suelos residuales (IB-IC) de Batolito Antioqueño predominó la fracción gruesa, con un contenido de gravas entre 0 % y 68 %, arenas variando del 26 % al 96 %, y finalmente un contenido de finos entre 0 % y 44 %. La fracción fina de la mayoría de las muestras exhibió un comportamiento poco plástico o no plástico, con índices de plasticidad que tomaron valores entre 0 y 15. De acuerdo con lo anterior, las muestras clasificaron principalmente como arenas limosas (SM) y arenas mal gradadas (SP), según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. La gravedad específica de los materiales presentó un valor medio de 2.76, indicando que posiblemente el contenido de minerales pesados es inferior al presentado por la Dunita, considerando sus diferencias composicionales. Por otra parte, las relaciones de vacíos presentaron un valor medio de 0.74, mientras que las saturaciones presentaron valores inferiores al 65 %.

En la matriz de Transición (IIA) de Batolito Antioqueño se presentó un predominio de la fracción gruesa, con un porcentaje de gravas del 30 %, arenas del 69 % y finos del 1 %. De acuerdo con esto el suelo clasificó como arena bien gradada (SW).

En la matriz de Transición (IIA) de Dunitas de Medellín se presentó un predominio de la fracción fina, con un porcentaje de gravas del 0 %, arenas del 16 % y finos del 84 %. De acuerdo con esto el suelo clasificó como limo de baja plasticidad (ML).

10.2.2 Ensayos de resistencia al corte

Para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo, se realizaron ensayos de corte directo según la Norma ASTM D3080. Este ensayo únicamente está estandarizado para condiciones consolidadas drenadas (CD), debido a la imposibilidad de garantizar que la muestra falla en condiciones no drenadas.

Al realizar la falla a la velocidad máxima recomendada por la norma, se garantiza la condición drenada del ensayo, por lo tanto los esfuerzos transmitidos al espécimen del ensayo son efectivos, por lo que la resistencia del suelo queda en términos de esfuerzos efectivos, siendo c' y ϕ' la cohesión y el ángulo de fricción interna los parámetros efectivos de la envolvente de resistencia al corte de Mohr-Coulomb.

Para este proyecto se realizaron tantos ensayos de resistencia al corte directo como fuera posible, con el propósito de obtener suficientes resultados para el análisis de variabilidad de los parámetros de resistencia al corte. Para el Polígono Esfuerzos de Paz se ejecutaron cuatro ensayos de corte directo modalidad CD.

- ✓ La Muestra UEP1-M1, a 1.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra U-EP-PP-02-M4, a 4.2 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra U-EP-PP-03-M3, a 1.1 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ La Muestra P-EP-PR-20-M2, a 1.5 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.

En la Tabla 33 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 163 a Figura 166 se presentan las envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras del Polígono Golondrinas.

Tabla 33. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	γ_h [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	Gs	e	S [%]	c' [kPa]	ϕ' [°]
UEP1-M1	1.0	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	36.2	16.8	12.4	2.90	1.3	79.0	55.00	23.00
U-EP-PP-02-M4	4.2	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	46.9	17.3	11.8	3.31	1.8	89.0	45.00	28.00
U-EP-PP-03-M3	1.1	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	43.1	15.9	11.1	3.30	1.9	74.0	33.00	20.00
P-EP-PR-20-M2	1.5	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	31.2	18.2	13.9	3.00	1.1	85.0	47.00	23.00

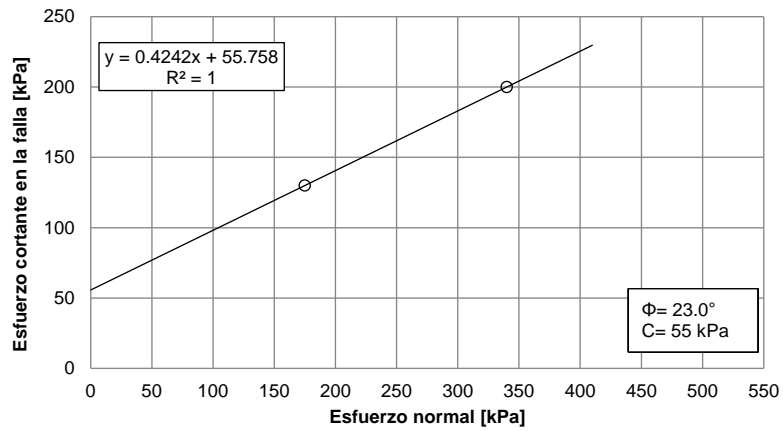


Figura 163. Resultados corte directo Muestra UEP1-M1 a 1.0 m de profundidad

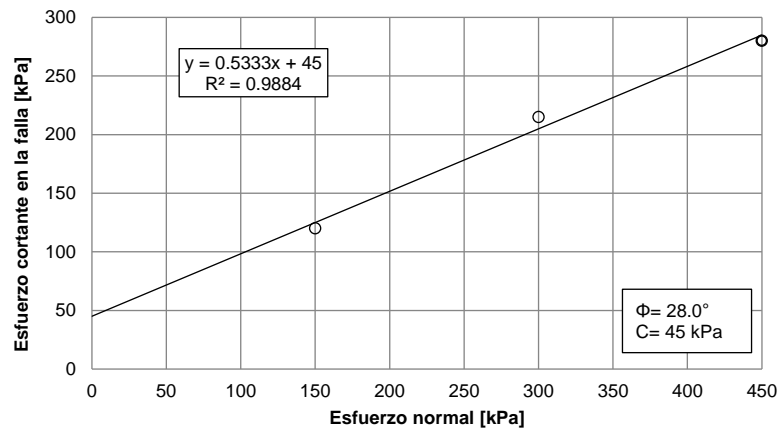


Figura 164. Resultados corte directo Muestra U-EP-PP-02-M4 a 4.2 m de profundidad

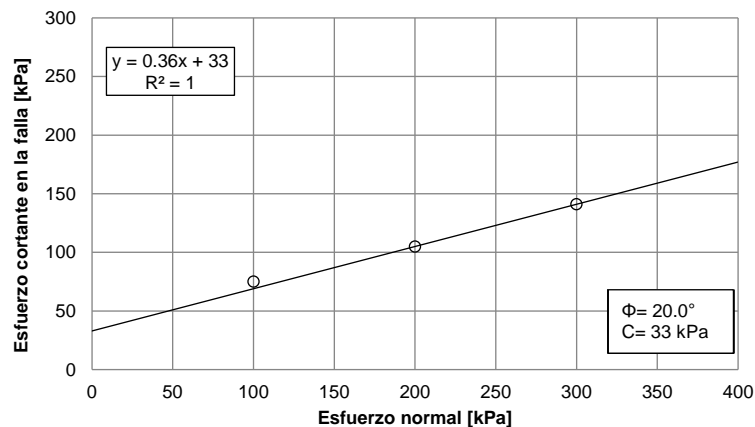


Figura 165. Resultados corte directo Muestra U-EP-PP-03-M3 a 1.1 m de profundidad

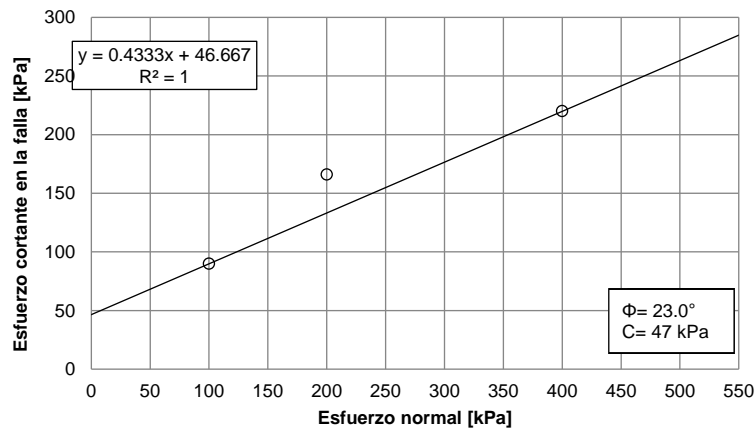


Figura 166. Resultados corte directo Muestra P-EP-PR-20-M2 a 1.5 m de profundidad

10.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES

10.3.1 Aspectos generales

Como parte de este estudio, fueron recopilados todos los ensayos de resistencia al corte realizados en la zona de interés, efectuados por las empresas DEACIVIL y CONSULCIVIL. Además, se utilizaron los ensayos de resistencia al corte ejecutados por INTEINSA en proyectos cercanos a la zona de estudio y ensayos propios del proyecto.

Los resultados de los ensayos de laboratorio recopilados sugieren una variabilidad considerable de las propiedades geotécnicas de los materiales. Por esto, se realizó un análisis estadístico de las propiedades de los materiales que conformando el perfil geotécnico típico, representan mayor amenaza para el proyecto. Estos análisis son necesarios para la aplicación de cualquier método probabilístico que permita encontrar la probabilidad de falla de una ladera, objetivo primordial de este estudio.

Se identificaron primero las variables que generan incertidumbre siendo estas la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo. Fue asumida una función de distribución de probabilidad normal para cada uno de estos parámetros. Luego se determinaron los momentos estadísticos de bajo orden, es decir, la media y la desviación estándar. Adicionalmente, fue calculado la covarianza o coeficiente de variación (COV) de cada uno de los parámetros.

10.3.2 Lleno antrópico

El análisis de los parámetros de resistencia al corte, obtenidos a partir de los ensayos de corte directo recopilados para el lleno antrópico, se presenta en la Figura 168.

Se observa que estos materiales son predominantemente friccionantes, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 13.05 kPa con una desviación estándar asociada de ± 7.87 kPa. El coeficiente de variación es de 60%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 35 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.90° y una desviación estándar de $\pm 4.32^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 16%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 15° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del lleno antrópico presentó una media de 16.92 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.28 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 8%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

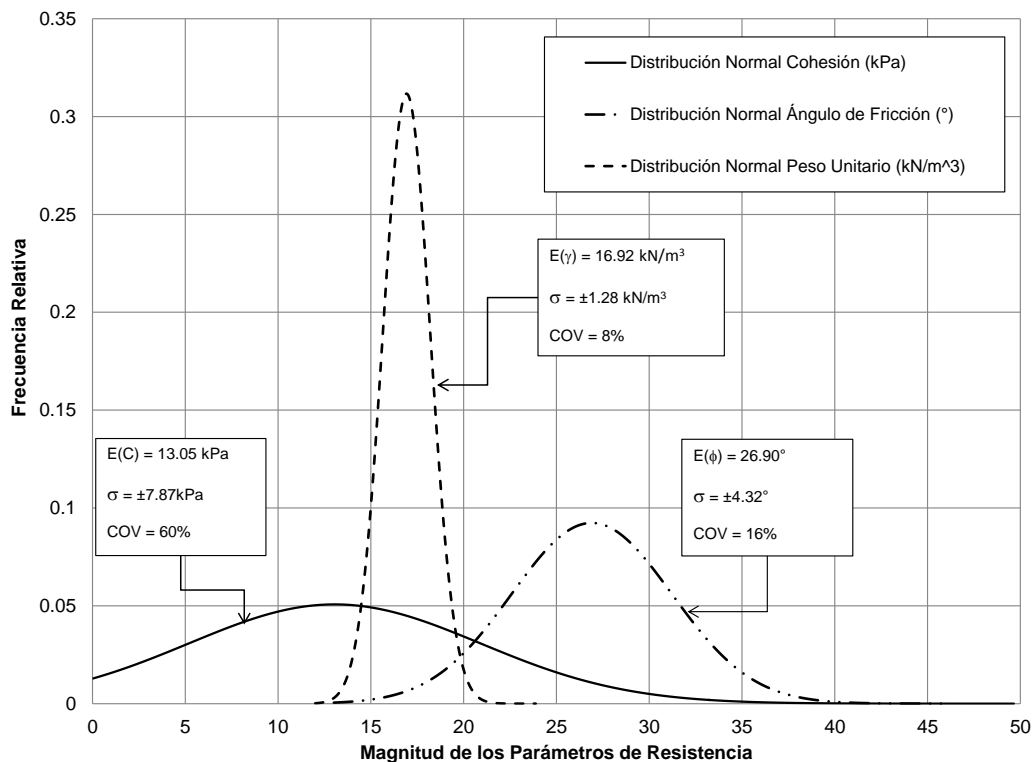




Figura 167. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

10.3.3 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros se presenta en la Figura 168.

Se observa que para estos materiales los parámetros se tornan friccionantes, consecuencia del aporte por contacto entre los materiales más gruesos que superan la matriz de suelo, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 22.79 kPa con una desviación estándar asociada de ± 13.87 kPa. El coeficiente de variación es de 61%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 24.13° y una desviación estándar de $\pm 5.48^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 23%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 37° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de 17.43 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.01 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 6%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 15 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

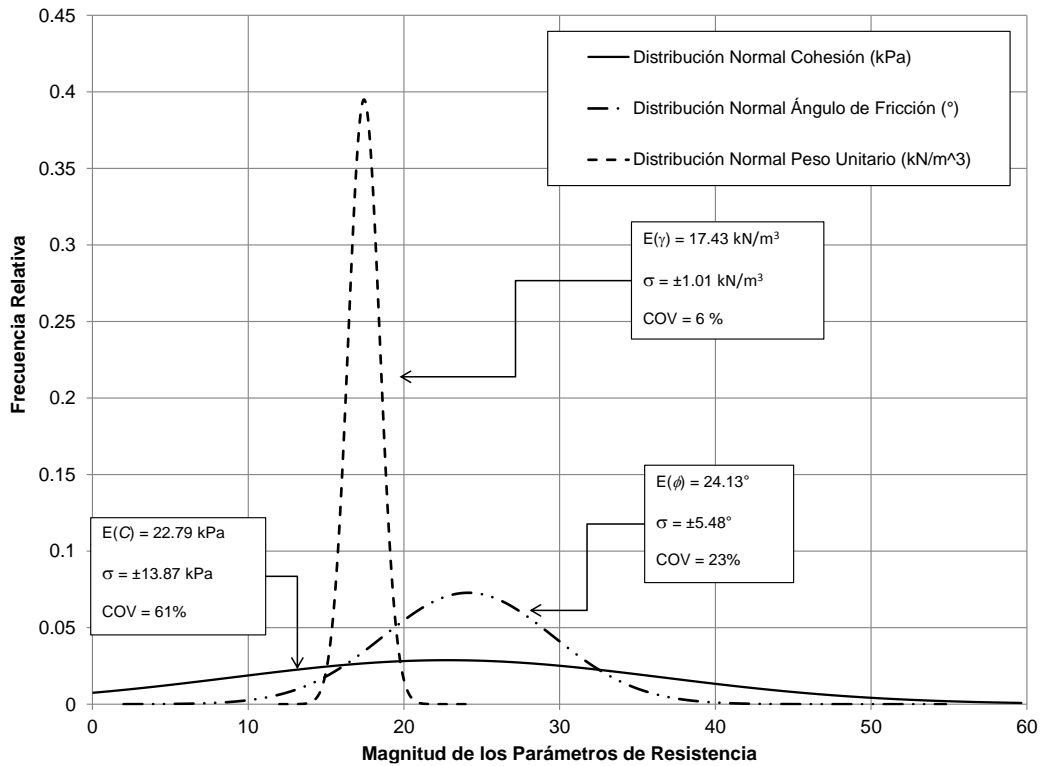


Figura 168. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente

10.3.4 Depósitos coluviales

Debido a la naturaleza de este material y que no se cuenta con ensayos de resistencia al corte, se asumen los parámetros similares a los de los depósitos de flujo de lodos. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de flujo de lodos, que se asumirá de forma conservadora para el depósito coluvial, se presenta en la Figura 168.

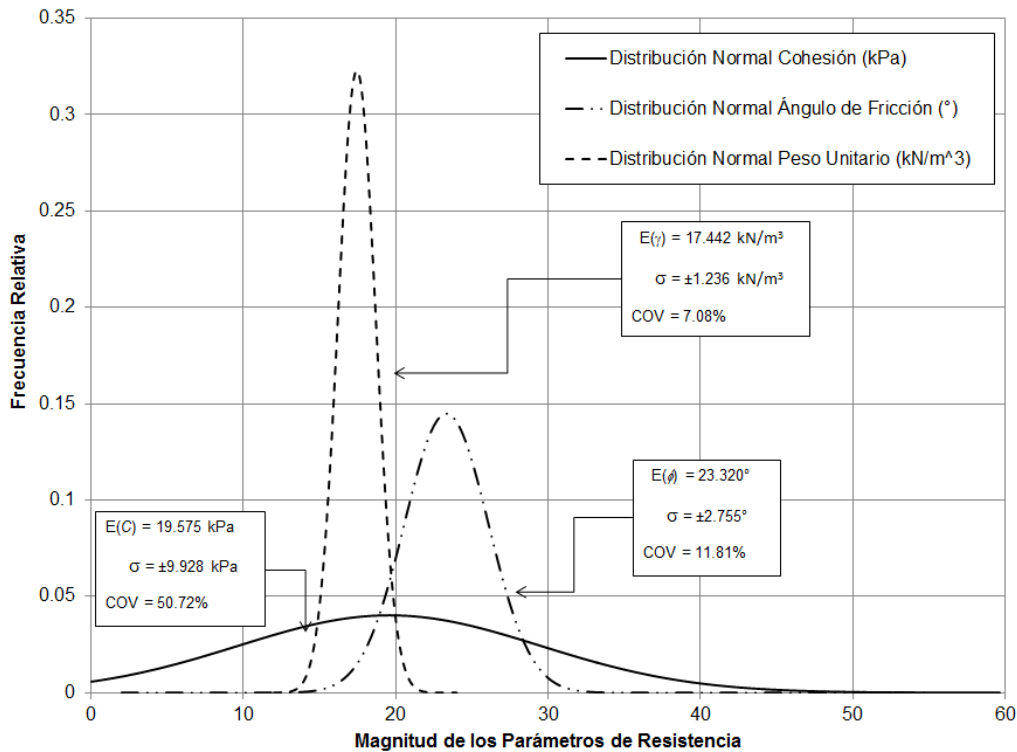


Figura 169. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos

Se observa que para estos materiales los parámetros se tornan cohesivos, consecuencia del aporte por contacto entre los materiales más gruesos que superan la matriz de suelo, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 19.575 kPa con una desviación estándar asociada de ± 9.928 kPa. El coeficiente de variación es de 50.72%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 23.320° y una desviación estándar de $\pm 2.755^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 11.81%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de 17.442 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.236 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.08%. Debido a su poca

variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 15 kN/m³ hasta 22 kN/m³.

10.3.5 Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el Residual de la Dunita de Medellín se presenta en la Figura 170.

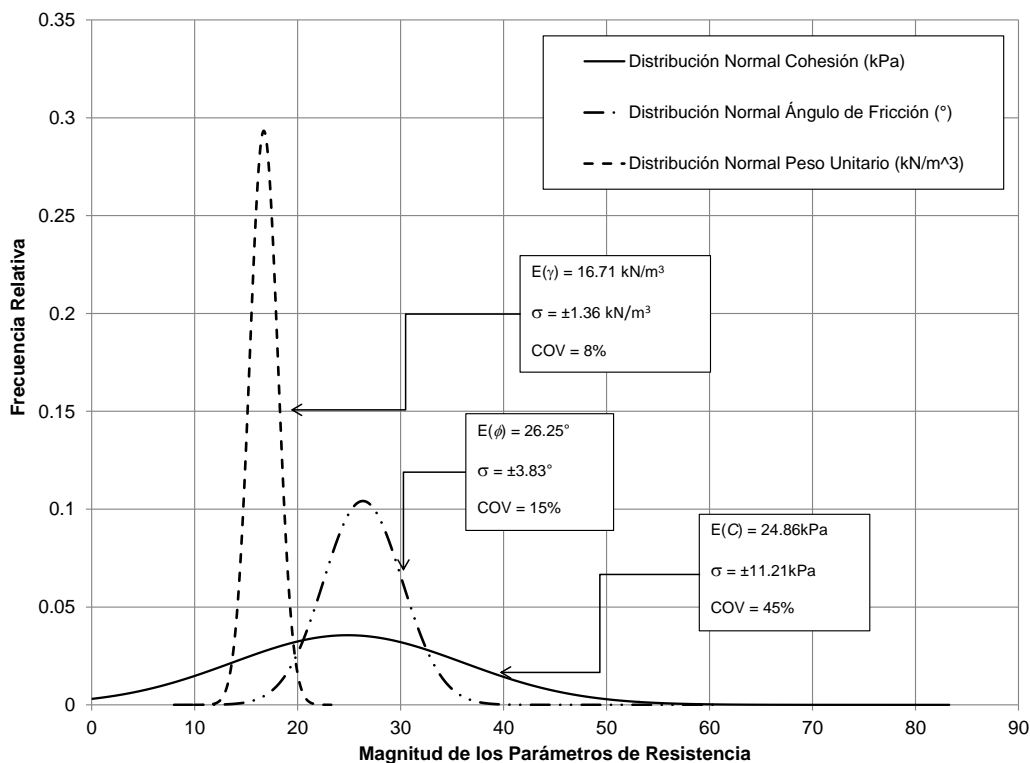




Figura 170. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas

En el caso del residual de la Dunita de Medellín los parámetros se tornan cohesivos, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 24.86 kPa con una desviación estándar asociada a $\pm 11.21 \text{ kPa}$. Para la cohesión se obtuvo un coeficiente de variación de 45%, que corresponde a la variabilidad más alta respecto a la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. La forma de la función de distribución para este material abarca magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.25° y una desviación estándar de $\pm 3.83^\circ$. El ángulo de fricción interna presenta un coeficiente de variación de 14.15%. La forma de la función de distribución abarca magnitudes del ángulo de fricción que van desde 18° hasta 36° aproximadamente.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

- ✓ Finalmente, el peso unitario del residual de la Dunita de Medellín presentó una media de 16.7 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.43 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 9%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m^3 hasta 21 kN/m^3 .

10.3.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el Batolito Antioqueño se presenta en la Figura 171.

En el caso del residual del Batolito Antioqueño los parámetros presentan las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 19.00 kPa con una desviación estándar asociada a $\pm 6.83 \text{ kPa}$. Para la cohesión se obtuvo un coeficiente de variación de 35.95%, que corresponde a la variabilidad más alta respecto a la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. La forma de la función de distribución para este material abarca magnitudes que van desde 9 kPa hasta 30 kPa .
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 29.00° y una desviación estándar de $\pm 5.34^\circ$. El ángulo de fricción interna presenta un coeficiente de variación de 18.41%. La forma de la función de distribución abarca magnitudes del ángulo de fricción que van desde 19° hasta 38° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del residual de la Dunita de Medellín presentó una media de 17.50 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.23 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.03%.

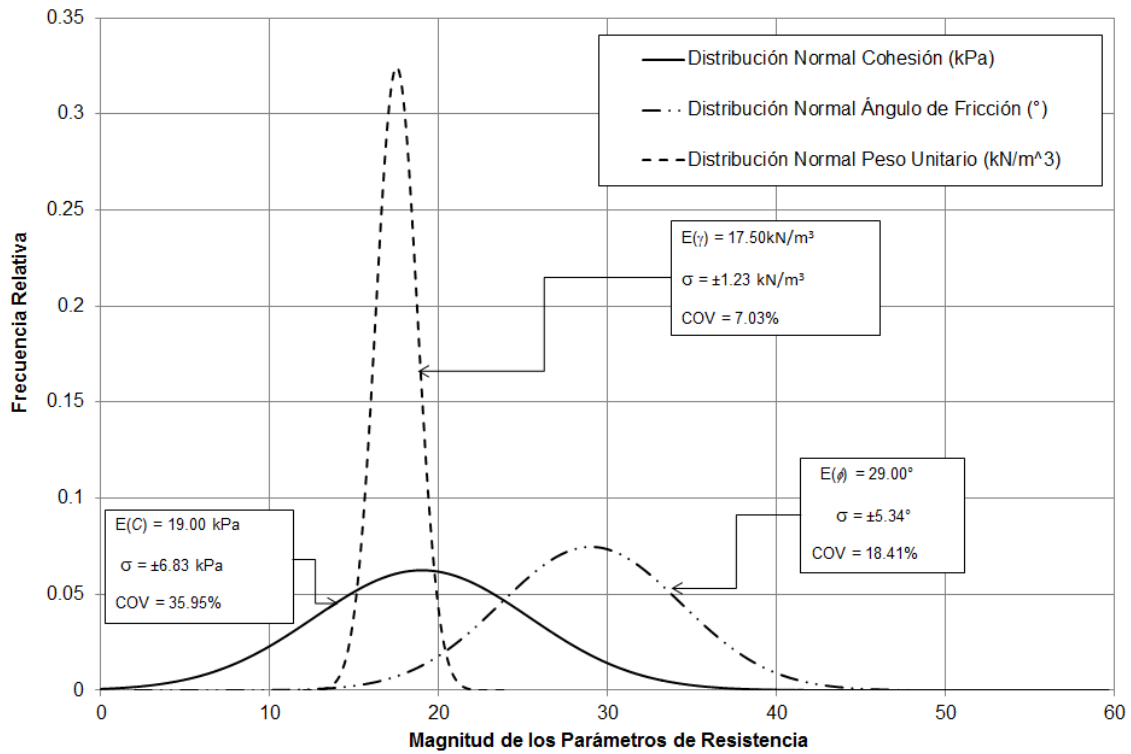


Figura 171. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados del Batolito Antioqueño

10.3.7 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte

En la Tabla 34 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

Tabla 34. Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales



Material	c' (kPa)			φ' (°)			γ (kN/m³)		
	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)
Lleno antrópico	13.05	7.87	60	26.90	4.32	16	16.92	1.28	8
Depósito de flujo de lodos y/o escombros	22.79	13.87	61	24.13	3.65	23	17.43	1.01	6
Depósito coluvial	19.57	9.93	51	23.32	2.75	11.81	17.44	1.24	7
Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	24.86	11.21	45	26.25	3.81	15	16.71	1.36	8

Tabla 34. Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales

Material	c' (kPa)			φ' (°)			γ (kN/m ³)		
	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)
Batolito Antioqueño	19.00	6.83	36	29.00	5.34	18.41	17.50	1.23	7

Cuando se comparan las variables estadísticas de los materiales estudiados con variables estadísticas presentes en la literatura, es posible identificar varias situaciones que caracterizan los materiales y permiten hacer una especie de validación de los parámetros.

- ✓ Inicialmente el parámetro cohesión, tomando como referencia el coeficiente de variación de los materiales oscila entre el 45% y el 63%. El-Ramly (2006) reporta coeficientes de variación de la cohesión efectiva, para materiales en general igual al 22%.
- ✓ En el caso del parámetro de ángulo de fricción interna, el coeficiente de variación para todos los materiales oscilo entre 11% y 16%. En la literatura se reportan coeficientes de variación de este parámetro entre 2% y 13% (Duncan, 2000).
- ✓ Finalmente, en el caso del peso unitario húmedo, el coeficiente de variación no superó el 10%, presentándose reportes en la literatura de este parámetro entre 3% y 7% (Duncan, 2000).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

11. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

11.1 GENERALIDADES

La zona completa de estudio, que comprende la parte alta de las Comunas 3 y 8 de la ciudad de Medellín, se caracteriza por ser cruzada por un sistema de drenaje natural que corre de manera general de oriente a occidente y que alimenta la Quebrada Santa Elena y finalmente al Río Medellín. La dinámica natural de este sistema de drenaje podría constituir una fuente de amenaza para la mancha urbana que se ha desarrollado y expandido en las últimas décadas, dado que gran parte de ese desarrollo se ha realizado con asentamientos bastante cercanos a los cauces y a las corrientes naturales. Esta dinámica de las corrientes naturales es función de las características del clima, en particular del régimen de lluvias de la zona, y de las características geológicas y geomorfológicas del terreno.

En este capítulo se describen y caracterizan desde el punto de vista hidrológico las cuencas de drenaje natural que tienen influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la UMI Esfuerzos de Paz. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la estimación de los caudales máximos en cada uno de los cauces.

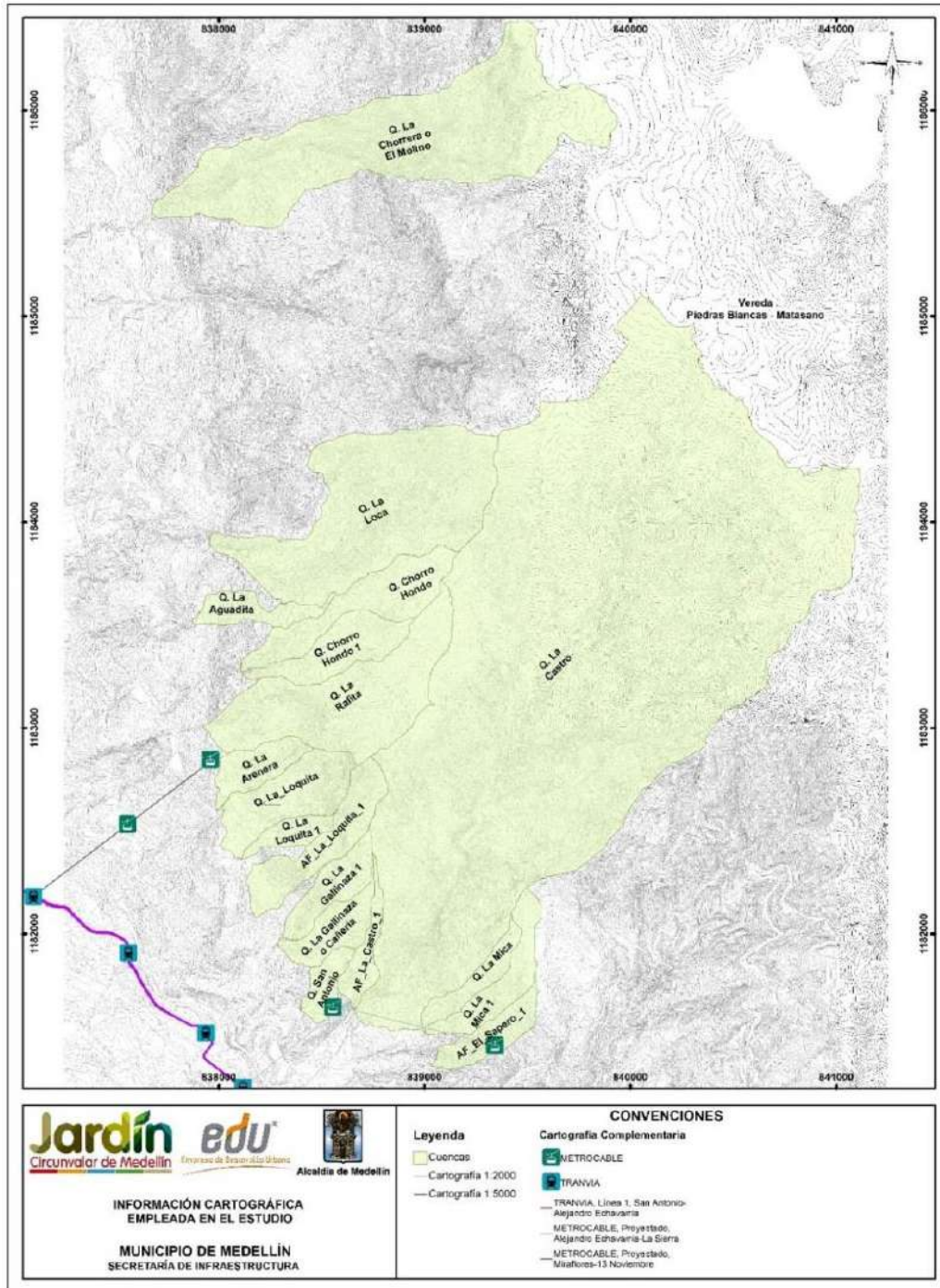
11.2 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

Como parte importante del desarrollo del presente estudio de riesgo, se realizó un proceso de recopilación de información secundaria que es fundamental para los análisis hidrológicos e hidráulicos, así como para la evaluación de la amenaza y el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

En primer lugar, se realizó la recopilación de la información cartográfica, que sirvió como punto de partida para la delimitación y caracterización geomorfológica de las cuencas. Dentro de esta información se recopiló lo siguiente:

- ✓ Cartografía del Proyecto SIGAME (1998) del Valle de Aburrá en escala 1:5000 y 1:2000 para zonas rurales y para zonas urbanas respectivamente.
- ✓ Ortofoto de la zona del proyecto suministrada por la Empresa de Desarrollo Urbano (Realizada en 2010).
- ✓ Fotografías satelitales tomadas del software Google Earth.

Las zonas cubiertas por cada una de las cartografías empleadas en el estudio se pueden observar en el Mapa 25. Se tiene que para 16 de las 18 cuencas estudiadas en el Proyecto Barrios Sostenibles la cartografía con escala 1:2000 cubre totalmente el área comprendida por cada una. En el caso de las cuencas de las Quebradas La Chorrera o El Molino y la Quebrada La Castro se debió complementar la información cartográfica de escala 1:2000 con la correspondiente a una escala 1:5000, el tamaño del pixel utilizado, para la delimitación de la cuenca es de 2.0 m, acorde a la escala de trabajo.



Mapa 25. Información cartográfica empleada en el estudio
(EFRInformacion Cartografica_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
--	--	--

Adicionalmente, se recopiló información de las estaciones hidrometeorológicas de las estaciones pluviométricas y pluviográficas que se encuentran ubicadas en la zona de estudio o cerca de ella. En particular, se recopiló la siguiente información:

- ✓ Curvas Intensidad Duración Frecuencia de las estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín, publicadas la revista hidrometeorológica de EPM del 2005.
- ✓ Registros de precipitación de estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA).

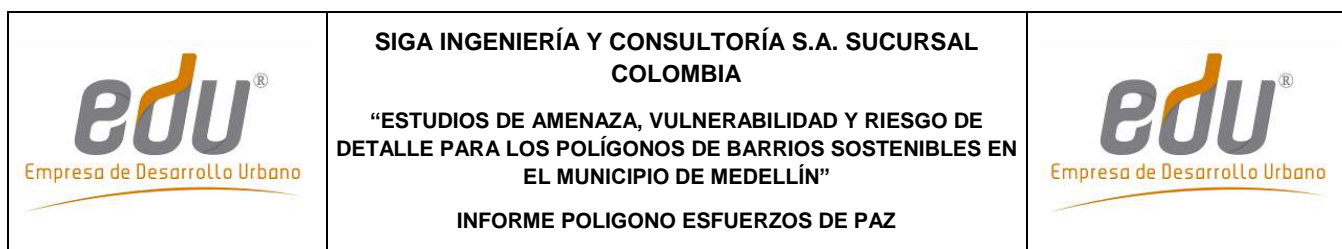
Como insumo importante para este estudio, la Empresa de Desarrollo Urbano suministró estudios previos relacionados con hidrología e hidráulica en algunos de los cauces que son objeto del presente estudio. Los estudios suministrados por la EDU corresponden a los siguientes:

- ✓ Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano. Realizado por INGEOCILCON (2014)
- ✓ Revisión de la información de los estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto cinturón verde metropolitano tramo 1 sector cerro Pan de Azúcar camino de la vida. Realizado por CONCAVAS (2013).

En los primeros estudios, realizados por INGEOCILCON, se encuentran los análisis hidrológicos e hidráulicos para 17 quebradas del llamado Cinturón Verde. De forma similar, en los estudios realizados por CONCAVAS, se encuentran los estudios hidrológicos e hidráulicos para 6 quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas corrientes, ninguna corresponde a corrientes ubicadas al interior del Polígono Esfuerzos de Paz, pero algunas se encuentran cercanas y por tanto se tuvieron en cuenta como punto de referencia. Específicamente, del componente hidrológico se destaca la regionalización hecha por INGEOCILCON a partir de los resultados obtenidos para las 17 cuencas mediante el método racional para la estimación de caudales máximos.

11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

En la zona de estudio o cerca de ella se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). Entre todas estas estaciones, las de mayor interés para éste proyecto corresponden a aquellas que son operadas por EPM dado que cuentan actualmente con un periodo de registro que supera los 40 años, y porque presentan mayor certidumbre en registros de corto tiempo por contar con equipos tipo pluviógrafo. Por su parte, las estaciones del IDEAM son de tipo pluviómetro y únicamente registran lluvias en 24 horas. Las estaciones del SIATA presentan información pluviográfica, pero adolecen de un amplio periodo de registros, ya que fueron



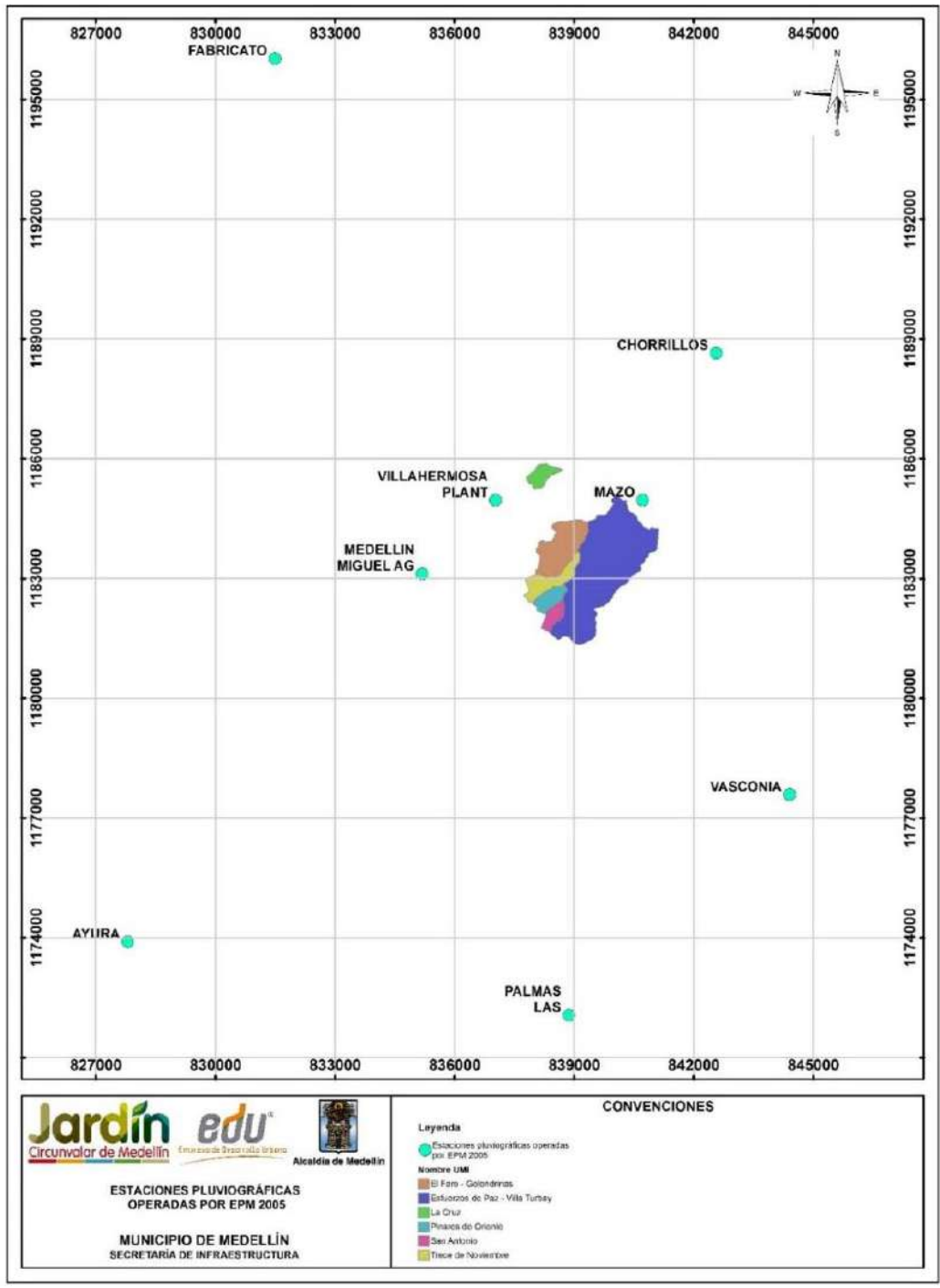
instaladas en una fecha igual o posterior al año 2010. Sin embargo, la información confiable y disponible del SIATA permitió comparar y validar algunas intensidades de diseño en la zona publicadas por EPM para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Así las cosas, para la obtención de las intensidades de la lluvia de diseño fueron consideradas las estaciones operadas por EPM y cuya información de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración fue publicada en la Revista Hidrometeorológica de dicha entidad en el año 2005. En la Tabla 35 se presenta un listado de las estaciones consideradas y en el Mapa 26 se muestra la ubicación de estas con respecto a la zona de estudio.

Tabla 35. Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual

CÓDIGO	ESTACIÓN	CATEGORÍA	FECHA INICIO	REGISTRO HASTA	ENTIDAD	ELEVACIÓN	MUNICIPIO	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)
27010930	AYURA	PG	15/02/1972	2011	EEPP	1770	ENVIGADO	1835.5
27010350	CHORRILLOS	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2353	MEDELLIN	1748.3
27010370	FABRICATO	PG	15/09/1949	2013	EEPP	2422	BELLO	1754.6
27010340	MAZO	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2455	MEDELLIN	1801.3
27010470	MEDELLIN MIGUEL AG	PG	15/06/1954	2013	EEPP	1549	MEDELLIN	1409.9
23080230	PALMAS LAS	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2495	RETIRO	2000.2
23080240	VASCONIA	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2510	RIONEGRO	2190.6
27010450	VILLAHERMOSA PLANT	PG	15/07/1948	2011	EEPP	1690	MEDELLIN	1582.4

A partir de la información de las estaciones pluviográficas de EPM se realizó un análisis de la distribución anual de la lluvia y del registro histórico anual de precipitaciones. La precipitación media multianual de la zona de estudio se estimó mediante una interpolación con el método del inverso cuadrado de la distancia a partir de las precipitaciones medias multianuales de las estaciones (Tabla 35). En el Anexo 3 (Figura 1) se muestra el mapa con la variación de la precipitación media multianual.



Mapa 26. Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005
(EDPEstacionesPluviograficasOperadasEPM2005_Medellin_C)

11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 172 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Planta Villa Hermosa para el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica de la derecha de la Figura 172 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la Estación Planta Villa Hermosa en el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que la precipitación máxima histórica (2349 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el Fenómeno La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

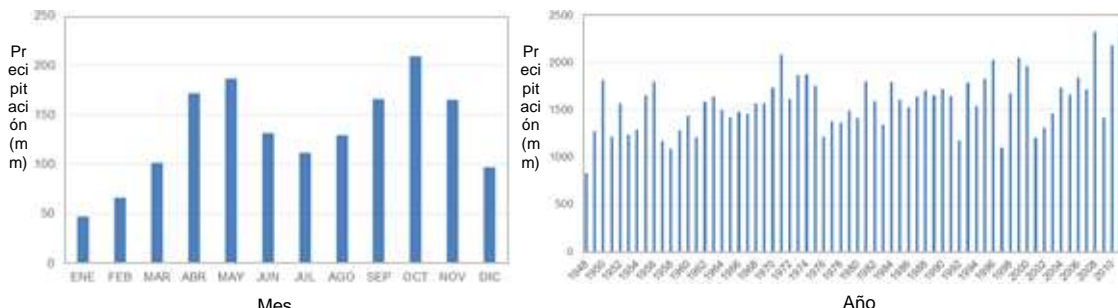


Figura 172. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa

11.3.2 Estación Mazo

En la gráfica a la izquierda de la Figura 173 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Mazo para el periodo comprendido entre 1948 y 2011.

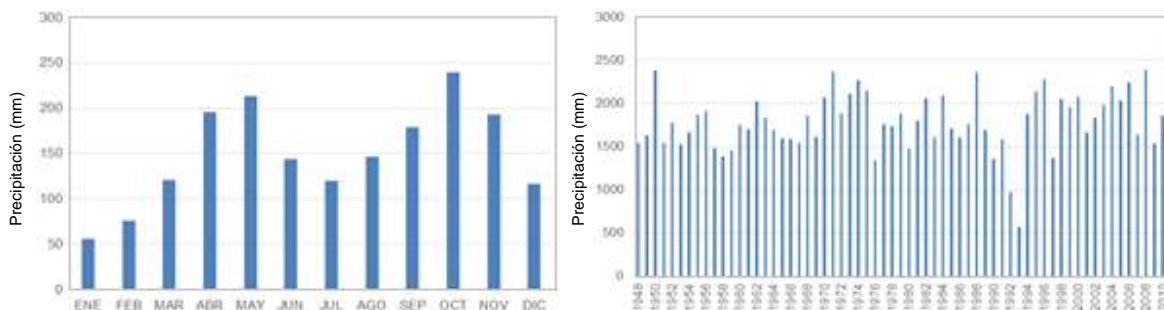


Figura 173. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo

Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 173 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la estación Mazo en el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2509 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el Fenómeno La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

11.3.3 Estación Miguel de Aguinaga

En la gráfica a la derecha de la Figura 174 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Miguel de Aguinaga para el periodo comprendido entre 1954 y 2013.

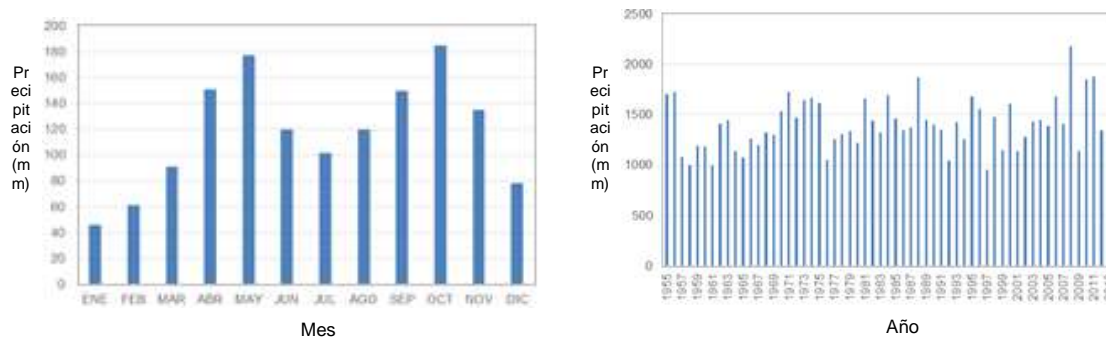


Figura 174. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga

Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 174 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la Estación Miguel de Aguinaga en el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2180 mm) se presentó en el año de 2008. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, ver Figura 175 , durante ese año se presentó el Fenómeno de La Niña.

A partir del análisis de las estaciones citadas, puede concluirse que en la zona de estudio actúa un régimen de precipitaciones bimodal, con dos periodos de lluvias fuertes que van de abril a junio y de septiembre a noviembre.

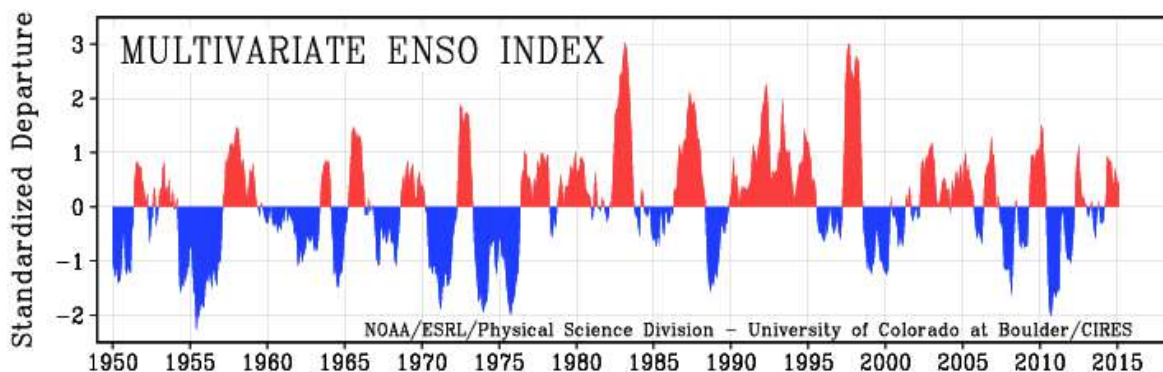


Figura 175. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)

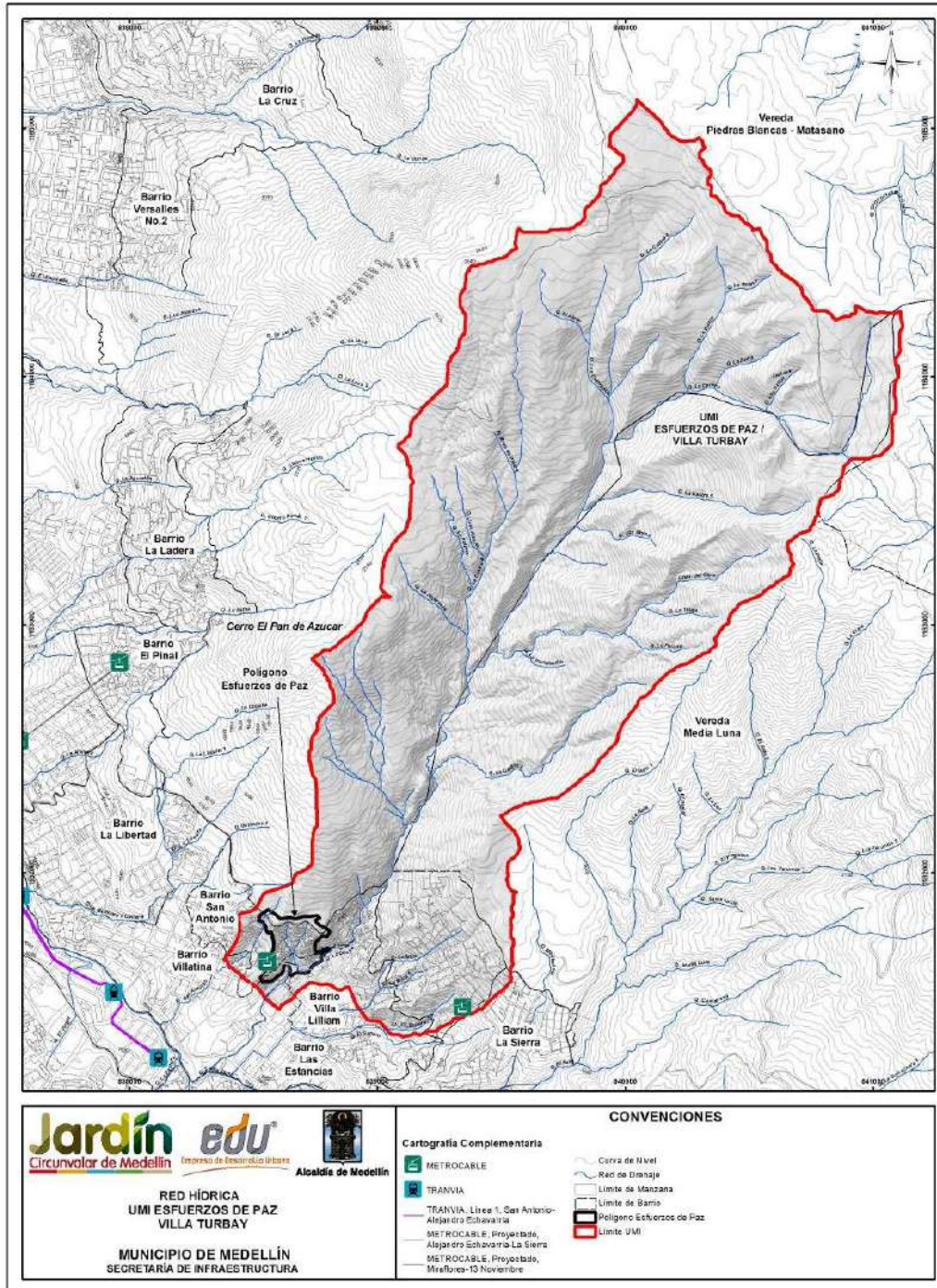
11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

En el Mapa 27 se presenta la red hídrica de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay y en el Mapa 28 se presenta la misma red de drenaje de la zona de estudio con las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz.

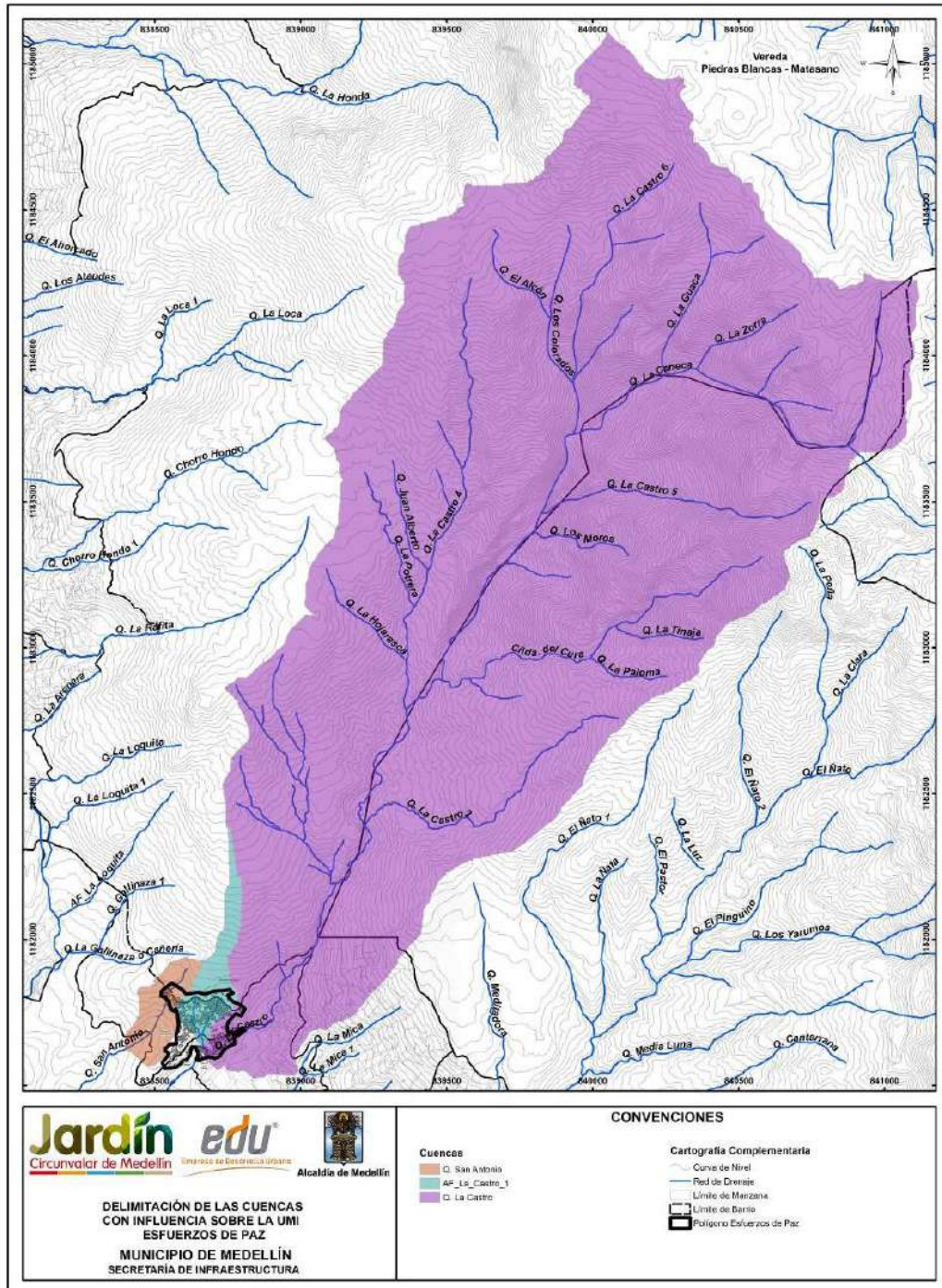
Esta red fue establecida a partir del modelo digital del terreno generado con la información cartográfica, incluyendo los cauces naturales que tienen influencia sobre cada uno de los ocho polígonos de interés para el presente estudio. Se sometió a revisión y validación con respecto a la red hídrica del Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2014) del Municipio de Medellín (2014 2015) y se detectó coherencia entre ambas redes. Adicionalmente, se observó coherencia con lo observado en la ortofoto de la zona de estudio. Por esta razón, se decide adoptar la red hídrica del POT como base para la elaboración del presente estudio.

En particular, para el Polígono y para la UMI Esfuerzos de Paz, las corrientes naturales que tienen influencia corresponden a las Quebradas La Castro y San Antonio, las cuales cruzan aproximadamente el Polígono por la parte Sur y Norte, respectivamente, y que su dirección de drenaje tiene sentido Nororiente-Suroccidente. También se tienen los Afluentes denominados AF La Castro 1 y AF La Castro 2 ubicados en la zona central, ambas con dirección de drenaje Norte-Sur, donde el primer Afluente descarga en la Quebrada La Castro y la el segundo descarga en el Afluente AF La Castro 1.

A partir del Modelo Digital de Elevación del Terreno y de la red de drenaje trazada, se delimitaron las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz, las cuales fueron nombradas de acuerdo con la corriente a la cual pertenecen.



Mapa 27. Red hídrica de la UMI Esfuerzos de Paz
 (20_EDPRedHidricaUMI_Medellin_C y 20_EDPRedHidricaUMI_Medellin_T)



Mapa 28. Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI Esfuerzos de Paz (EDPDelimitacionCuencasUMI_Medellin_C)

11.4.1 Parámetros morfométricos de las cuencas

A partir del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno, de la red de drenaje y del trazado de las cuencas, se hizo una caracterización morfométrica de cada una de ellas. Para el trazado de las cuencas se tuvo en consideración que estas debían abarcar el polígono objeto de este estudio. De esta manera, se presentan en la Tabla 36 las coordenadas de los puntos de salida del flujo para las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Por otro lado, en la Tabla 37 se presentan los parámetros morfométricos de cada cuenca. El tamaño del pixel del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno es de 2.0 m de lado, el cual es suficiente para delimitar con detalle las pequeñas cuencas del proyecto.

Tabla 36. Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca

PUNTO	CUENCA	X	Y
1	Q. La Castro	838807.2693	1181688.929
2	Q. San Antonio	838537.9708	1181802.192
3	AF_La_Castro_1	838655.8774	1181632.715

Tabla 37. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Esfuerzos de Paz



Cuenca	Area (m2)	Pendiente media de la cuenca (%)	Perimetro (m)	Altura media de la Cuenca (%)	Cota max cuenca (msnm)	Cota min cuenca (msnm)	Longitud de la cuenca (m)	Ancho de la cuenca (m)	Longitud del cauce (m)	Pendiente del cauce (%)
Q. La Castro	4069624.80	48.99	10674.71	2244.95	2560.00	1670.00	3710.00	7244.42	4675.80	15.61
AF_La_Castro_1	54834.97	43.86	1736.64	1781.15	2011.60	1672.60	755.47	72.58	800.26	37.18
Q. San Antonio	48874.78	40.74	1059.59	1736.77	1810.00	1675.98	401.71	121.67	429.93	29.65

Para determinar la pendiente media de la cuenca, se generó un mapa de pendientes a partir del MDT de la zona de estudio, teniéndose así un mapa en formato Raster en el cual se tiene un valor de pendiente para cada pixel. La pendiente media de la cuenca será determinada como el promedio de los valores de pendiente para cada pixel contenidos dentro de la cuenca.

11.4.2 Usos del suelo

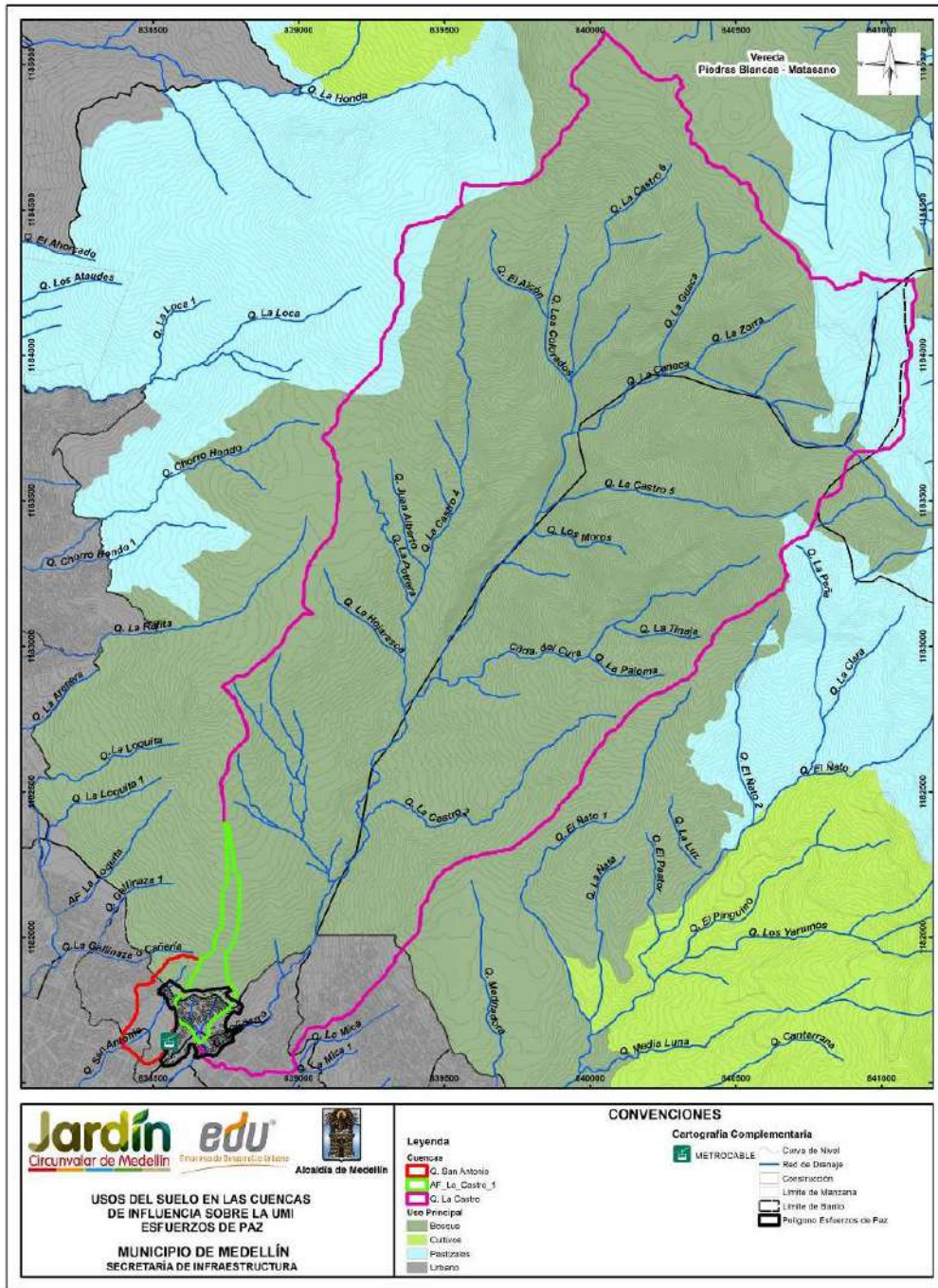
Para la asignación de los usos del suelo al interior de cada una de las cuencas con fines de modelación hidrológica, se empleó la información correspondientes a usos del suelo definidos para la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay como es indicada en el POT (2014) y la cual se presenta en el Mapa 3, el Mapa 4, el Mapa 19 y el Mapa 20. Esta información es retomada en este apartado en el Mapa 29, en el cual se ha realizado una reclasificación en términos de los tipos de coberturas o usos del suelo con fines del cálculo hidrológico. La Tabla 38 muestra un resumen para cada cuenca.

Adicionalmente, se realizó una comparación de los usos del suelo indicados en el POT (2014) con respecto de los observados en la ortofoto. Pudo constatarse que en la zona rural existen algunas diferencias de asignación al uso del suelo entre la ortofoto y el POT (2014), pero ambas fuentes coinciden en la asignación de la zona urbana. A pesar de lo primero, los coeficientes de escorrentía (C_e) que se asignan a partir de una o de la otra

	<p align="center"> SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ </p>	
---	---	---

fuelle no varían significativamente debido a la semejanza entre los valores recomendados por Chow et al (1994) para zonas no desarrolladas cuando la pendiente del terreno es superior al 7%.

Las áreas de las zonas urbanas se encuentran localizadas en la parte baja de cada cuenca, teniéndose en algunas de estas un alto grado de intervención antrópica, que ha modificado las condiciones naturales de escorrentía superficial.



Mapa 29. Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI Esfuerzos de Paz Modificado del POT (2014) (EDPUsosSuelosCuencasUMI_Medellin_C)

Tabla 38. Usos del suelo en las cuencas de influencia en Esfuerzos de Paz

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Cultivos	Pastizales	Bosques	Urbano
	Forestal productor	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. La Castro	5.70%	0.00%	90.1%	4.2%
AF_La_Castro_1	0.00%	0.00%	68.7%	31.3%
Q. San Antonio	0.00%	0.00%	26.7%	73.3%

11.4.3 Tiempos de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que toma una gota de agua desde la parte más alejada de la cuenca hasta el punto de salida de la misma. Para estimar este tiempo se cuenta con una gran cantidad de modelos propuestos por diferentes autores, los cuales se encuentran en función de las características morfológicas de la cuenca.

En la Tabla 39 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 40 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono Esfuerzos de Paz.

Tabla 39. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S_0^{0.385}} \right)$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (m) So: Pendiente del canal en (m/m)
Temez	$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (%)
Johnstone y Cross	$T_c = 5 \times \left(\frac{L}{S_0^{0.5}} \right)^{0.5}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) So: Pendiente del canal (millas/pies)
Federal Aviation Agency (F.A.A)	$T_c = \frac{(1.1 - C) \times L^{0.5}}{S^{0.333}}$	Tc: Tiempo de concentración (minutos) L: Longitud del cauce principal (m) S: Pendiente del canal en (m/m) C: Coeficiente de escorrentía
Pilgrim	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km ²)
Clark	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km ²)
California Culvert Practice	$T_c = \left(\frac{11.9 \times L^3}{H} \right)^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) H: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (pies)
Passini I	$T_c = \frac{0.108 \times (A \times L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) S: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m) A: Área de la microcuenca (km ²)
California Culvert USBR	$T_c = 0.066 \times \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m/m)
Giandotti	$T_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times L}{25.3 \times \sqrt{L} \times S_0}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) A: Área de la microcuenca (km ²) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (m)

Tabla 40. Tiempos de concentración calculados para las cuencas

Nombre cuenca	Tiempo de concentración (min)														
	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrin	Clark	California Culvert Practice	Passini I	California USBR	Giandotti	Promedio	Desv. Est.	Lim Sup.	Lim. Inf.	Promedio	Tc tomado
Q. La Castro	26.7	34.2	54.5	77.7	80.1	2.1	43.8	26.5	41.9	43.1	25.0	68.1	18.1	37.9	37.9
AF La Castro 1	4.9	7.7	16.9	15.1	4.8	4.4	3.7	4.9	9.3	8.0	4.9	12.9	3.1	5.7	5.7
Q. San Antonio	3.3	5.1	13.3	14.5	4.8	3.0	3.3	3.3	10.2	6.8	4.6	11.4	2.1	4.7	5.0

Para determinar el tiempo de concentración se hizo un promedio descartando los tiempos extremos que generan un gran salto en la media y la desviación estándar, siendo tomado un Tc igual a cinco minutos en los casos en que se obtiene un tiempo menor a este.

11.5 CAUDALES MÁXIMOS

11.5.1 Intensidades de Diseño

Las intensidades de diseño se tomaron a partir de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) publicadas por EPM (2005) para las estaciones pluviográficas operadas por esta entidad y que se ubican en la zona. Las curvas IDF presentan una ecuación de la forma:

$$I = C \cdot (D + H)^M$$

Dónde I es la intensidad en mm/h y D es la duración de la precipitación en minutos. C, H y M son parámetros empíricos cuyos valores se presentan en la Tabla 41 para cada estación y periodo de retorno.

A partir de las intensidades puntuales, se determinó la intensidad media de la lluvia para cada cuenca. Esto se realizó mediante un proceso de interpolación en el espacio de las intensidades puntuales. El método empleado es el del inverso del cuadrado de la distancia (IDW). Los pesos asignados a cada estación en este proceso se presentan en el Anexo 04.

Finalmente, en la Tabla 42 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz.

Tabla 41. Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)

ESTACIÓN	PARÁMETRO	TR 2.33	TR 10	TR 50	TR 100
Palmas	C	10721.0	4404.8	2821.9	2903.2
	H	39	20	11	10
	M	-1.2205	-1.0062	-0.8815	-0.8721
Miguel de Aguinaga	C	11762.0	24290.0	39903.0	48618.0
	H	40	43	45	46
	M	-1.2843	-1.3586	-1.4053	-1.4253
Ayurá	C	4238.2	9852.6	16776.0	19876.0
	H	23	22	22	22
	M	-1.0826	-1.1821	-1.237	-1.2526
Chorrillos	C	6256.7	2779.1	3297.3	3448.0
	H	35	15	12	11
	M	-1.1469	-0.9509	-0.942	-0.9352
Mazo	C	37203.0	8937.9	8366.3	9065.6
	H	60	26	19	18
	M	-1.4366	-1.1534	-1.1058	-1.1069
Planta Villahermosa	C	4722.3	3483.1	3487.6	3491.6
	H	24	16	13	12
	M	-1.1075	-0.9946	-0.9511	-0.9353
Vasconia	C	3565.7	3587.9	4339.8	4984.9
	H	17	10	8	8
	M	-1.0225	-0.9653	-0.956	-0.9662
Fabricato	C	1751.8	2023.3	2388.4	2757.4
	H	21	13	10	10
	M	-0.8895	-0.8519	-0.8338	-0.8437

Tabla 42. Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Castro	50.2	71.2	91.9	100.8
AF_La_Castro_1	100.2	160.4	220.3	245.5
Q. San Antonio	102.4	164.3	226.1	251.9

11.5.2 Método Racional

Este método es uno de los de mayor empleo debido a su sencillez, el rango de validez del método racional según la magnitud del área de drenaje tiene múltiples conceptos que discrepan entre ellos, Fatorelli y Fernández (2011) reseñan que el método racional es válido para áreas de drenaje con áreas inferiores a 200 km², Bryan (1978) expone como límite de aplicación 2 km², Vélez (2001) expone como límite 50 km², Empresas Públicas de Medellín (2009) habla de 0.8 km², mientras que el Instituto Nacional de Vías (2009) presenta un rango desde la literatura entre los 0.65 km² y 25 km², así, se considera que los resultados del método racional en este caso son válidos para las microcuencas de las quebradas estudiadas (La Castro, Afluente La Castro 1 y San Antonio). Este método también supone que la intensidad de la precipitación, permanece constante durante un tiempo mayor o igual al tiempo de concentración de la cuenca. Dadas las características de las cuencas en estudio, con áreas inferiores a 1 km², los resultados de este método serán válidos en ellas.

Según este método el caudal está dado por la siguiente ecuación, donde Q es el caudal máximo (m³/s), C es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de la lluvia (mm/h) y A es el área de la microcuenca (ha).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

El Método Racional, para la estimación de caudales, considera un coeficiente de escorrentía superficial, el cual es la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido. Este coeficiente tiene una naturaleza variable ya que depende de parámetros morfométricos de la cuenca y de las características mismas de la lluvia. Entre los factores referentes a la cuenca se encuentran el área, la pendiente, la forma y el uso del suelo. Los factores propios de la lluvia son la intensidad, duración y distribución espacial sobre la zona. Debido a la variación de los factores anteriormente mencionados, la determinación del coeficiente de escorrentía se hace compleja ya que este no debe considerarse como una constante, pero en algunos casos prácticos se hace razonable el uso de coeficientes constantes obtenidos mediante procesos experimentales.

Para determinar los coeficientes de escorrentía se hace uso de los coeficientes propuestos por Ven Te Chow (1994), los cuales dependen del periodo de retorno, el uso del suelo, y la pendiente de la cuenca. Estos coeficientes de escorrentía de referencia se presentan en el Anexo 04 (Tabla 2), de los cuales se emplearon los correspondientes a uso residencial tipo concreto/techo y a áreas no desarrolladas para pendientes superiores al 7% de acuerdo con la topografía de la zona.

Finalmente, los coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca

Nombre Cuenca	Coeficientes de Excorrentía (Adimensional)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Castro	0.27	0.43	0.50	0.54
AF_La_Castro_1	0.48	0.54	0.62	0.66
Q. San Antonio	0.64	0.72	0.80	0.85

11.5.3 Hidrogramas sintéticos

Dentro de las metodologías propuestas se tienen la de Snyder, y la del Soil Conservation Service (S.C.S). Estas metodologías plantean la construcción de un hidrograma unitario cuya forma está en función de características físicas de la cuenca de acuerdo a los parámetros de cada modelo. A partir de estos hidrogramas unitarios y la tormenta de diseño se obtiene el caudal máximo relacionando estos dos elementos mediante una convolución matemática, operación a través de la cual se obtienen los hidrogramas de escorrentía directa. Aunque en particular para las cuencas del Polígono Esfuerzos de Paz no fueron empleados los métodos de los hidrogramas unitarios, por el pequeño tamaño de

las cuencas, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los modelos de las metodologías empleadas.

11.5.3.1 Método de SCS

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS) desarrolló un Hidrograma Unitario Adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas, correspondientes a microcuencas de diversos tamaños y ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos.

El Hidrograma Unitario adimensional curvilíneo del S.C.S puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular equivalente, con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en el lado creciente del Hidrograma.

El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$U_p = \frac{484 * A_c}{T_p}$$

En donde U_p es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, A_c es el área de la microcuenca en millas cuadradas y T_p es el tiempo al pico en horas.

El SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago, T_R y el tiempo de concentración, T_c , como:

$$T_c = \frac{5}{3} T_R$$

El tiempo de rezago, T_R , puede calcularse con base en la siguiente expresión, donde L_c es la longitud del canal principal en pies, S_c es la pendiente promedio de la microcuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas.

$$T_R = \frac{L_c^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * S_c^{0.5}}$$

El factor de retención o almacenamiento S se obtiene del método de la S.C.S para perdidas mediante la siguiente expresión, donde CN es el Número de Curva.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

El tiempo al pico, T_p está dado según la siguiente expresión, en donde T es la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R$$

La relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dada como:

$$T = 0.133T_c$$

11.5.3.2 Tormenta de diseño e intensidad de la precipitación

A partir de la información de las Curvas IDF de las estaciones a considerar, se determinó la intensidad de la lluvia para cada cuenca, considerando una duración igual al tiempo de concentración, y empleando el método de inverso del cuadrado de la distancia (IDW).

Los modelos de hidrogramas unitarios requieren hietogramas de precipitación efectiva para cada periodo de retorno considerado. La tormenta de diseño se consideró con una duración igual al tiempo de concentración de cada microcuenca.

Con el fin de hacer una distribución temporal de la lluvia, se emplearon las relaciones de distribución temporal de la lluvia propuestas por Huff en 1976 (Chow et al, 1994). Huff desarrolló esta distribución para diferentes patrones de precipitaciones (grupos de probabilidad), desde los patrones de lluvia más severas (I cuartil), hasta los más suaves (IV cuartil). Se empleó la distribución correspondiente al primer cuartil con una probabilidad de excedencia del 50%.

11.5.3.3 Pérdidas hidrológicas

Para simular las pérdidas de precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por interceptación en la vegetación, almacenamiento en depósitos del suelo y por infiltración, se usó el método del número de curva. Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y relaciona la lluvia total y la lluvia efectiva con el tipo y uso de suelo y las condiciones de humedad antecedente (Chow et al, 1994) a través del parámetro denominado número de curva (CN).



La precipitación efectiva por el método del SCS se estima a partir de la precipitación total acumulada, así:

$P_e = \frac{(P_{tacum} - I_a)^2}{P_{tacum} - I_a + S}$	$I_a = 0.2 * S$	$S(mm) = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4$
---	-----------------	--

Donde, P_e es la precipitación efectiva en pulgadas, P es la precipitación media en pulgadas, S es la retención potencial máxima del suelo e I_a es la retención mínima que equivale al 20% de la retención máxima.

11.5.3.4 Estimación del Número de Curva

El número de curva depende del tipo del suelo, del tipo de tratamiento superficial que esté presente, de su condición hidrológica y de las condiciones de humedad antecedente la cual puede relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores.



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos: AMC-I: para suelos secos, AMC-II para suelo intermedios y AMC-III para suelos húmedos. Para estimar los caudales máximos, se considera la condición de humedad antecedente III (AMC III), dado que se asumen condiciones de humedad altas (similares a las generadas por las temporadas de invierno).

El tipo y las características de los materiales que conforman el suelo también inciden en la cantidad de precipitación que se infiltre en ellos. Para tener esto en cuenta, los suelos se pueden clasificar en los siguientes grupos hidrológicos:

- ✓ Grupo de Suelo A. Alta infiltración (baja escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas cubiertos con vegetación (bosque o rastrojo alto) con grado de meteorización 30/50 según Brand (1988) y con discontinuidades en la matriz de suelo producto del proceso de descomposición de la roca. Las estructuras heredadas funcionan como canales de flujo principales. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 7%. También se incluyen los suelos que presentan un efecto geológico marcado por diaclasas y bandeamientos, y cuyo buzamiento se da en ángulos mayores a 60°.
- ✓ Grupo de Suelo B. Infiltración moderada (escorrentía moderada). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias poco denudados con grado de meteorización 0/30 según Brand (1988) y con discontinuidades difícilmente cartografiables en campo. Las estructuras heredadas ya no son tan importantes en la permeabilidad del conjunto, por lo cual la permeabilidad primaria es la que controla el flujo de agua en el suelo. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 10%.
- ✓ Grupo de Suelo C. Infiltración baja (escorrentía de moderada a alta). Suelos residuales derivados de cualquier tipo de roca, cuyo grado de meteorización se clasifique como residuales maduros (SR, Brand – 1988), en los cuales las propiedades y minerales del material parental no son fácilmente identificables. Esta formación tiene como característica principal que está cubierta por pastos manejados y sus pendientes varían entre un 5% y 15%.
- ✓ Grupo de Suelo D. Muy poca infiltración (alta escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyo grado de meteorización varía entre 50/90 y en donde la pendiente media excede 15%. El tipo de vegetación en este grupo no es de mayor importancia ya que el fuerte gradiente topográfico impide la recarga de los acuíferos en la zona, generando por el contrario un flujo hipodérmico hasta aflorar nuevamente en superficie y hacer parte del agua que se aporta al canal principal de la microcuenca.

De acuerdo con las características geológicas de la zona estudiada, se determinó que los suelos presentes allí pertenecen al Grupo Hidrológico C.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

En la Tabla 3 del Anexo 04 se muestran los diferentes números de curva para cada una de las coberturas vegetales (o usos del suelo) y para cada uno de los grupos hidrológicos del suelo.

Para determinar el Número de Curva afectado por la condición de humedad antecedente III, se utilizó la siguiente expresión:

$$CN(III) = \frac{23 \times CN}{10 + 0.13 \times CN}$$

Donde CN (III) es el Número de Curva equivalente para las condiciones de humedades AMC-III y CN es el Número de curva para condiciones antecedentes de humedad AMC-II. Según la distribución de los usos y el grupo hidrológico del suelo en las cuencas estudiadas, se estimó un número de curva mediante un promedio ponderado por áreas.

11.5.4 Regionalización de caudales

Después de determinar los caudales asociados a los diferentes periodos retorno para cada cuenca estudiada, se realizó a partir de estos una regresión de tipo potencial entre esta variable y el área. De esta manera, se obtiene una expresión regionalizada que permite estimar los caudales máximos en función del área de la cuenca considerada. La expresión es de la siguiente forma:

$$Q = \alpha.A^{\theta}$$

Las cuencas consideradas para el análisis de regionalización corresponden a todas las que componen los ocho polígonos de estudio en el presente contrato. Es decir, se consideraron las cuencas de las Quebradas Chorro Hondo, San Antonio, La Rafita, La Arenera, La Gallinaza, La Loquita, El Molino, entre otras. En la Tabla 44 y en el Mapa 30 se puede observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.



 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

Tabla 44. Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización

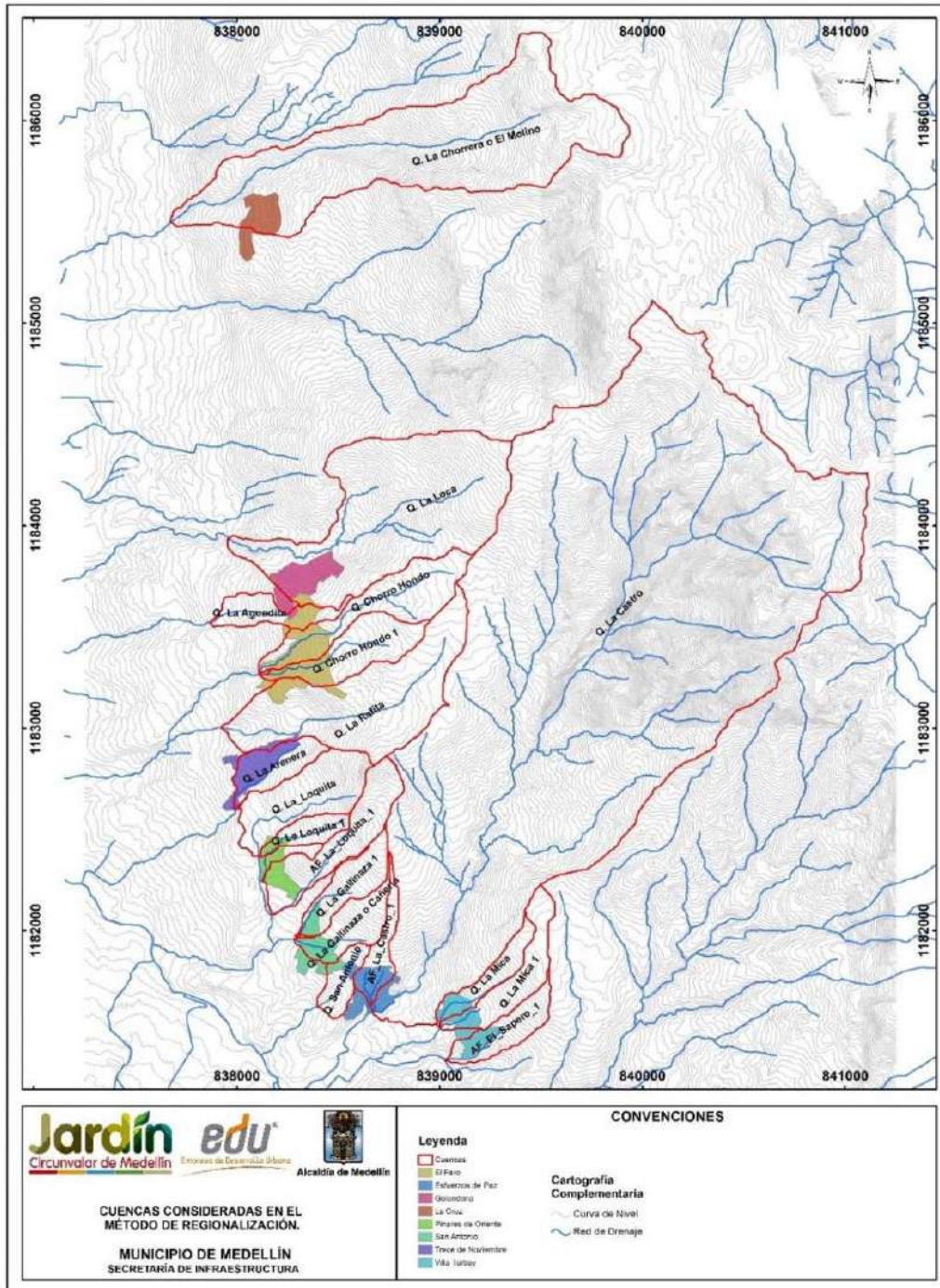
PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	ESTE	NORTE
1	Villa_Turbay	AF_El_Sapero_1	839027.36	1181360.25
2	Villa_Turbay	Q. La Mica	839003.36	1181520.59
3	Villa_Turbay	Q. La Mica 1	839003.36	1181520.59
4	Esfuerzos_de_Paz	Q. La Castro	838659.35	1181629.17
5	Esfuerzos_de_Paz	AF_La_Castro_1	838656.25	1181636.64
6	Esfuerzos_de_Paz	Q. San Antonio	838398.21	1181624.18
7	San_Antonio	Q. La Gallinaza o Cañería	838282.50	1181960.14
8	San_Antonio	Q. Gallinaza 1	838288.67	1181970.14
9	Pinares_de_Oriente	AF_La_Loquita_1	838172.89	1182080.72
10	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita 1	838110.36	1182364.25
11	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita	838108.32	1182367.83
12	Trece_de_Noviembre	Q. La Arenera	837992.14	1182599.25
13	Trece_de_Noviembre	Q. La Rafita	837922.50	1183003.64
14	EL_Faro	Q. Chorro Hondo 1	838112.50	1183265.64
15	El_Faro	Q. Chorro Hondo	838110.50	1183269.64
16	El_Faro	Q. La Aguadita	837868.50	1183519.64
17	Golondrinas	Q. La Loca	837957.23	1183937.37
18	La_Cruz	Q. La Chorrera o El Molino	837673.50	1185498.10

Dado de que las cuencas tienen áreas pequeñas, se decide adoptar el Método Racional puesto que las hipótesis de esta metodología se cumplen en las cuencas consideradas. Los parámetros morfométricos de cada cuenca y los parámetros empleados para el cálculo del caudal por el Método Racional se muestran en el Anexo 04.

A partir de la regionalización hecha, se obtuvieron los Parámetros α y θ para cada periodo de retorno considerado, los cuales se muestran en la Tabla 45, junto con el coeficiente de correlación.

Tabla 45. Resultados de regionalización de caudales máximos

Parámetro	Coeficientes de Regionalización			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
α	7.95	13.43	20.35	24.0020
θ	0.78	0.75	0.74	0.74
R2	0.96	0.96	0.96	0.97



Mapa 30. Cuencas consideradas en el método de regionalización
(EDPCuencasParaMetodoRegionalizacion_Medellin_C)

11.5.5 Resumen de caudales

Los caudales calculados para cada cuenca, para cada periodo de retorno y para cada método empleado se presentan de la Tabla 46 a la Tabla 49.

Como se mencionó antes en este mismo capítulo, dado que el tamaño de las cuencas en estudio es inferior a 1 km², los resultados que se seleccionan para el análisis de la amenaza y el riesgo corresponden a los del Método Racional y la regionalización hecha, dado que esta permite analizar los caudales en caso de variaciones sobre las cuencas. Las cuencas analizadas, al ser pequeñas, cumplen satisfactoriamente las hipótesis del Método Racional. Por su parte, las metodologías de hidrógrafas unitarias cuentan con aceptación en cuencas de varios kilómetros cuadrados de área, y por ello se descartan sus resultados.

Tabla 46. Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)			
	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Propia)
Q. La Castro	16.04	16.21	20.93	23.65
AF_La_Castro_1	0.09	0.09	0.73	0.83
Q. San Antonio	0.35	0.37	0.89	0.76

Tabla 47. Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)			
	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Propia)
Q. La Castro	31.40	31.76	34.57	38.67
AF_La_Castro_1	0.39	0.41	1.32	1.51
Q. San Antonio	0.87	0.92	1.60	1.38

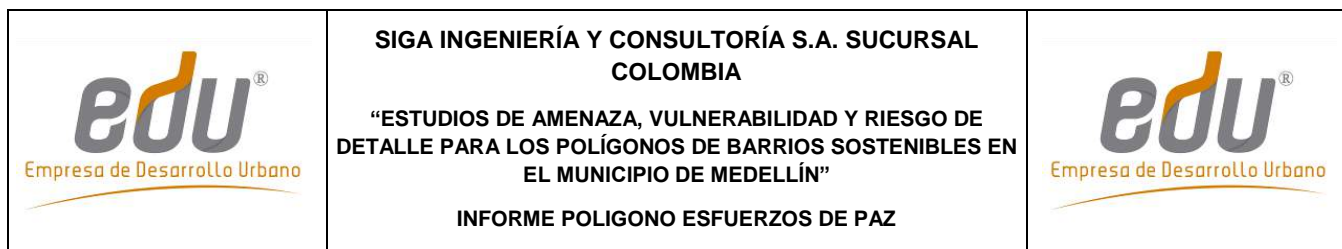


Tabla 48. Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)			
	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Propia)
Q. La Castro	48.49	48.83	51.96	57.84
AF_La_Castro_1	0.84	0.88	2.07	2.34
Q. San Antonio	1.50	1.55	2.46	2.15

Tabla 49. Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)			
	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Propia)
Q. La Castro	56.50	56.56	61.55	68.03
AF_La_Castro_1	1.05	1.11	2.47	2.78
Q. San Antonio	1.78	1.84	2.91	2.55

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
--	--	--

12. ASPECTOS HIDRÁULICOS

En este capítulo se describe y caracteriza desde el punto de vista hidráulico el sistema de drenaje natural que tiene influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la evaluación hidráulica de los mismos.

12.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

Para el desarrollo del presente capítulo se empleó como información de referencia los estudios hidráulicos suministrados por la EDU, los cuales fueron ejecutados por CÓNCAVAS (2013) y descritos ya en el Capítulo 11 de este informe.

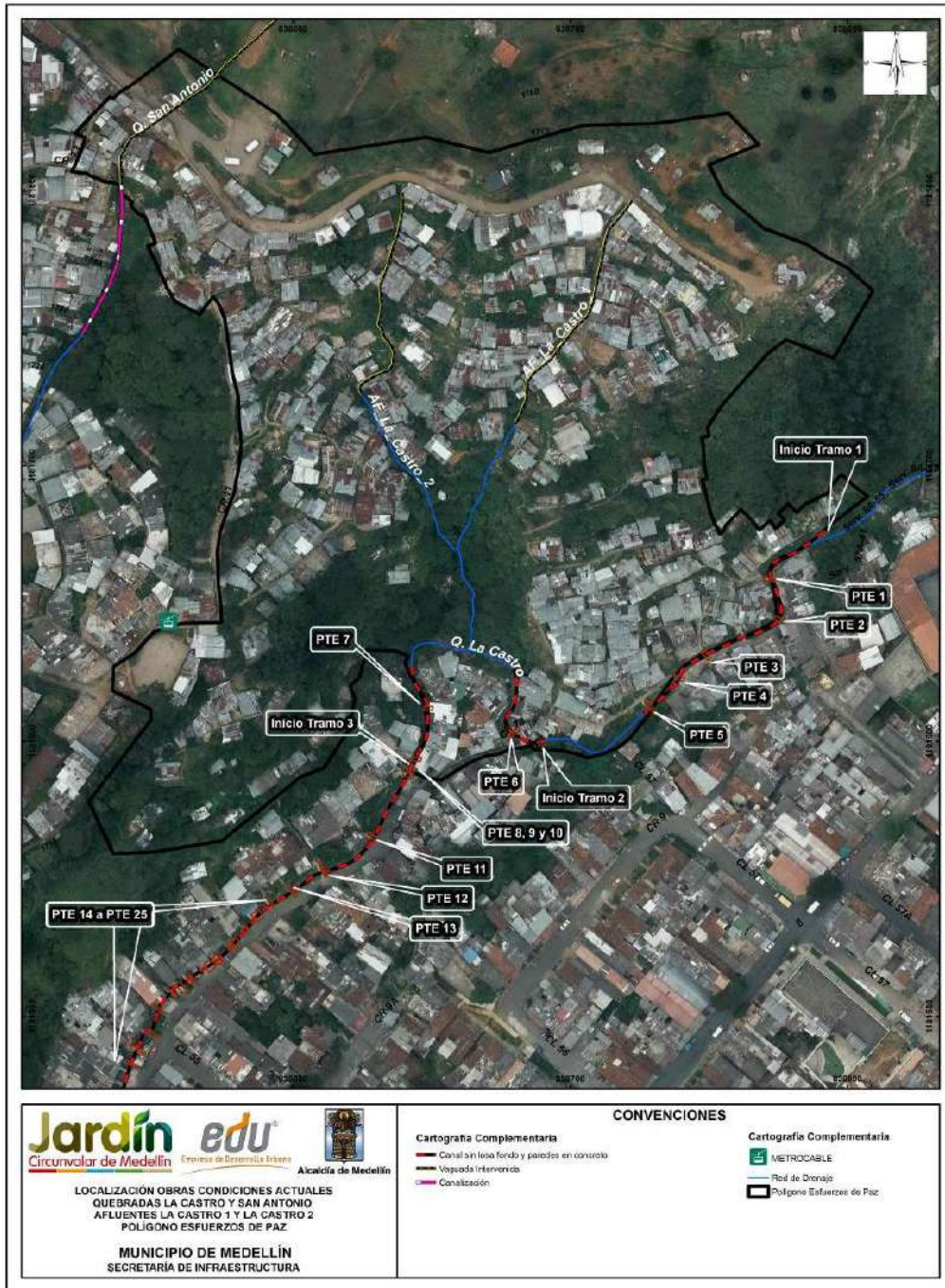
Dentro de la información básica también se cuenta con las observaciones realizadas durante las visitas al sitio, en las cuales se determinaron las condiciones actuales de las quebradas, sus características y algunos parámetros.

Se contó también con la información topográfica general del Polígono Esfuerzos de Paz que fue levantada por la EDU.

12.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES

En el Numeral 5.3 se describió detalladamente lo relacionado con la morfodinámica regional de la zona de estudio y en el Numeral 5.4 lo correspondiente a la morfodinámica local. Dentro de este último, se establece que en cuanto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, principalmente en las márgenes de la Quebrada San Antonio y de la Quebrada La Castro (incluidos sus afluentes). En menor proporción se encontraron procesos en las márgenes de las Quebradas La Mica y La Mica 1. Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay (dinámica fluvial), con la intención adicional de llevar a cabo los análisis hidrológicos e hidráulicos necesarios para la evaluación de los riesgos por inundación y avenidas torrenciales, se presenta en este numeral una descripción detallada las Quebradas La Castro, San Antonio y, como afluentes de la Quebrada La Castro, el AF La Castro 1 y el AF La Castro 2, drenajes asociados al Polígono Esfuerzos de Paz (Mapa 31).



Mapa 31. Localización obras hidráulicas y puentes en condiciones actuales para el Polígono Esfuerzos de Paz (EDPLocalizacionObrasPoligonoEDP_Medellin_C)

12.2.1 Quebrada La Castro

El tramo analizado de la Quebrada La Castro tiene una longitud aproximada de 600 m comprendida dentro del Polígono Esfuerzos de Paz, la descripción de esta quebrada inicia en las coordenadas (838642.0494, 1181589.649) (Serv 8A-55), y continua hacia aguas abajo por el límite del polígono hasta las coordenadas (838807.2693, 1181688.929) (Serv. 55-128) La corriente asociada a este drenaje corre en dirección de Nororiente a Suroccidente y descarga en la quebrada Santa Elena. En el Mapa 31, se muestra en planta la localización y se indica en ella las zonas que corresponden al cauce y/o las que corresponden a las estructuras hidráulicas. La descripción de la quebrada se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo.

12.2.1.1 Tramo 1

En general el tramo de esta quebrada presenta en su lecho un suelo no cohesivo con material granular y fragmentos de roca, generalmente de tipo Aluviotorrencial según los resultados del estudio de geología local. Este tramo comprende una longitud aproximada de 180 m, un ancho de canal que varía entre 1 m y 4 m con una sección transversal predominante rectangular, con una pendiente que varía entre el 4% y el 13.4% con promedio de 9.20% (Figura 1 del Anexo 05).

La descripción para este tramo inicia 20 m aguas arriba a la intercepción entre el límite del polígono y la corriente, como se observa en la Figura 176 la margen izquierda presenta un muro de contención con un altura aproximada de 1.50 m y 12.00 m de largo, que sirve a su vez como margen del cauce, en la margen derecha se observa un talud natural de pendiente alta con presencia de arbustos y densidad de vegetación alta la cual continúa hasta el fondo del canal cubriendo gran parte de este.

Hacia aguas abajo, en el límite con el polígono, se observa una estructura hidráulica que corresponde a un canal con fondo en material natural y paredes en concreto, con una longitud aproximada de 100 m y una sección transversal rectangular, de ancho promedio a 2.0 m y altura variable entre 1.50 m y 2.0 m. Se observó la presencia de viviendas y cámaras de inspección adyacentes a este canal (Figura 177).



Figura 176. Quebrada La Castro aguas arriba de la intercepción del cauce con límite del Polígono Esfuerzos de Paz



Figura 177. Inicio canal abierto de paredes de concreto y fondo natural con presencia de viviendas cercanas y cámaras de inspección.

Como se puede observar en la Figura 178, en ambas márgenes del canal hay presencia de viviendas, las cuales se caracterizan porque los ingresos a ellas se realizan por medio de pasos elevados tipo losas apoyadas sobre los andenes o muros asociados a las paredes del canal. Adicionalmente hay evidencia de procesos erosivos asociados al contacto del agua con el material por efecto de la acción abrasiva de fluidos o sólidos en movimiento (erosión mecánica).



Figura 178. Canal con paredes en concreto y fondo natural. Presencia de viviendas cercana al cauce

Antes de finalizar este tramo se presenta un cambio de sección con un ancho promedio de 4 metros, como se puede observar en la Figura 179. En la margen izquierda del cauce se presenta un talud natural con alta densidad de vegetación y puntos localizados de erosión. En la margen derecha se observa un muro de contención cubierto por vegetación cuyas alturas varían entre 1.50 m y 3.0 m, con presencia de viviendas. El lecho de la

quebrada sigue presentando características de un suelo no cohesivo con fragmentos de roca y con presencia de basuras y vertimientos residuales.



Figura 179. Cambio de sección en cauce, talud natural margen izquierda y muro de contención margen derecha.

Al finalizar este tramo observamos en la Figura 180 un cambio en el ancho de la sección del canal con un ancho promedio de 1.50 m, y presencia de un talud enrocado en ambas márgenes con construcción de viviendas que hacen parte las márgenes de la quebrada.



Figura 180. Cambio de sección con márgenes en fragmentos de roca y presencia de viviendas

12.2.1.2 Tramo 2

En general el tramo de esta quebrada presenta en su lecho material granular con fragmentos de roca, generalmente de tipo Aluviotorrencial según los resultados del estudio de geología local. Comprende una longitud aproximada de 120 m, un ancho de canal que varía entre 1 m y 3 m con secciones transversales rectangulares e irregulares, la pendiente varía entre el 4% y el 10.8% con promedio de 7.00% (Figura 1 del Anexo 05).

Continuando con lo descrito en el Tramo 1, se puede observar en la Figura 181 un punto crítico de la quebrada en estudio que corresponde a la invasión parcial del fondo del cauce natural por la presencia de la construcción de una vivienda ubicada en la margen derecha, así como una obstrucción por una roca de diámetro mayor a 1.5 m y la presencia de otra vivienda en la margen izquierda.



Figura 181. Invasión parcial del fondo del cauce

Como se puede apreciar en la Figura 182, aguas abajo del punto de obstrucción descrito anteriormente, observamos un cambio de dirección aproximado de 80 grados por un canal con paredes laterales en concreto y bloques de roca, que corresponde a una longitud aproximada de 20 m y donde el fondo presenta un lecho natural de materiales granulares y fragmentos de roca, también se observa la presencia de viviendas a menos de 1.0 m de la quebrada.



Figura 182. Cambio de dirección en cauce con canal de paredes en concreto y fondo natural

Luego el flujo continúa en un canal natural con presencia de viviendas, una cámara de inspección y una topografía antrópica en la margen izquierda que hacen parte de la llanura de inundación (Figura 183). En la margen derecha se presenta un talud natural de pendiente alta con presencia de vegetación y arbustos, de esta margen descarga el afluente AF La Castro 1 hacia la Quebrada La Castro.



Figura 183. Quebrada La Castro - Tramo 2 y descarga del afluente AF La Castro 1

Finalizando este tramo encontramos nuevamente una canalización de fondo natural y paredes en concreto, así como la presencia de viviendas adyacentes al cauce, también se puede observar como el ancho disminuye gradualmente de aproximadamente 2.50m a 1.0m esto asociado a la invasión parcial del fondo del cauce por la construcción de viviendas, ver Figura 184.



Figura 184. Reducción gradual de ancho en canal con paredes en concreto y fondo natural

12.2.1.3 Tramo 3

Este tramo se encuentra por fuera del polígono en estudio y está constituido por un canal abierto de paredes en concreto que varían entre 2.00 m y 2.50 m, presenta en su lecho material granular con fragmentos de roca y comprende una longitud aproximada de 190 m hasta el puente vehicular ubicado en la dirección CL 54 A, presenta un ancho que varía entre 2.50 m y 3.0 m con secciones transversales rectangulares, la pendiente varía entre el 4% y el 7.0 % con promedio de 5.5 %. Este tramo presenta un gran número de pasos peatonales y losas que funcionan como aparcaderos para autos y accesos a vivienda; en la margen derecha hay presencia de viviendas cercanas al canal. Ver Figura 185.



Figura 185. Tramo 3 Canal con paredes en concreto y fondo natural

12.2.1.4 Pasos peatonales sobre la Quebrada La Castro

Como se puede observar en la para la Quebrada La Castro que se encuentra dentro del polígono de estudio, Tramo 1 y Tramo 2, se ubican 8 puentes o pasos peatonales de concreto simplemente apoyados y para el Tramo 3, que se encuentra por fuera del polígono de estudio, se ubican 17 puentes. La mayoría de estos puentes cumplen la función de acceso a las viviendas ubicadas en la margen de la canalización de la quebrada. En la Tabla 50, se presentan las características y coordenadas de localización de estos puentes peatonales.

En la Figura 186 se observa los puentes peatonales en concreto y simplemente apoyados, que sirven como acceso a las viviendas aledañas a la canalización de la Quebrada La Castro, nombradas como PTE 1, 2, 3 y 4, estos puentes se encuentran ubicados en el Tramo 1 como se puede observar en el Mapa 32.



Figura 186. Puentes peatonales 1, 2, 3 y 4 ubicados en el Tramo 1 de la Quebrada La Castro

Continuando aguas abajo del puente denominado PTE 4 se ubican los puentes PTE 5 ubicado en el tramo 1, y en el tramo 2 los puentes PTE 6, 7 y 8, en concreto ciclópeo simplemente apoyados. Algunos de estos son pasos peatonales o accesos a viviendas, como se puede observar en la Figura 187 y la Figura 188. En el Mapa 32 se puede ver la localización y en la Tabla 50 se muestran las características y coordenadas de localización de estos puentes.



Figura 187. Puente PTE 5 ubicado en el Tramo 1 y puentes PTE 6 y 7 ubicados en el Tramo 2 de la Quebrada La Castro

En la Figura 188 y Figura 189 se muestran los puentes localizados en el Tramo 3, fuera del Polígono Esfuerzos de Paz, los cuales son en concreto con apoyos simples y superficiales. Cumplen también la función de acceso a las viviendas localizadas en las márgenes del cauce de la Quebrada La Castro. Se denominaron y enumeraron como PTE 9 hasta el PTE 25. En el Mapa 32 se muestra la localización en planta de los

puentes ubicados en este tramo y en la Tabla 50 se muestran las características y las coordenadas de localización para estos accesos peatonales.



Figura 188. Puente PTE 8 ubicado en Tramo 2 y Puentes PTE 9 a PTE 13 ubicados en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro



Figura 189. Puentes PTE 14 a PTE 25 en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro

Tabla 50. Características y coordenadas de los puentes peatonales, ubicados en la Quebrada La Castro

PUENTE	ESTE	NORTE	LUZ (m)	MATERIAL	APOYOS
PTE 1	838772.91	1181658.76	4.98	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 2	838775.06	1181644.2	3.55	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 3	838749.18	1181631.16	2.77	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 4	838739.01	1181622.93	3.69	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 5	838729.46	1181612.05	5.99	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 6	838679.25	1181602.95	2.58	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 7	838648.72	1181611.83	3.26	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 8	838643.72	1181593.58	2.72	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 9	838642.41	1181589.76	2.45	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 10	838641.53	1181587.67	2.43	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 11	838629.06	1181564.74	2.65	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 12	838611.05	1181552.24	2.22	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 13	838599.92	1181545.04	3.47	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 14	838592.29	1181540.64	3.46	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 15	838586.9	1181536.61	3.52	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 16	838583.25	1181531.95	3.02	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 17	838578.81	1181526.54	2.79	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 18	838572.84	1181520.8	2.84	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 19	838569.99	1181518.53	3.72	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 20	838566.16	1181515.89	5.20	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 21	838562.49	1181513.76	3.55	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 22	838558.94	1181511.25	3.24	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 23	838556.02	1181508.94	3.42	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 24	838551.19	1181502.97	4.70	Concreto	Simples y Superficiales
PTE 25	838548.06	1181493.98	3.39	Concreto	Simples y Superficiales

12.2.2 Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2

La corriente del afluente AF La Castro 1 tiene dirección nororiente-suroccidente, su parte alta y media del drenaje se caracteriza por zonas intervenidas urbanizadas donde la vaguada natural no es identificable. Como se observa en la Figura 190 en la parte baja del afluente, donde no hay presencia de construcción o focos localizados antrópicos, el flujo corre por una sección natural en forma de “v”, donde el fondo de canal predomina el afloramiento de la roca de las unidades de Dunitas de Medellín y Cuerpos del Batolito Antioqueño. Este último tramo corresponde a una longitud aproximada de 80 m hasta descargar a la quebrada La Castro con una sección de ancho que varía entre 0.8 m y 1.0 m y pendientes entre el 70% y 90% (Figura 2 del Anexo 05).



Figura 190. Parte baja del afluente AF La Castro 1

La corriente del afluente AF La Castro 2 tiene dirección noroccidente-suroriente, su parte alta y media del drenaje se caracteriza por zonas intervenidas urbanizadas donde la vaguada natural no es identificable como se observa en la Figura 191.



Figura 191. Parte media del afluente AF La Castro 2

El drenaje natural como se muestra en la Figura 192, presenta una sección de ancho promedio 0.60 m en forma de “v”, en las márgenes se observa la presencia de construcciones muy cercanas al afluentes a lo largo de unos 30 m, luego en la parte baja del afluente, donde no hay presencia de construcción o focos localizados antrópicos, el flujo corre por una sección natural en forma de “v”, donde el fondo de canal predomina el afloramiento de la roca de la unidad Cuerpos del Batolito Antioqueño. Este último tramo corresponde a una longitud aproximada de 50m hasta descargar al afluente AF la Castro 2 con una sección de ancho que varía entre 0.6m y 0.8m y pendientes al inicio del 20 % y finalizando de 70 % y hasta del 104 % (ver Figura 3 del Anexo 05).



Figura 192. Vaguada Afluyente AF La Castro 2

12.2.3 Quebrada San Antonio

El tramo analizado de la Quebrada San Antonio tiene una longitud aproximada de 129.23 m de los cuales solo 9.0 m, medidos desde el inicio, está comprendida dentro del Polígono Esfuerzos de Paz, la descripción de esta quebrada inicia en las coordenadas (838538.296, 1181808.208) y continua hacia aguas por fuera del límite del polígono hasta las coordenadas (838501.798, 1181708.346) (Serv. 54-73) La corriente asociada a este drenaje corre en dirección de Nororiente a Suroccidente y descarga en la quebrada Santa Elena. En el Mapa 31 se muestra en planta la localización y se indica en ella las zonas que corresponden al cauce y/o las que corresponden a las estructuras hidráulicas. La descripción de la quebrada se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo.

La parte inicial del tramo analizado corresponde a un canal en concreto con una longitud aproximada de 60 m, con anchos y alturas que varían entre 0.70 m y 1,00 m, en la margen izquierda se presenta un talud natural con pendientes altas, mientras que en la margen derecha se observa la presencia de viviendas (Figura 193).



Figura 193. Parte inicial del tramo analizado de la Quebrada San Antonio correspondiente a un canal en concreto

Como se puede observar en la Figura 194, el fondo del cauce se encuentra en condiciones naturales y sus márgenes están intervenidas en una longitud aproximada de 20 m, con un ancho que varía entre 0.70 m y 0.90 m y pendientes entre 34 % y 20% con promedio 26,70% (ver Figura 4 del Anexo 05). El lecho presenta un material cohesivo asociado a Las Dunitas de Medellín. En la margen izquierda se observa un talud natural con pendientes altas sin focos de erosión mientras que en la margen derecha se observa la presencia de viviendas que hacen parte del régimen de flujo de la quebrada.



Figura 194. Parte media del tramo analizado de la Quebrada San Antonio que corresponde a un canal natural con presencia de viviendas

En la parte final del tramo analizado de la Quebrada San Antonio que corresponde a una longitud de 29,24 m, se puede observar en la Figura 195 que esta se encuentra canalizada, presentando un ancho promedio de 1.0 m, donde se presenta una variación de altura en la paredes laterales que está entre 1.0 m y 1.75 m, y una pendiente entre 20.86 % y 30.59 % con promedio de 27.20 %, el lecho presenta un fondo en concreto con puntos localizados de pérdida del material y presencia de vegetación, en ambas márgenes se puede observar la presencia de viviendas.



Figura 195. Parte final del tramo analizado de la Quebrada San Antonio que corresponde a un canal en concreto

12.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES

Una vez estimados los caudales máximos para cada una de los cauces principales que tienen influencia sobre el Polígono Esfuerzos de Paz (Tabla 46 a Tabla 49), se procedió a realizar el modelo hidráulico. El objetivo de este modelo hidráulico es transitar los caudales máximos a través de los cauces y calcular diferentes variables de flujo, entre ellas, la velocidad y la profundidad, A partir de estas últimas, se delimitarán finalmente las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno, las cuales servirán como punto de partida para la calificación de la amenaza. Para llevar a cabo el tránsito de las crecientes en los cauces, se empleó el Software FLO-2D PRO de FLO-2D Software INC, que permite analizar el flujo en las laderas, además del flujo en los cauces.

12.3.1 Descripción del Modelo FLO-2D

A través de los modelos de tipo unidimensional no es posible obtener una buena precisión al simular los flujos que ocurren en las laderas cuando se presenten vertimientos o derrames por incapacidad del cauce o por falla de una determinada estructura. Para considerar estas situaciones, se empleó el Modelo FLO-2D, de tipo bidimensional en laderas, conservativo del volumen, que resuelve la ecuación de cantidad de movimiento

incluyendo componentes de la onda cinemática, la onda difusiva y la onda dinámica. El Modelo FLO-2D permite además modelar flujo en cauces y canales, en laderas y calles y permite incluir estructuras hidráulicas, obstrucciones, edificaciones, entre otros. Como información de entrada, el FLO-2D requiere información topográfica, información de rugosidades de la superficie, información de lluvia o de caudales de entrada al sistema, secciones transversales al cauce y curvas de descarga de las estructuras hidráulicas.

FLO-2D es un modelo de diferencias finitas que emplea una malla uniforme de elementos cuadrados, para los cuales se tienen ocho direcciones posibles para el flujo. En esencia, es un modelo de volumen finito, que rastrea la distribución del volumen en todo el dominio con la finalidad de representar el movimiento de la onda de flujo. Para cada paso de tiempo, el modelo calcula el caudal que fluye en todas las ocho direcciones posibles de cada elemento de la malla, garantizando la conservación del momentum, a partir de la siguiente ecuación:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \left(\frac{V_x}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right) - \left(\frac{1}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial t}\right)$$

Donde S_o representa la pendiente del cauce, $\partial h/\partial x$ representa el gradiente de presión, $(V_x/g)(\partial V_x/\partial x)$ representa la aceleración convectiva y $(1/g)(\partial V_x/\partial t)$ representa la aceleración local.

Dentro de las hipótesis y limitaciones que plantea el Modelo FLO2D se encuentran las siguientes:

- ✓ La elevación, la rugosidad y la profundidad de flujo están representadas y son uniformes al interior de cada celda que compone el dominio del modelo.
- ✓ Flujo permanente para cada paso de tiempo.
- ✓ Flujo unidimensional al interior de los canales. En ellos no se consideran corrientes secundarias ni la distribución vertical de velocidades.

12.3.2 Caudales empleados en la modelación

El análisis de hidráulico de las corrientes Afluente La Castro 1, Afluente La Castro 2 y la Quebrada San Antonio se emplearon los caudales estimados en el apartado 11.5 (Tabla 46 a Tabla 49, estimación con el método racional), correspondientes a aguas claras, dado que estas corrientes no son susceptibles a fenómenos de torrencialidad según lo expuesto en el Capítulo 15.

Por su lado, para el análisis de la quebrada La Castro en eventos tipo Inundación se emplearon también los caudales de aguas claras estimados en el apartado 11.5. En los eventos de avenidas torrenciales para esta corriente se realizó una mayoración del 40 % sobre los caudales máximos de aguas claras (estimados en el apartado 11.5) de acuerdo con lo que establece el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 para este tipo de cauces. Esto se describe en conjunto con la metodología para analizar las avenidas torrenciales en el Capítulo 15.

12.3.3 Información topográfica

La información topográfica que se ingresó al Modelo FLO-2D corresponde al modelo digital del terreno generado a partir de la información topográfica de los polígonos y de los cauces. Adicionalmente, la geometría de los canales fue definida por secciones transversales, tomadas en forma perpendicular a la dirección de las líneas del flujo.

12.3.4 Tamaño de la malla

Para la selección del tamaño de la malla se partió de la siguiente relación entre el caudal pico Q_{pico} y el área de la celda A_{celda} recomendada por FLO2D para garantizar eficiencia en el proceso de modelación:

$$Q_{pico} / A_{celda} < 3m^3/s$$

Esta relación implica tamaños de celda del orden de 2.5 y 4.5 m de lado, asociado a un caudal de periodo de retorno de 2.33 años y 100 años respectivamente. Sin embargo, para garantizar una mayor representatividad y un mayor detalle en los resultados del modelo, se empleó un tamaño de celda de 1.0 m de lado, sin afectar notoriamente la eficiencia en el modelo para el drenaje de la Quebrada La Castro, mientras que para los Los Afluentes de la Castro 1 y 2 el tamaño adecuado de lado es de 0.46 m, sin embargo se utilizó como tamaño 0.50 m para la modelación.



12.3.5 Condiciones de frontera

En el FLO-2D es posible trabajar con precipitaciones o con caudales como elemento de entrada al modelo. En el primer caso, el software modela procesos lluvia escorrentía para obtener los caudales en todos los puntos de la malla. En el segundo caso los caudales se ingresan de manera puntual en cualquier celda del modelo.

En este caso se ingresaron los caudales directamente en los puntos de interés de los cauces mediante una hidrógrafa triangular con caudal pico igual al caudal de diseño seleccionado (en éste caso el del método racional). El tiempo base del hidrograma se estableció de manera que el área bajo el hidrograma sea consistente con el volumen de escorrentía directa en la cuenca. La forma triangular del hidrograma fue seleccionada dado que se aproxima bien a las hidrógrafas reales en ambientes urbanos y es la forma base para la generación de hidrógrafas sintéticas como las del Soil Conservation Service.

12.3.6 Condiciones iniciales

Dadas las características efímeras de los cauces del polígono en estudio, se consideraron láminas de flujo nulas como condiciones iniciales, es decir, se partió de condiciones secas en todo el dominio del modelo.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

12.3.7 Condiciones de estabilidad numérica

El Modelo FLO-2D está sujeto a criterios estrictos de estabilidad numérica que se garantizan manteniendo pequeños intervalos o pasos de tiempo en la solución de las ecuaciones diferenciales para cada elemento de la malla del modelo. El modelo busca que el paso de tiempo empleado sea adecuado para que se cumplan los siguientes criterios de estabilidad:

- ✓ Criterio del cambio de volumen (o de profundidad) en una celda entre cada paso de tiempo.
- ✓ Criterio de estabilidad de la onda dinámica que relaciona el paso de tiempo con el caudal específico para el canal, la pendiente del canal y el tamaño de los elementos del dominio computacional.
- ✓ Criterio de Número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) que relaciona el paso de tiempo con las velocidades de la onda simulada y el tamaño de los elementos del dominio computacional. Este es el criterio que recomienda FLO-2D, con un valor de 0.6 para el número CFL y que por tanto fue adoptado en la modelación.



12.3.8 Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning, n , para el cauce natural, se tomó con base en la comparación directa del material que conforma el lecho, las laderas del canal, la configuración del cauce, entre otros, con los valores propuestos en Ven Te Chow (1994). A su vez, los coeficientes de rugosidad de Manning empleados en las planicies de inundación se tomaron a partir de los valores recomendados en FLO-2D (2010) según el tipo de cobertura, los cuales corresponden a los recomendados por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (1997). En la Tabla 1 del Anexo 05, se presentan los coeficientes de rugosidad base así como el mapa de coeficientes empleados para los cauces y zonas de inundación modeladas.

12.3.9 Estructuras hidráulicas

Para considerar las diferentes estructuras hidráulicas al interior de los cauces en el Modelo FLO-2D, se construyeron curvas elevación-caudal para cada uno de los tipos y dimensiones de obras existentes. Este proceso se realizó con la ayuda del Software HY-8 de la Federal Highway Administration Agency del U.S. Department of Transportation, el cual considera tanto control en la entrada como en la salida y determina la capacidad de la obra empleando la condición más desfavorable. Dada la alta pendiente de las estructuras y de los cauces, la capacidad de las estructuras al interior del Polígono Esfuerzos de Paz está dada por control en la entrada.

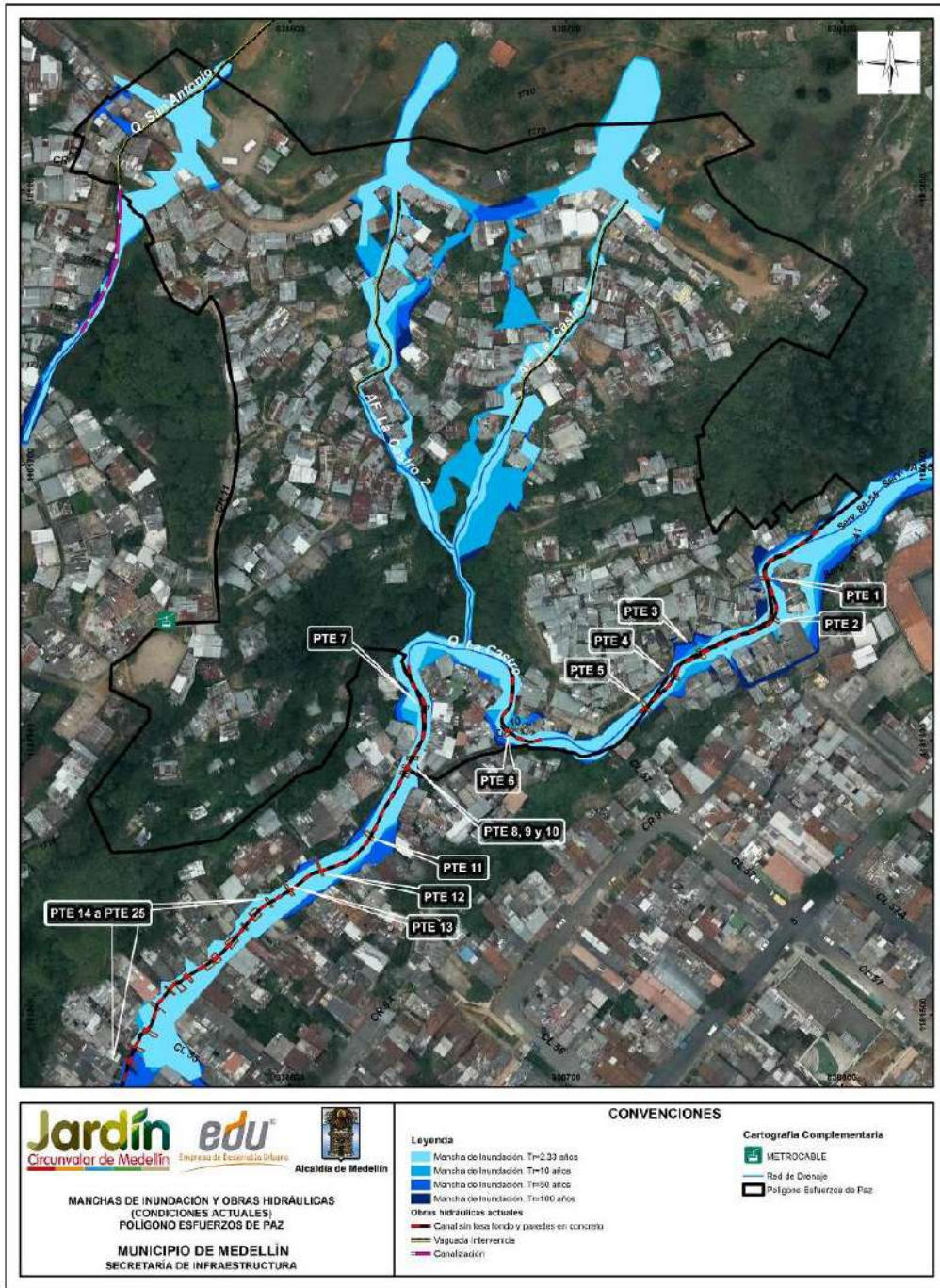
Para considerar las posibles obstrucciones en la entrada de las estructuras hidráulicas, se ha considerado un porcentaje de obstrucción de acuerdo con las condiciones geométricas y los cambios de dirección en el encole de la estructura.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

12.3.10 Resultados en la Quebrada La Castro (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Castro se presentan en el Mapa 32 y el Mapa 33, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados. En la geodatabase que corresponde al Anexo 12 se presentan los mapas tipo raster de velocidades y profundidades de flujo.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada La Castro, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones existentes del sitio.



Mapa 32. Manchas de inundación para las Quebradas La Castro y San Antonio y Afluentes La Castro 1 y La Castro 2 en condiciones actuales (EDPManchasObrasCondiActuales_Medellin_C)

12.3.10.1 Tramo 1 (Canal Natural)

En este tramo es importante mencionar que las viviendas y sus accesos peatonales ubicados sobre el cauce actúan como obstrucciones al flujo durante los eventos de crecientes asociados a diferentes periodos de retorno. Estas condiciones se deben a la localización de estas viviendas y estructuras respecto al cauce, a la invasión que generan sobre el cauce y al no respeto de los retiros hidrológicos. Estas mismas obstrucciones, generan desbordamientos hacia caminos o servidumbres existentes en la margen izquierda a distancias de más de 20 m desde el cauce.

Como se puede observar en el Mapa 32 y el Mapa 33, se tiene un comportamiento de vertimiento, donde el flujo en el canal natural no es suficiente para contener las aguas asociadas a eventos extraordinarios.

Recorriendo el cauce de la Quebrada La Castro desde el límite del Polígono Esfuerzos de Paz a una distancia aproximada de 100 m, se observan construcciones que se encuentran dentro de la mancha de inundación asociada a periodos de retorno mayores que 2.33 años que hacen parte de la sección hidráulica de canal natural. Las velocidades y profundidades asociadas a los diferentes periodos de retorno se muestran en la Tabla 51.

Las profundidades máximas en este tramo varían entre 0.87 m y 7.13 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 1.40 m y 8.13 m para 100 años de periodo de retorno. Las profundidades máximas se presentan en aquellos sitios donde se presentan importantes obstrucciones al flujo, como en viviendas y pasos o puentes peatonales que se encuentran ubicadas al interior del cauce, lo cual genera controles hidráulicos y condiciones de remanso.

La velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 3.52 m/s y 7.80 m/s y entre 4.91 m/s y 11.02 m/s para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 51. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.87	7.13	1.09	9.98	1.30	4.23	1.40	8.13
Profundidad Llanura (m)	0.00	2.44	0.00	2.96	0.00	3.38	0.00	3.58
Velocidad Canal (m/s)	3.52	7.80	4.09	8.88	4.59	9.18	4.91	11.02
Velocidad Llanura (m/s)	0.01	7.79	0.02	7.95	0.01	9.05	0.02	11.00

12.3.10.2 Tramo 2

De igual forma que para el Tramo 1, en este Tramo 2 también juegan un papel importante las viviendas y demás estructuras como accesos y pasos o puentes peatonales ubicados sobre el cauce, ya que éstos actúan como obstrucciones al flujo durante los eventos de crecientes asociados a los periodos de retorno evaluados. Estas condiciones se deben a

la localización de estas viviendas y estructuras respecto al cauce, a la invasión que generan sobre el cauce y al no respeto de los retiros hidrológicos.

Las profundidades máximas en este tramo varían entre 1.05 m y 7.00 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 1.38 m y 8.47 m para 100 años de periodo de retorno. Las profundidades máximas se presentan en aquellos sitios donde se presentan importantes obstrucciones al flujo, como en viviendas y pasos o puentes peatonales que se encuentran ubicadas al interior del cauce, lo cual genera controles hidráulicos y condiciones de remanso.

La velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 6.10 m/s y 7.80 m/s y entre 6.22 m/s y 11.02 m/s para un periodo de retorno de 100 años. (Tabla 52).

Tabla 52. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	1.06	7.00	1.21	11.01	1.29	5.02	1.38	8.47
Profundidad Llanura (m)	0.00	2.06	0.00	4.06	0.00	3.28	0.00	3.75
Velocidad Canal (m/s)	6.10	7.80	6.25	8.88	5.05	9.55	6.22	11.02
Velocidad Llanura (m/s)	0.02	7.79	0.02	7.95	0.02	9.00	0.02	11.00

12.3.10.3 Tramo 3



En este tramo, que se encuentra por fuera de la zona del polígono de estudio, las profundidades máximas varían entre 1.78 m y 7.27 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 1.91 m y 12.46 m para 100 años de periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 6.70 m/s y 7.80 m/s y entre 7.88 m/s y 11.06 m/s para un periodo de retorno de 100 años. (Tabla 53).

Tabla 53. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 3 de la Quebrada La Castro. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	1.78	7.27	1.75	11.89	1.39	3.54	1.91	12.46
Profundidad Llanura (m)	0.00	2.13	0.00	2.35	0.00	1.89	0.00	2.84
Velocidad Canal (m/s)	6.70	7.80	7.50	8.88	7.64	9.30	7.88	11.06
Velocidad Llanura (m/s)	0.03	7.79	0.02	7.95	0.01	3.37	0.02	11.00

12.3.11 Resultados drenaje Afluente La Castro 1 (Condiciones Actuales)

Debido a las intervenciones hechas en el cauce, en esta zona la quebrada no tiene un cauce definido, por lo que se modela como un flujo sobre ladera. De acuerdo con lo anterior se tiene que las profundidades máximas en este tramo varían entre 0.01 m y 0.48 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.02 m y 0.99 m para 100 años de periodo de retorno, las velocidades máximas para 2.33 años en este tramo varían

 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

entre 0.17 m/s y 5.66 m/s y entre 0.09 m/s y 8.80 m/s para un periodo de retorno de 100 años, como se puede observar en la Tabla 54.

Tabla 54. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el del Afluente La Castro 1. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.01	0.48	0.00	0.89	0.01	1.01	0.02	0.99
Profundidad Llanura (m)	0.00	4.27	0.00	4.55	0.00	4.74	0.00	4.59
Velocidad Canal (m/s)	0.17	5.66	0.13	8.21	0.05	8.64	0.09	8.80
Velocidad Llanura (m/s)	0.02	11.77	0.01	13.05	0.01	12.73	0.01	12.84

12.3.12 Resultados drenaje Afluente La Castro 2 (Condiciones Actuales)

Debido a las intervenciones hechas en el cauce, en esta zona la quebrada no tiene un cauce definido, por lo que se modela como un flujo sobre ladera. De acuerdo con lo anterior se tiene que las profundidades máximas en este tramo varían entre 0.03 m y 0.44 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.03 m y 1.04 m para 100 años de periodo de retorno, las velocidades máximas para 2.33 años en este tramo varían entre 0.11 m/s y 2.14 m/s y entre 0.07 m/s y 4.40 m/s para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 55. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el del Afluente La Castro 2. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.03	0.44	0.03	0.71	0.03	0.90	0.03	1.04
Profundidad Llanura (m)	0.00	1.23	0.00	1.34	0.00	1.38	0.00	1.44
Velocidad Canal (m/s)	0.11	2.14	0.26	2.99	0.07	4.04	0.07	4.44
Velocidad Llanura (m/s)	0.01	3.45	0.01	4.41	0.01	5.32	0.02	5.89

12.3.13 Resultados en la Quebrada San Antonio (Condiciones Actuales)

Las manchas de inundación asociadas a los diferentes periodos de retorno, representan una amenaza para las construcciones que se encuentran dentro del Polígono Esfuerzos de Paz, como se puede observar en el Mapa 32 y el Mapa 33. Para el tramo analizado de la Quebrada San Antonio se tiene que las profundidades máximas en este tramo varían entre 0.03 m y 1.30 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.00 m y 6.44 m para 100 años periodo de retorno, las velocidades máximas para 2.33 años en este tramo varían entre 0.01 m/s y 6.44 m/s y entre 0.01 m/s y 13.14 m/s para un periodo de retorno de 100 años.

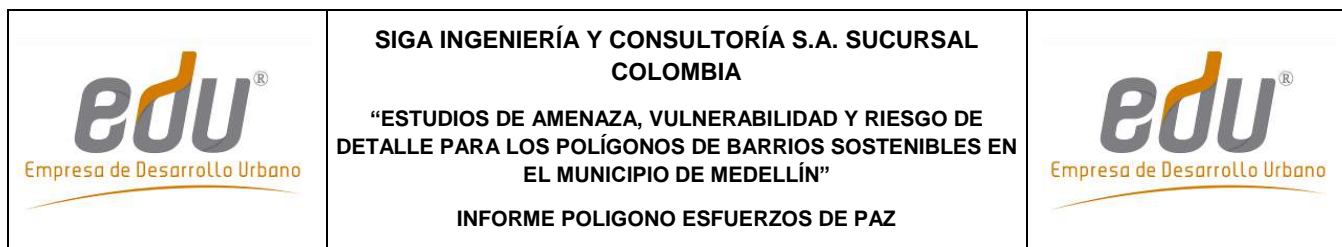
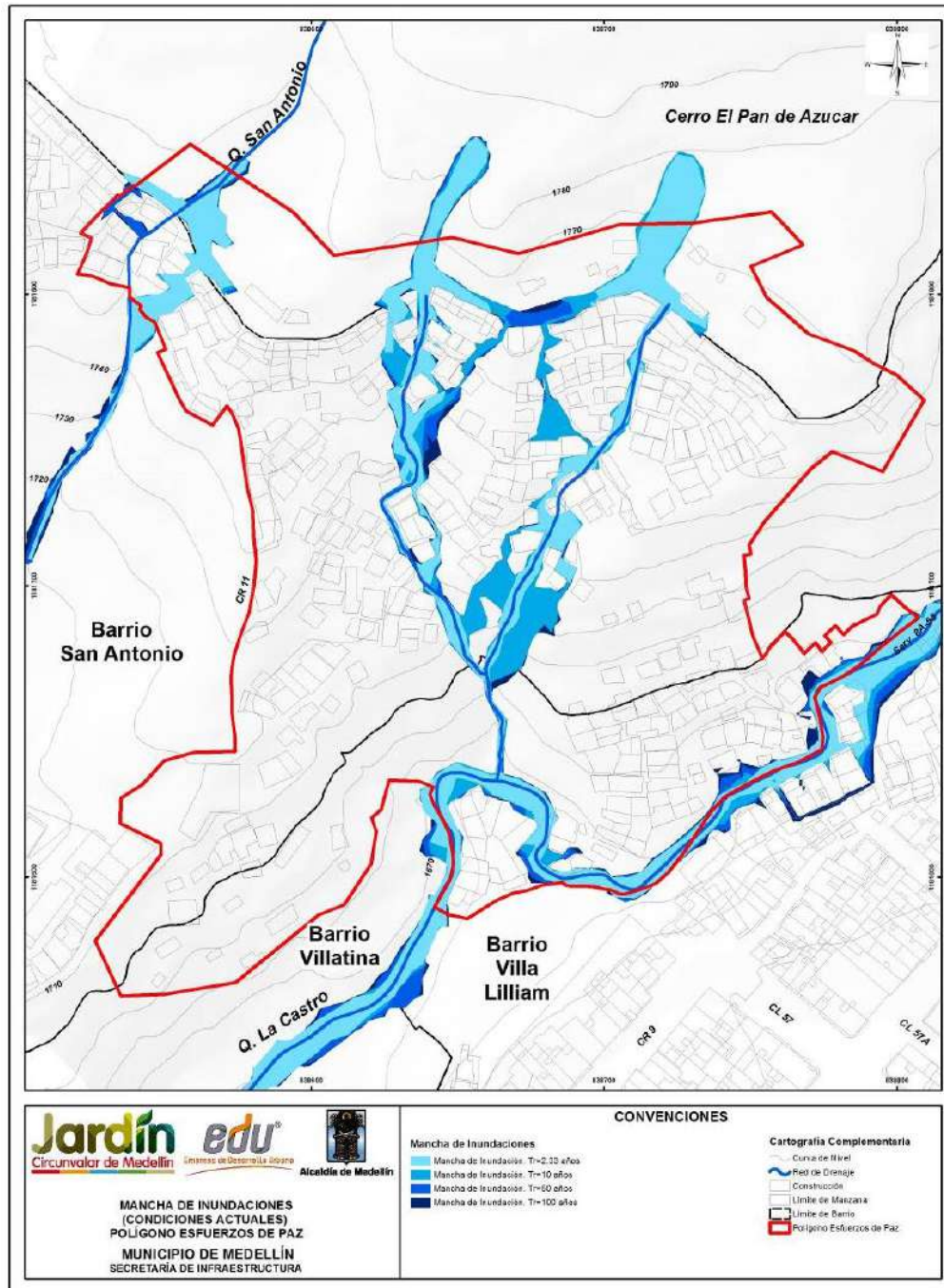




Tabla 56. Velocidades y profundidades máximas de flujo en La Quebrada San Antonio. Condiciones actuales

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.03	1.30	0.03	1.82	0.03	2.02	0.03	3.24
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.36	0.00	0.69	0.00	0.79	0.00	1.06
Velocidad Canal (m/s)	0.33	6.44	0.33	7.22	0.34	9.16	0.34	13.14
Velocidad Llanura (m/s)	0.01	5.28	0.01	6.48	0.01	7.53	0.01	8.04



Mapa 33. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono Esfuerzos de Paz (21_EDPManchalInundaciones_Medellin_C y 21_EDPManchalInundaciones_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

13. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

13.1 METODOLOGÍA

13.1.1 Objetivo y aspectos generales

Con la metodología planteada se pretende implementar un método cuantitativo y fácilmente reproducible, que permita definir las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa. La metodología implementada es de reconocida validez, toda vez que ha permitido delimitar y caracterizar los diferentes niveles de amenaza (alta, media y baja) de la zona del “Proyecto Barrios Sostenibles”

De forma general, la metodología comprende el análisis de las condiciones de estabilidad determinándose el factor de seguridad a partir de una teoría de equilibrio límite. Posteriormente, se realizan los respectivos análisis para determinar la amenaza por movimientos en masa, mediante el cálculo de la probabilidad de falla, considerando la variabilidad intrínseca de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un factor detonante.



El proceso de determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla al interior de la UMI y del polígono, se realiza para ciertos escenarios que comprenden condiciones actuales y naturales de la ladera y bajo la acción de escenarios críticos como elementos detonantes, como por ejemplo la actuación del sismo. Finalmente, se realiza un análisis considerando las obras proyectadas, para lo cual, en el caso de la evaluación de la estabilidad, se recurre a análisis puntuales de secciones bidimensionales en las que igualmente se determinan las condiciones de amenaza.

Se hizo uso de toda aquella información básica útil y disponible desde el punto de vista geológico y geotécnico, como por ejemplo, la realización de exploración geotécnica, la caracterización de los materiales a través de los ensayos de laboratorio y la instrumentación geotécnica instalada. Finalmente, los resultados se presentan de forma regional o general sobre el área de estudio correspondiente a la UMI, a través de una Herramienta SIG.

Se resalta que la metodología mediante el uso de teorías de equilibrio límite, factor de seguridad y probabilidad de falla, sólo es aplicable para movimientos de remoción en masa como deslizamientos, flujos o desprendimientos de roca. Cualquier otro tipo de movimiento o problemática, como por ejemplo subsidencias y fenómenos erosivos, no pueden ser analizados de forma cuantitativa.

13.1.2 Escenarios de análisis

Para el análisis de la amenaza por movimientos en masa se consideraron básicamente cuatro escenarios, los cuales se explican de forma resumida a continuación.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

13.1.2.1 Escenario 1

Este escenario corresponde a la situación actual y para los procesos por movimientos en masa identificados como parte del modelo geológico-geotécnico propuesto para el área objeto de estudio, el cual fue presentado en el Capítulo 4 de este informe. En este escenario, se determinó el factor de seguridad y la probabilidad de falla considerando la variabilidad natural de los parámetros de resistencia al corte de cada uno de los materiales geológicos y geotécnicos que se encuentran al interior de la UMI.

Considerando los hallazgos encontrados a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas dado que la mayoría de las perforaciones no se reportó presencia del nivel freático y los piezómetros instalados no interceptaron el flujo subterráneo.

13.1.2.2 Escenario 2

El segundo escenario corresponde a las condiciones normales de lluvia y también a las extremas de dicha variables. No obstante, en el caso particular de la UMI objeto de este estudio, la zona presenta varias características que conllevan a considerar a la lluvia como un elemento de poca relevancia en la detonación de movimientos en masa.

Inicialmente es importante considerar que las condiciones freáticas de la zona, según los registros de perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, muestran una zona seca.

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI se presentan pendientes en el terreno mayores que 30° y la presencia de drenajes naturales que funcionan como sistemas de canalización de las aguas de escorrentía. Por ejemplo, los análisis de infiltración/escorrentía mostrados en el Capítulo 11, muestran para la Quebrada La Castro 1 coeficientes de escorrentía de 48% para el caso de las lluvias más probables (TR 2.33 años) y de 66% para el caso de las lluvias más críticas (TR 100 años). El tiempo de concentración promedio asociado a estas condiciones de pendiente son de 5.7 min, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

En cuanto a los usos del suelo, la UMI se caracteriza por poseer aproximadamente un 90% en uso forestal y el otro 10% en uso urbano.

Finalmente, se tiene lo que corresponde a las características físicas e hidráulicas de los materiales en superficie. Los suelos encontrados en la superficie de la UMI, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) y baja plasticidad (ML) donde sus índices de plasticidad varía entre 0 y 50, los límites líquidos superiores a 50 y los porcentajes de saturación superiores a 80%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes de permeabilidad a través de ensayos de laboratorio de consolidación, realizados sobre algunas muestras de la zona arrojaron valores no menores de $1 \times 10^{-9} \text{m/s}$, lo que hace que se trate de materiales altamente impermeables. En este sentido vale la pena retomar lo anotado en el Numeral 8.5 y en particular en el Numeral 8.5.2 con respecto al regolito de la zona de estudio.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
--	--	--

Teniendo en cuenta los anteriores argumentos, se considera improbable la creación de frentes húmedos superficialmente por efectos de infiltración, o el ascenso de niveles freáticos subterráneos que puedan afectar la estabilidad de las laderas.

13.1.2.3 Escenario 3

El tercer escenario corresponde al sismo al que podrá estar expuesta el área de estudio, esto de acuerdo con la normativa en el Área Metropolitana de Valle de Aburrá. Para este caso se consideraron los criterios establecidos en el Capítulo 9, donde se establece la aplicación de un coeficiente espectral horizontal de 0.25g correspondiente 2/3 del coeficiente espectral máximo de diseño igual a 0.38 para un periodo de retorno de 475 años.

El análisis de probabilidad de falla contempla entonces el análisis considerando el sismo de 0.25g para 475 años, luego se encontrará la probabilidad de falla anual que será dividiendo la probabilidad de falla del análisis anterior por el periodo de retorno de 475 y finalmente la probabilidad de falla anual será llevada a una probabilidad de falla a 50 años a través de una función exponencial de probabilidad.

13.1.2.4 Escenario 4

El cuarto y último escenario corresponde a la situación generada por el cambio de la aptitud del uso (licencia de urbanización, parcelación, construcción de nuevas obras de urbanismo, y plan de construcciones más probables). Se tendrán en cuenta para cada caso cortes, excavaciones, rellenos, sobrecargas, modificaciones del drenaje, entre otros.

Estos análisis de estabilidad se realizan mediante análisis bidimensionales en las zonas donde se tengan proyectadas las obras del Proyecto Barrios Sostenibles y sus respectivas obras de mitigación una vez identificado el riesgo.

13.1.3 Cálculo de los factores de seguridad

El análisis de amenaza por movimientos en masa, considera la evaluación de los factores de seguridad de las laderas.

Los análisis de estabilidad se desarrollaron mediante teorías de equilibrio límite. Fenómenos de inestabilidad ocurridos en la zona y la hipótesis de la poca presencia de espesores de suelo en las zonas de alta pendiente, direccionan a un mecanismo de falla planar. Para esto, se utilizó entonces la Teoría de Taylor (1948), conocida como la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 196).

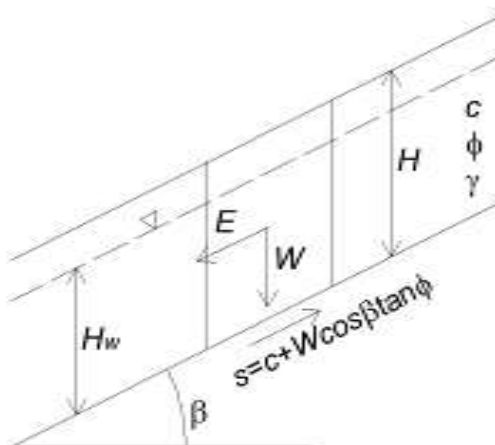


Figura 196. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar

Para condiciones estáticas normales, la teoría del talud infinito se determina con base en la siguiente expresión:



$$FS_{estático} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta \sin \beta}$$

Para condiciones pseudoestáticas normales, la teoría del talud infinito puede ser expresada como:

$$FS_{dinámico} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)}$$

Es así como para los análisis de estabilidad, el factor de seguridad está en función del espesor de la capa de suelo (H), la posición del nivel freático (H_w), la inclinación o pendiente de la ladera (β) y los parámetros de resistencia al cortante de los materiales, expresados estos últimos a través del ángulo de fricción interna (ϕ), la cohesión (c) y el peso unitario (γ). En el caso del análisis pseudoestático está en función adicional de la aceleración crítica horizontal (A_h).

En cuanto al espesor de la capa de suelo (H), vale la pena explicar la forma en que fue determinado. Como se presentó en el Capítulo 4 de este informe, la unidad geológica predominante en la zona de estudio corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. Considerando entonces las diferentes formaciones geológicas de la zona, se establecieron varios perfiles geológico geotécnicos que atraviesan la UMI El Faro - Golondrinas de un extremo al otro. Con estos perfiles, se pudo correlacionar y conformar un modelo tridimensional de espesores a través de superficies de cada uno de los materiales de suelo. Dichas

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

superficies fueron empleadas para programar con Herramientas SIG la forma en que debía entenderse el espesor H y los correspondientes parámetros de resistencia al corte γ , c y ϕ . Dicha herramienta hizo diferentes modelaciones del factor de seguridad con diferentes valores de H, variando desde 0 m hasta 10 m obteniéndose el mínimo factor de seguridad. Finalmente, es importante aclarar que el valor máximo considerado de 10 m corresponde a lo registrado históricamente en la zona, con procesos morfodinámicos cuyo espesor máximo comprometido es, en general, menor que 10 m.

La expresión que acaba de presentarse para condiciones pseudoestáticas normales viene fundamentada por la teoría propuesta por Newmark (1965) para estimar el desplazamiento permanente generado por un movimiento sísmico en presas de tierra.

Vega (2013) resume la metodología de Newmark (1965) como un procedimiento donde se modela el talud como un bloque rígido de suelo que puede deslizarse a lo largo de un plano situado en su base bajo cierto grado de inclinación. El análisis de estabilidad con talud infinito es el método más común para modelar fenómenos de inestabilidad en un marco de escala de cuenca. Se basa en una geometría de deslizamiento de tierra simplificado, que asume una superficie de deslizamiento planar en una pendiente planar infinitamente extendida, tanto lateral como longitudinalmente. El análisis supone que la superficie de deslizamiento es paralelo a la superficie del suelo y coincidente con un sustrato impermeable. Este método analítico permite estimar las deformaciones de taludes y laderas ante la acción sísmica, y corresponde a un modelo simplificado en que el suelo se asume con respuesta rígida-plástica. Así mismo, se asume que el suelo no sufre deformaciones hasta cierto valor crítico de la fuerza solicitante y cuando ésta es superada se deforma plásticamente. Irregularidades en la pata y la cresta de la ladera pueden ser ignoradas y las propiedades del suelo y las presiones de poro en cualquier distancia dada por debajo de la superficie del suelo se suponen constantes (Graham 1984).

La fuerza crítica se asocia a una aceleración crítica (A_h) de la masa potencialmente deslizante y mientras las aceleraciones sean inferiores a esta, no se producen deformaciones debido a su comportamiento rígido. Cuando A_h es excedida, la masa se deforma irreversiblemente. Así mismo, la exactitud relativa de este método depende de la suposición de conducta rígida-plástica, pero el resto de problemas geotécnicos, derivados del análisis de las posibles superficies de falla y de las propiedades del material, está reunido en el factor de seguridad (FS). Es decir, es de aplicación general en cuanto a la geotecnia. Este método es aplicado cuando el bloque de masa de suelo se desliza en forma traslacional, pero con algunas modificaciones puede aplicarse a deslizamientos rotacionales.

Según Figueras et al. (2005), el análisis de Newmark, se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace más de 15 años y recientemente se ha calibrado y comparado en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico.

13.1.4 Cálculo de la probabilidad de falla

Finalmente, una vez determinadas las condiciones de estabilidad de la zona reflejados de forma cuantitativa en el factor de seguridad, se procede con el cálculo de la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que los valores considerados límites sean excedidos. En el caso del factor de seguridad (FS), la probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que ese factor de seguridad sea menor que la unidad.

Para determinar entonces la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en ladera, se recurre a los métodos probabilísticos que consisten en herramientas que introducen la incertidumbre en la formulación de los problemas para obtener la probabilidad de que un sistema o estructura no cumpla los requisitos de diseño o estabilidad. Utilizan técnicas de confiabilidad estructural, de estimación de probabilidades y de análisis de riesgos. Estos son los adoptados para modelar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos para estimar la probabilidad de falla de los taludes (Vega, 2013).

Los métodos probabilísticos más utilizados en el análisis de estabilidad y probabilidad de falla en geotecnia son:

- ✓ Método de las estimativas puntuales
- ✓ Método de primera orden segundo momento (FOSM)
- ✓ Método de primera orden momento de confiabilidad (FORM)
- ✓ Monte Carlo

Para este proyecto, la probabilidad de falla al deslizamiento será evaluada utilizando la metodología del índice de confiabilidad (β) el cual es una aplicación directa del método de Primera Orden y Segundo Momento (FOSM). Este método del índice de confiabilidad (β) será utilizado sobre las ecuaciones de resistencia (R) y la carga (C) que definen el factor de seguridad por equilibrio límite.

La diferencia entre la resistencia (R) y la carga (C) es lo que se denomina como margen de seguridad (M).

$$M = R - C$$

La resistencia y la carga manejan variaciones, por lo que estas dos magnitudes poseen momentos estadísticos como valores medios o esperados, desviaciones y covarianzas entre otros.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_C$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{RC}\sigma_R\sigma_C$$

Donde μ_R y μ_C son las medias o esperanzas de la resistencia y la carga respectivamente, σ_R y σ_C son las desviaciones estándar de la resistencia y la carga respectivamente, elevadas al cuadrado, estas últimas correspondiendo a la $Var(R)$ y la $Var(C)$ respectivamente. Finalmente, ρ_{RC} es el coeficiente de correlación entre la carga y la resistencia.

El índice de confiabilidad (β) expresa la distancia que existe entre la media y en este caso el valor crítico del margen de seguridad expresado en unidades de desviación estándar. Si la carga y la resistencia no presentan correlación alguna, entonces:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_C}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}$$

Partiendo de la definición de factor de seguridad al deslizamiento presentada en el numeral anterior, es posible reorganizar los términos de la definición y separar los esfuerzos resistentes y los esfuerzos actuantes causados por las fuerzas desestabilizadoras. Las variables que representan la resistencia (R) y la carga (C) siguen una distribución normal en los rangos de interés. Reorganizando los términos de la ecuación de factor de seguridad se tiene en el caso estático seudo estático lo indicado a continuación:

Caso Estático	Caso Seudoestático
Media de la resistencia	Media de la resistencia
$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$	$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$
Media de la carga	Media de la carga
$\mu_C = \gamma H \cos \beta \sin \beta$	$\mu_C = \gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)$

Para determinar las varianzas de la resistencia y de la carga (desviaciones estándar al cuadrado) de una variable definida por varias variables aleatorias X_i , en este caso la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) se hace:

$$\sigma_{R,C}^2 = Var(R, C) = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot Var(X_i)$$

Luego entonces la varianza de la carga (C) y de la resistencia (R) se expresa en el caso estático como:

Caso Estático	Caso Seudoestático
Varianza de la resistencia $\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$	Varianza de la resistencia $\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$
Varianza de la carga $\sigma_C^2 = 0$	Varianza de la carga $\sigma_C^2 = 0$

En la varianza de la carga para ambos casos, este valor es cero, dado que dentro de él no se contempla ninguna variable aleatoria.

La probabilidad de falla, p_f , o la probabilidad que el factor de seguridad sea inferior a 1.0 se puede determinar mediante la expresión:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta)$$

Donde $\Phi(\beta)$ es la función de distribución de probabilidad normal acumulada evaluada en el punto β que corresponde a la confiabilidad.



Finalmente, el resultado esperado es que en cada condición se tenga un valor del factor de seguridad con una probabilidad de falla o de ocurrencia. El siguiente paso corresponde a la agregación de dichas probabilidades y factores de seguridad empleando el teorema de probabilidad total.

$$P_{total} = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \dots \cup P_n$$

Donde P_1, P_2, P_3, P_n son un grupo de eventos mutuamente exclusivos que pueden corresponder por ejemplo, a la probabilidad de falla asociada al analizar las condiciones actuales del talud, o la probabilidad de falla en condiciones de nivel freático extremo o incluso, a la probabilidad de falla cuando ocurre el sismo.

13.1.5 Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para Van Westen & Terlien (1996), la mayoría de los modelos deterministas son específicos del sitio y no tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada. Los modelos que tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada se denominan "modelos distribuidos". Ahora bien, los modelos distribuidos deterministas, requieren mapas donde se tenga la distribución espacial de los datos de entrada. La aplicación de modelos deterministas para la zonificación de la amenaza al deslizamiento en áreas extensas, no ha llegado a un desarrollo más amplio, debido a la variabilidad regional de variables geotécnicas como la cohesión, ángulo de fricción interna, el espesor de las capas, o profundidad del nivel freático. Por otra parte, el cálculo de los factores de seguridad en zonas más extensas, implica una cantidad

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

extremadamente grande de cálculos, que no podrían ser ejecutados sin el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Actualmente, sólo el uso de modelos deterministas resulta en mapas reales de peligro, de acuerdo con la definición de Varnes (1984): “la amenaza significa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un plazo determinado de tiempo y dentro de una zona determinada”. Los modelos deterministas, junto con la información de magnitud/frecuencia de eventos detonantes como las lluvias o los terremotos, hacen posible derivar una probabilidad de falla, que puede ser utilizado en estudios de riesgo.

Cualquier estudio de riesgo requiere de la información espacial de la superficie de la zona de estudio, sus características topográficas, la geología, la hidrología y los usos del suelo, entre otros. Para gestionar todo este volumen de información, se requiere disponer de Sistemas de Información Geográfica, ya que estas herramientas permiten administrar tal volumen de datos, de manera rápida y detallada, y permiten además la presentación gráfica de resultados. En la actualidad, la integración en un SIG con modelos matemáticos facilita procesos de simulación, y acelera el análisis espacial de las variables y de los parámetros requeridos (Vega, 2013). Estas herramientas permiten centralizar e integrar información normalmente dispersa en diferentes formatos, al igual que ofrece sistemas dinámicos de información, puesto que los datos pueden ser actualizados periódicamente para producir nueva información de acuerdo con las necesidades de diferentes aplicaciones y usuarios.

El uso de las herramientas SIG posibilitó en este caso efectuar evaluaciones multi amenazas, permitiendo combinar eficientemente varios conjuntos de datos espaciales en modelos y escenarios para diferentes grados de amenazas. En el caso de los movimientos en masa, la herramienta SIG facilita la obtención de los parámetros morfométricos necesarios para realizar estudios de deslizamientos superficiales mediante técnicas multivariantes, así como la evaluación de las condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, y las condiciones de movilidad del desplazamiento. (Lantada, 2007).

Según Xie et al. (2003), el cálculo de la estabilidad para la evaluación deslizamiento de tierra se puede realizar dentro o fuera del SIG. Si se realizan los cálculos fuera del SIG, este sólo se utilizaría como una base de datos espacial para almacenar, visualizar y actualizar los datos de entrada. La principal ventaja de este enfoque es que los modelos externos existentes pueden utilizarse sin perder tiempo en la programación de los algoritmos de modelo en el SIG. Una desventaja de hacer cálculos de los modelos fuera de los SIG, es la complicación causada por la conversión de datos hacia y desde modelos externos. La conversión de datos puede ser un problema importante porque la mayoría de los programas tienen su propio formato de datos, o en el caso más desfavorable, algunos tienen módulos de entrada especiales que sólo permiten el ingreso de datos de forma manual aumentando el tiempo de procesamiento y la probabilidad del error. Otra desventaja del uso de modelos externos es la representación de los resultados de los cálculos del modelo, que normalmente no se distribuyen espacialmente, en forma de mapas en un SIG. Para superar el problema de la conversión de datos, los cálculos del

modelo deterministas pueden ser realizados dentro del SIG. La desventaja de este enfoque es, sin embargo, que sólo modelos simples se puede aplicar fácilmente debido a las limitaciones con respecto a la utilización de algoritmos complejos, procedimientos de iteración y la tercera dimensión en el GIS convencional, de dos dimensiones. Xie et al. (2003) cita algunos trabajos utilizando la teoría de talud infinito, que permiten el cálculo del factor de seguridad para cada pixel individual, a través de la implementación del SIG (Aleotti & Chowdhury, 1999; Anbalagan, 1992; Carrara, 1995; Dai & Lee, 2001).

Según Van Westen & Terlien (1995), la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 196) es el método más adecuado para el uso de modelos deterministas en un entorno SIG citando trabajos como los de Ward et al. (1982) y Brass et al. (1989). Esta teoría, es el único modelo que calcula inestabilidad de la ladera sobre una base de pixel, y por lo tanto es muy adecuado para ser utilizado en un SIG. El modelo de pendiente infinita unidimensional describe la estabilidad de taludes en la forma más simple. Su limitante radica en que sólo podría ser aplicable para el cálculo de superficies de falla planares. La estabilidad de taludes se calcula para los píxeles en un mapa, utilizando la información combinada de varios mapas de entrada, tales como la pendiente del terreno, el espesor del suelo, la resistencia del suelo, y la profundidad del nivel freático. Los cálculos para cada píxel individual resultarán en valores del factor de seguridad, que pueden utilizarse para crear un mapa de amenaza (Figura 197).

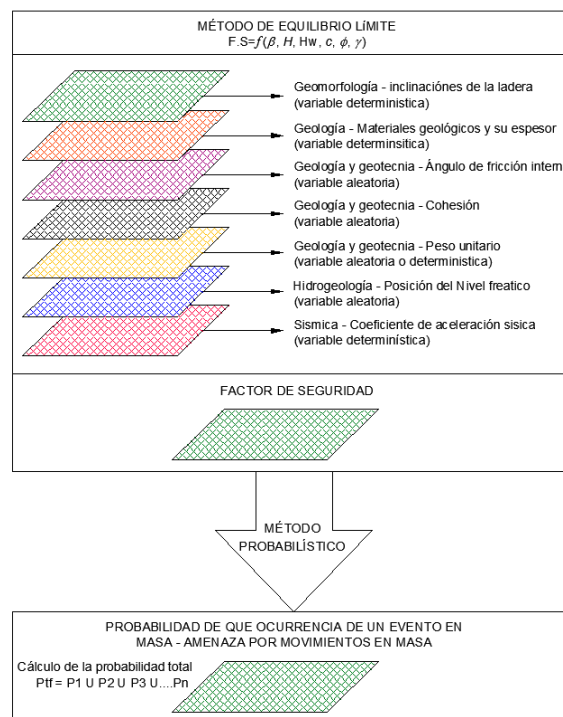
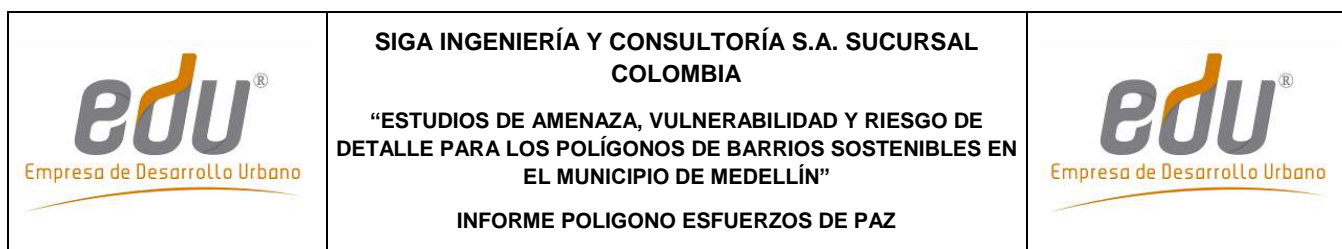


Figura 197. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa



A través de un método probabilístico, obtener la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de inestabilidad que equivaldría en este caso, a la amenaza por un fenómeno de inestabilidad.

Para todos los escenarios, se elaboraron mapas de amenaza a escala 1:2.000 o de mayor detalle para el área urbana (1:1.000 o 1:500) y 1:5.000 o de mayor detalle para el área rural (1:1.000 o 1:500).

Finalmente, dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa también se considerará el efecto de la red hídrica, en particular lo relacionado con los procesos de socavación en los cauces que pudieran afectar la estabilidad de las laderas adyacentes. Debido a que estos deslizamientos o procesos son difíciles de modelar con una metodología regionalizable, se partió de los resultados de la estimación de la socavación en los cauces para evaluar los factores de seguridad a través de análisis de estabilidad convencionales bidimensionales. Dichos análisis se realizaron de forma local, sobre las secciones donde se manifiesten las mayores afectaciones por efectos de la dinámica fluvial.

13.1.6 Criterios para calificar la amenaza

La Ficha Técnica del Proyecto Barrios Sostenibles estableció unos criterios para juzgar el factor de seguridad y la probabilidad de falla que definen la amenaza por movimientos en masa.

No obstante, esta oficina consideró que en el caso de los criterios de factor de seguridad, los mismos son estrictos y se alejan de las recomendaciones establecidas por algunas referencias de gran aceptación científica como lo son el Control Geotécnico de Hong Kong (GEO), el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Por lo anterior, se consideró la propuesta de rangos de factor de seguridad mostrado en la Tabla 57. En la Tabla 58 se presentan los rangos en términos de probabilidad de falla expuestos por la ficha técnica mencionada, considerando que estos se aplican para un periodo proyectado de 50 años.

Tabla 57. Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad

Nivel de Amenaza	Factor de Seguridad (F.S)
Bajo	>1.5
Media	1.2 a 1.5
Alto	<1.2



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

Tabla 58. Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años

Nivel de Amenaza	Probabilidad de Falla (%P.F)
Bajo	0.00% a 3.20%
Media	3.20% a 5.50%
Alto	>5.50%

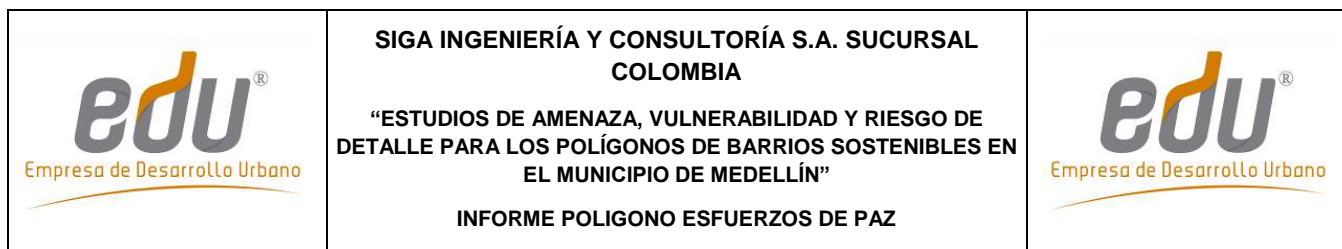
13.2 RESULTADOS

El Mapa 34 y el Mapa 35 presentan los respectivos análisis del factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, respectivamente, con respecto a los cuales se pueden hacer los siguientes comentarios:

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas se puede ver que por lo menos en la mitad del polígono se presentan valores altos de FS, por encima de 1.5. En general, los factores de seguridad bajos ($FS \leq 1.2$) predominan en las zonas con pendientes muy altas, mayores que 30° , coincidiendo con vaguadas y cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años.
- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones pseudoestáticas, representativo del escenario con sismo, se puede ver que la mayor parte del polígono presenta valores de FS menores o iguales que 1.2. Algunas de las zonas con factores de seguridad bajos coinciden con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años. Vale la pena aclarar que factores de seguridad pseudoestático mayores de 1.1 pueden considerarse aceptables, de tal manera que los FS considerados bajos en el Polígono Esfuerzos de Paz realmente alcanzan, en algunos puntos, valores que pudieran ser adecuados.

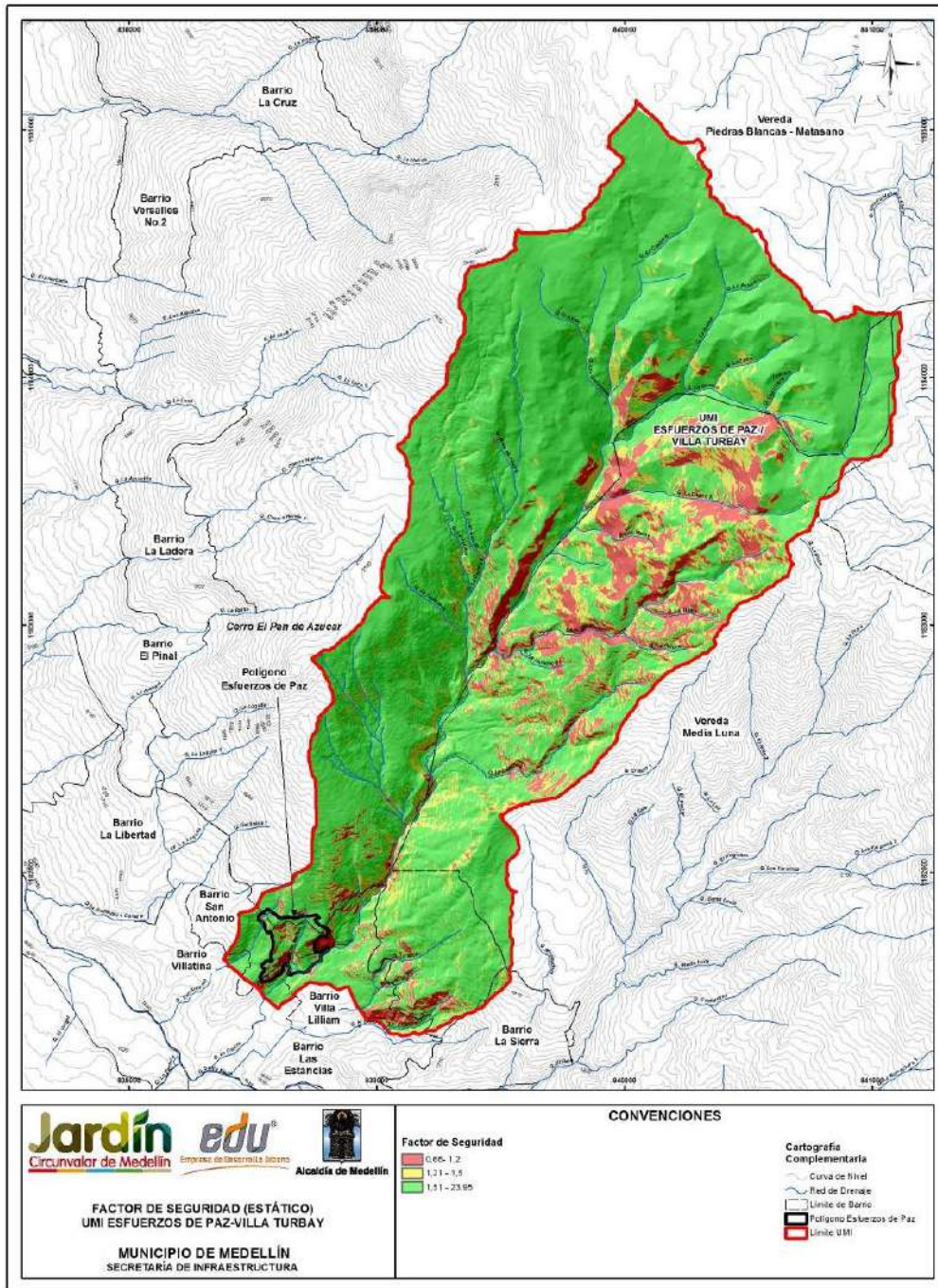
En el Mapa 36 se muestran los resultados de los análisis de probabilidad de falla considerando las variaciones en los parámetros de resistencia al corte. Posteriormente, se evaluó la probabilidad de falla considerando el efecto del sismo, con la actuación de un sismo de magnitud 0.25g que equivale a $2/3$ de 0.38g para el cual se tiene un periodo de retorno de 475 años (Mapa 37). Para efectos de encontrar la probabilidad de falla a 50 años de proyección, se procedió a analizar el efecto del sismo dividiendo los resultados obtenidos en el Mapa 37 por el respectivo periodo de retorno de 475 años (Mapa 38).

Finalmente, en el Mapa 39, el Mapa 40 y el Mapa 41, se presenta el mapa de zonificación de la amenaza total de la UMI y del Polígono Esfuerzos de Paz considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. Se puede establecer que se obtienen zonas en los tres grados de amenaza considerados, baja (probabilidad de falla menor o igual que el 3.2%), media (probabilidad de falla entre el 3.2% y el 5.5%) y alta (probabilidad de falla mayor que el 5.5%). Las áreas con probabilidad de falla alta predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI.

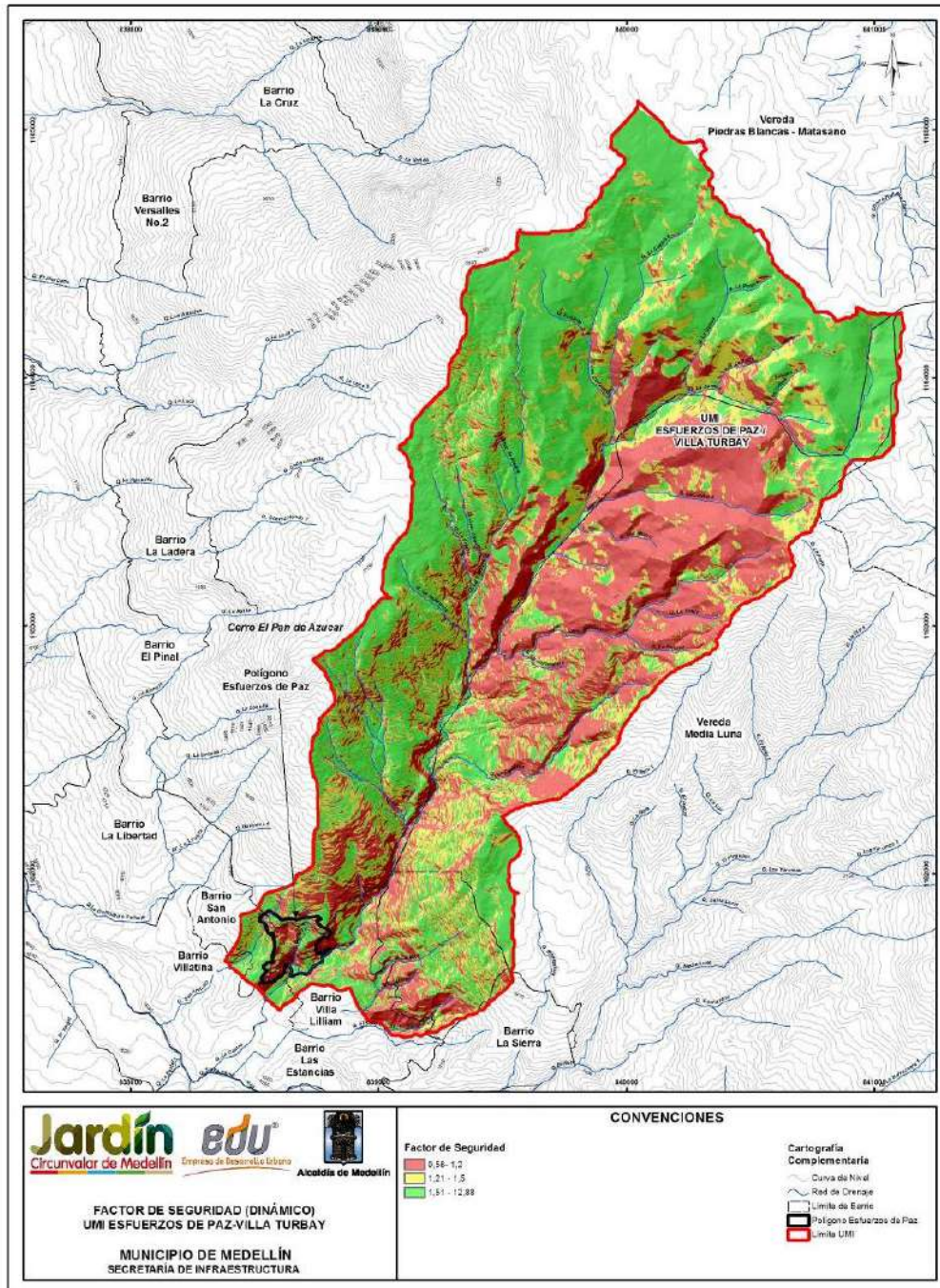


En la Figura 198 se muestran los principales focos de inestabilidad localizados al interior del polígono. Estos son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda.

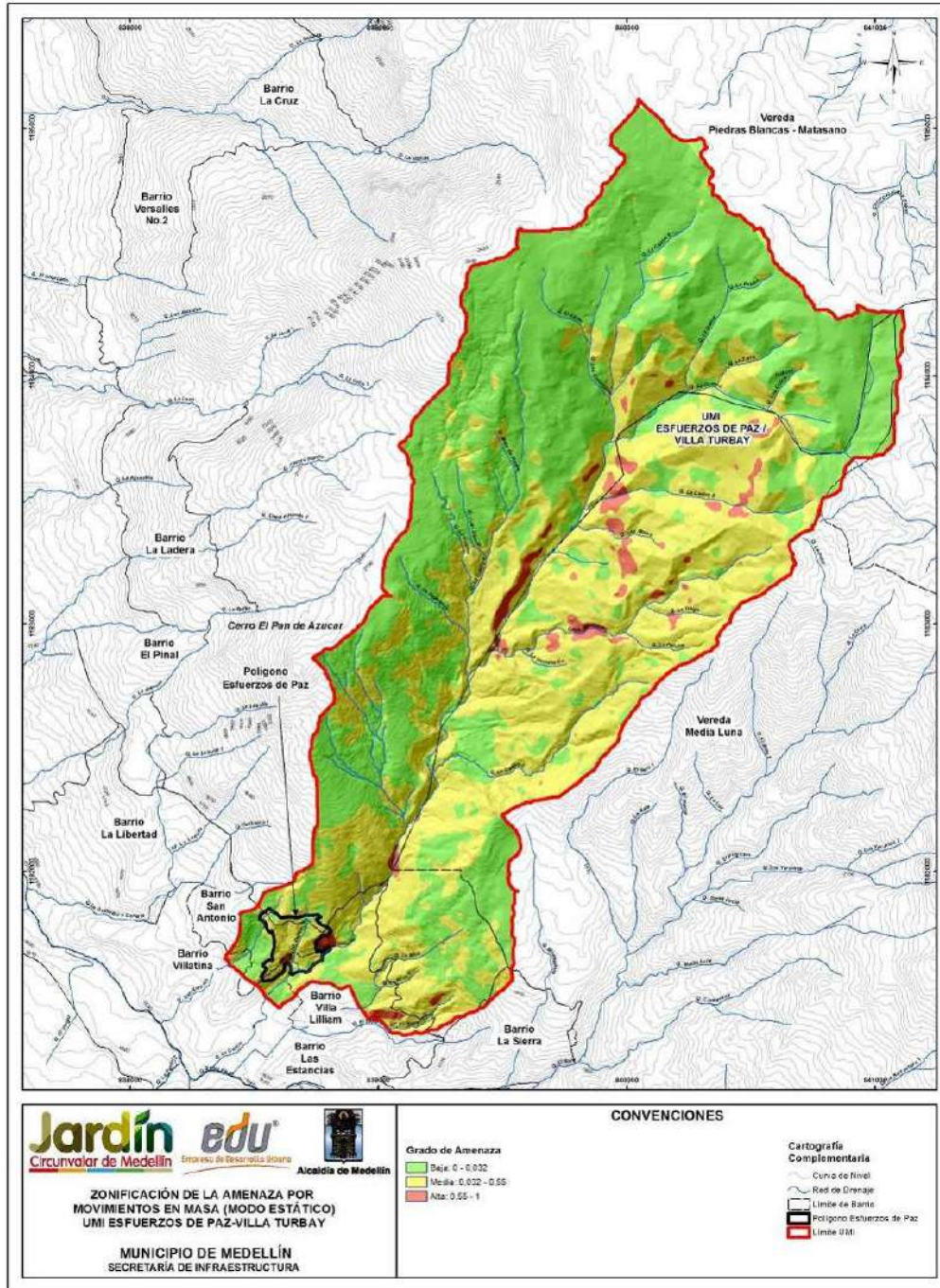
Con respecto a estos focos de mayor inestabilidad, se tiene un primer conjunto de focos localizados en el centro y parte alta del polígono, que en la Figura 198, se identifican como Focos 1, 2, 3, 5, y 6 y otro conjunto localizado en la parte baja del polígono que se identifican como Focos 7, 8 y 10. Son sitios potencialmente inestables, ubicados en una ladera urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el Horizonte IC de cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y en zonas de depósitos de flujo de lodos y/o escombros, en el caso de los Focos 2 y 3. En la zona se mapearon vaguadas y procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas.



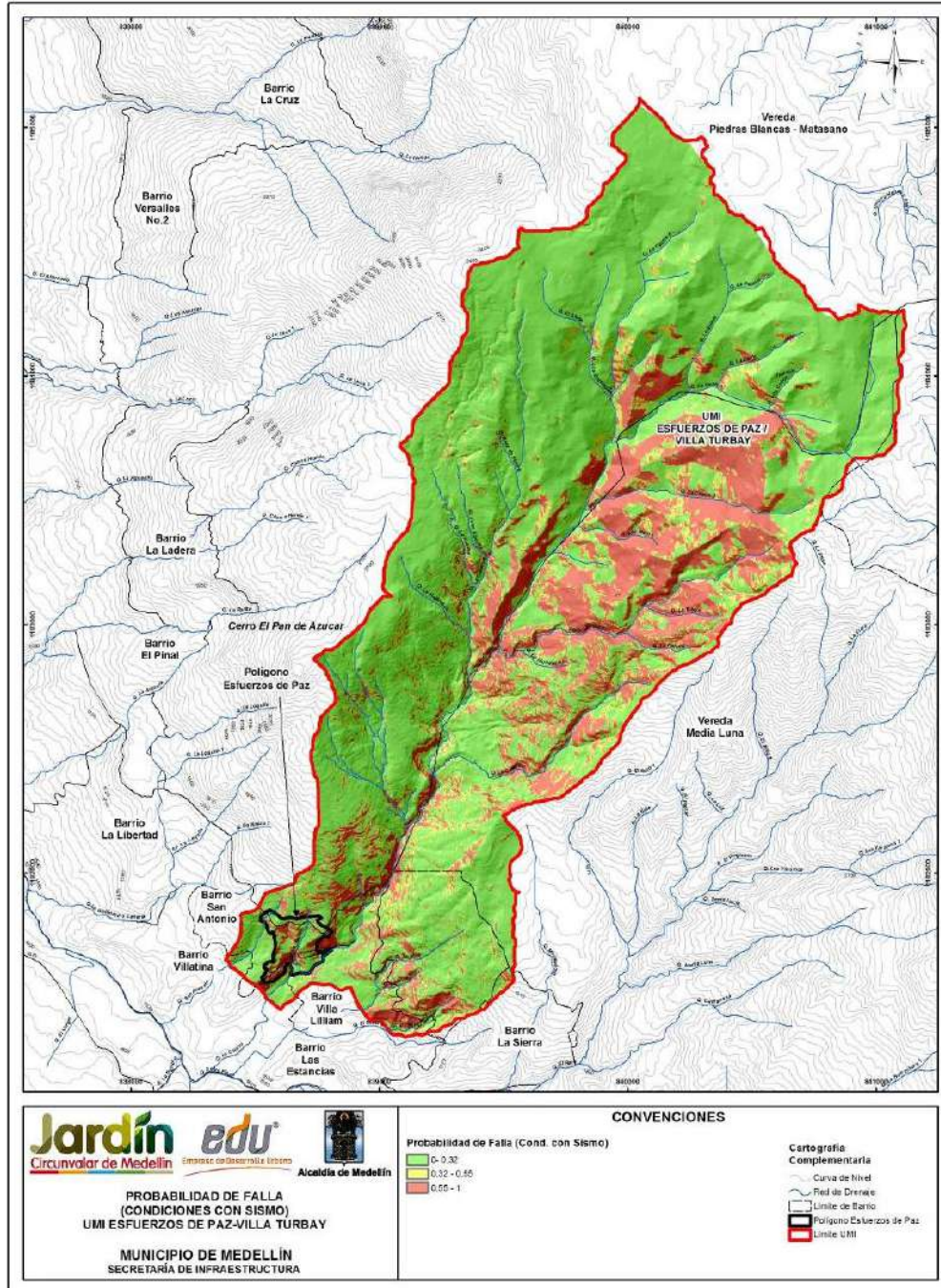
Mapa 34. Análisis del factor de seguridad de la UMI Esfuerzos de Paz en condiciones estáticas (EDPFactorSeguridadEstaticoUMI_Medellin_C)



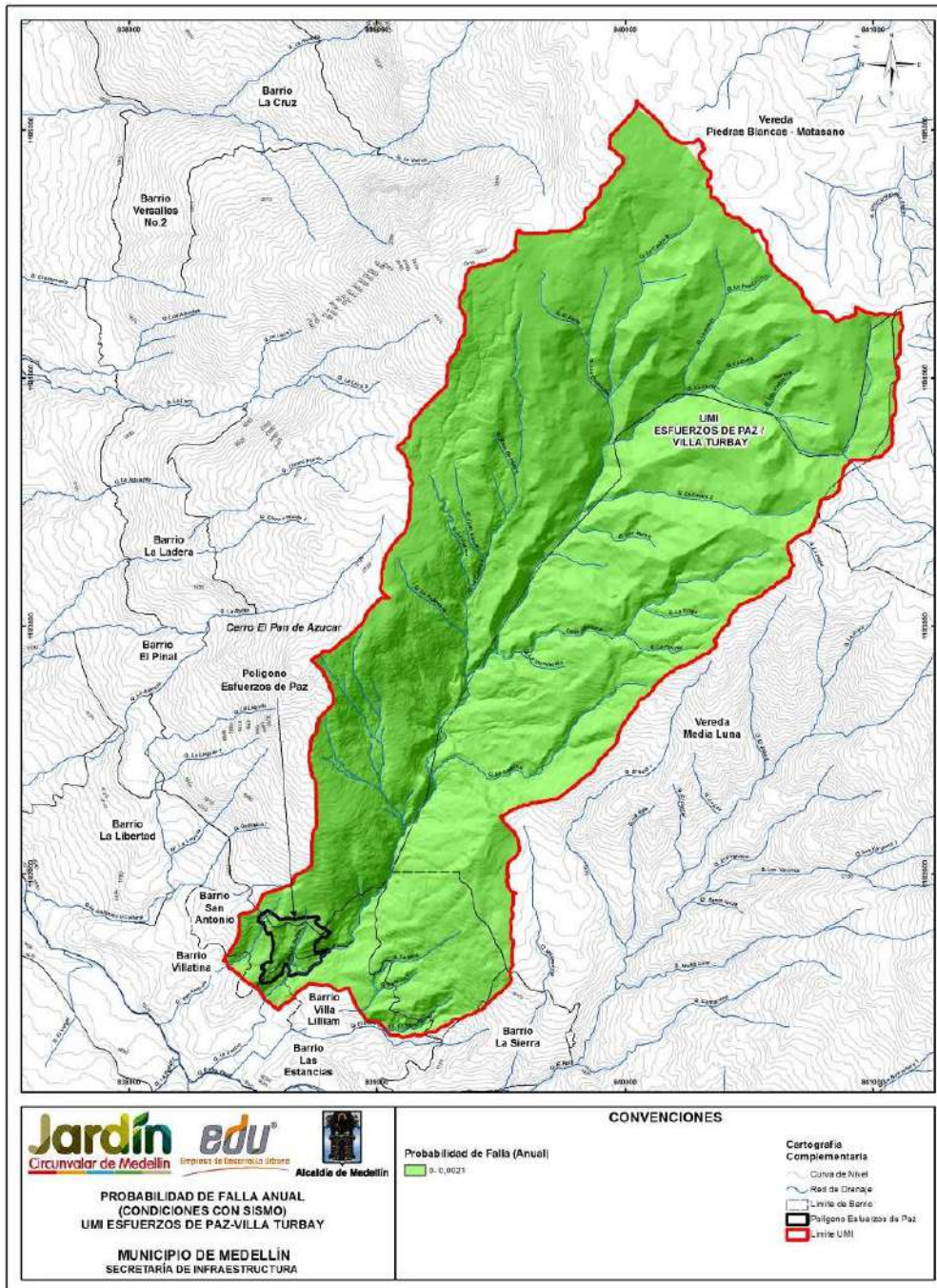
Mapa 35. Análisis del factor de seguridad de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones seudoestáticas con sismo de 0.25g (EDPFactorSeguridadDinamicoUMI_Medellin_C)



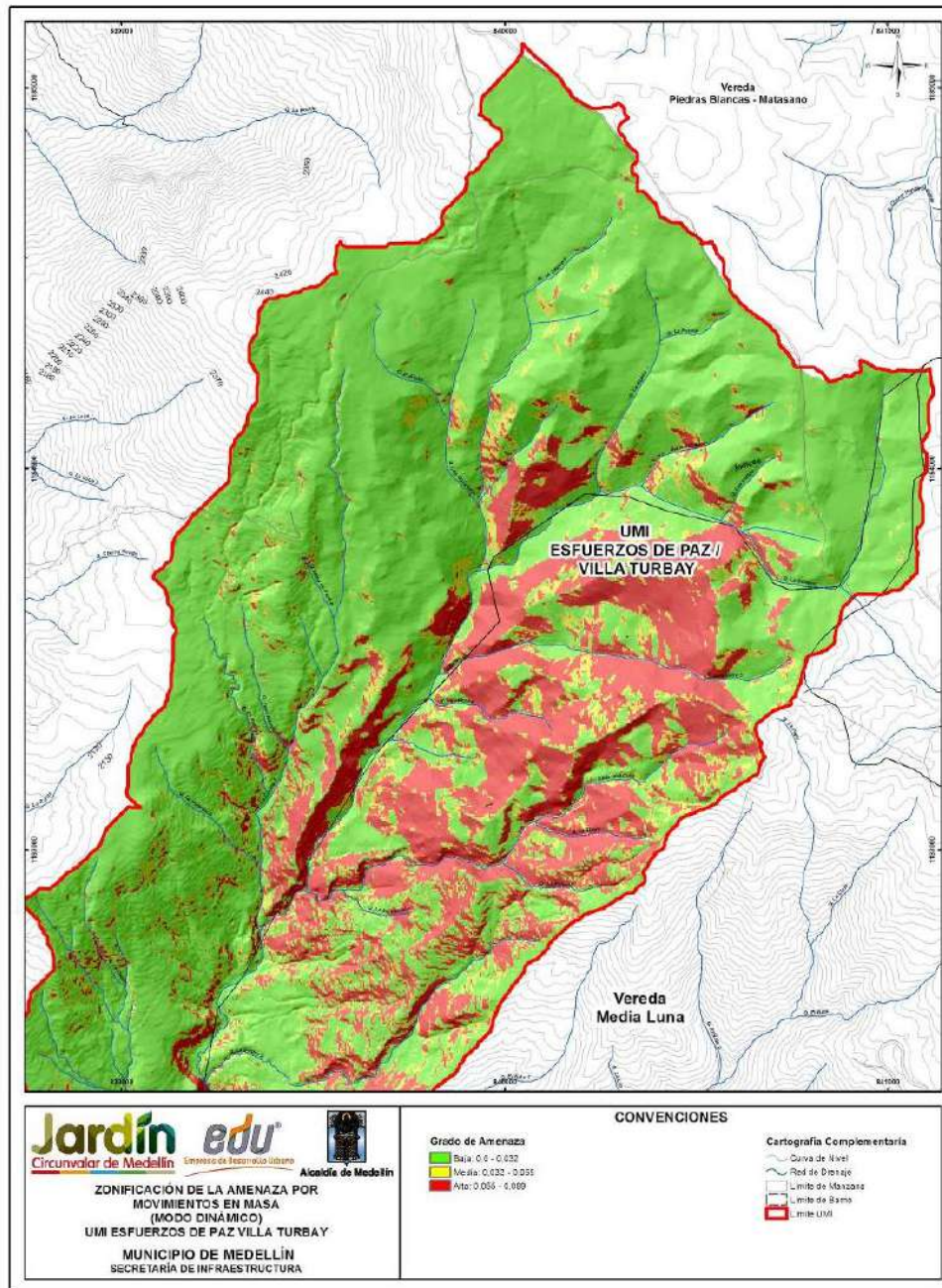
Mapa 36. Probabilidad de falla de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones actuales y naturales
(EDPProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI_Medellin_C



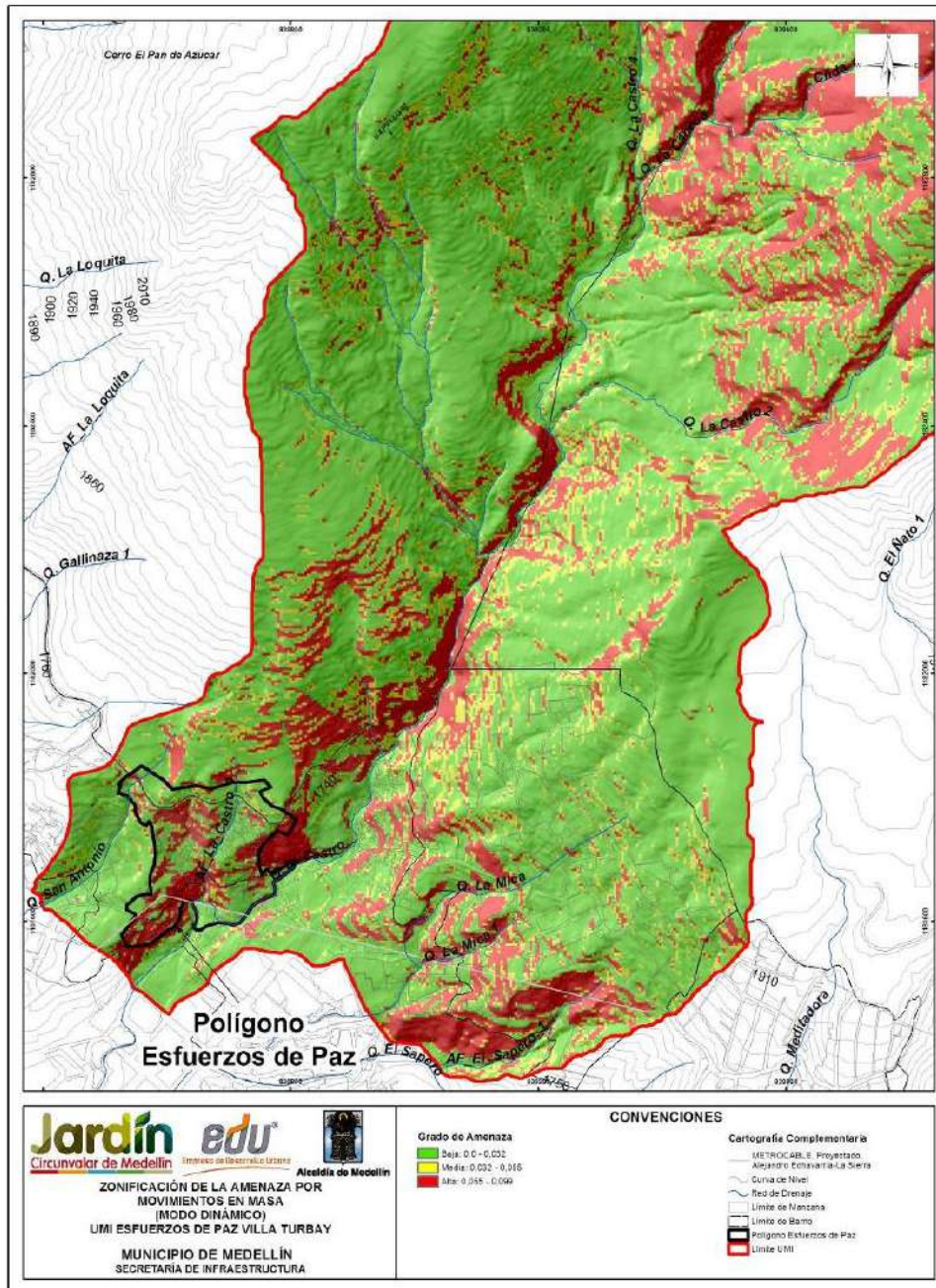
Mapa 37. Probabilidad de falla de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones seudoestáticas con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (EDPProbabilidadFallaTotalUMI_Medellin_C)



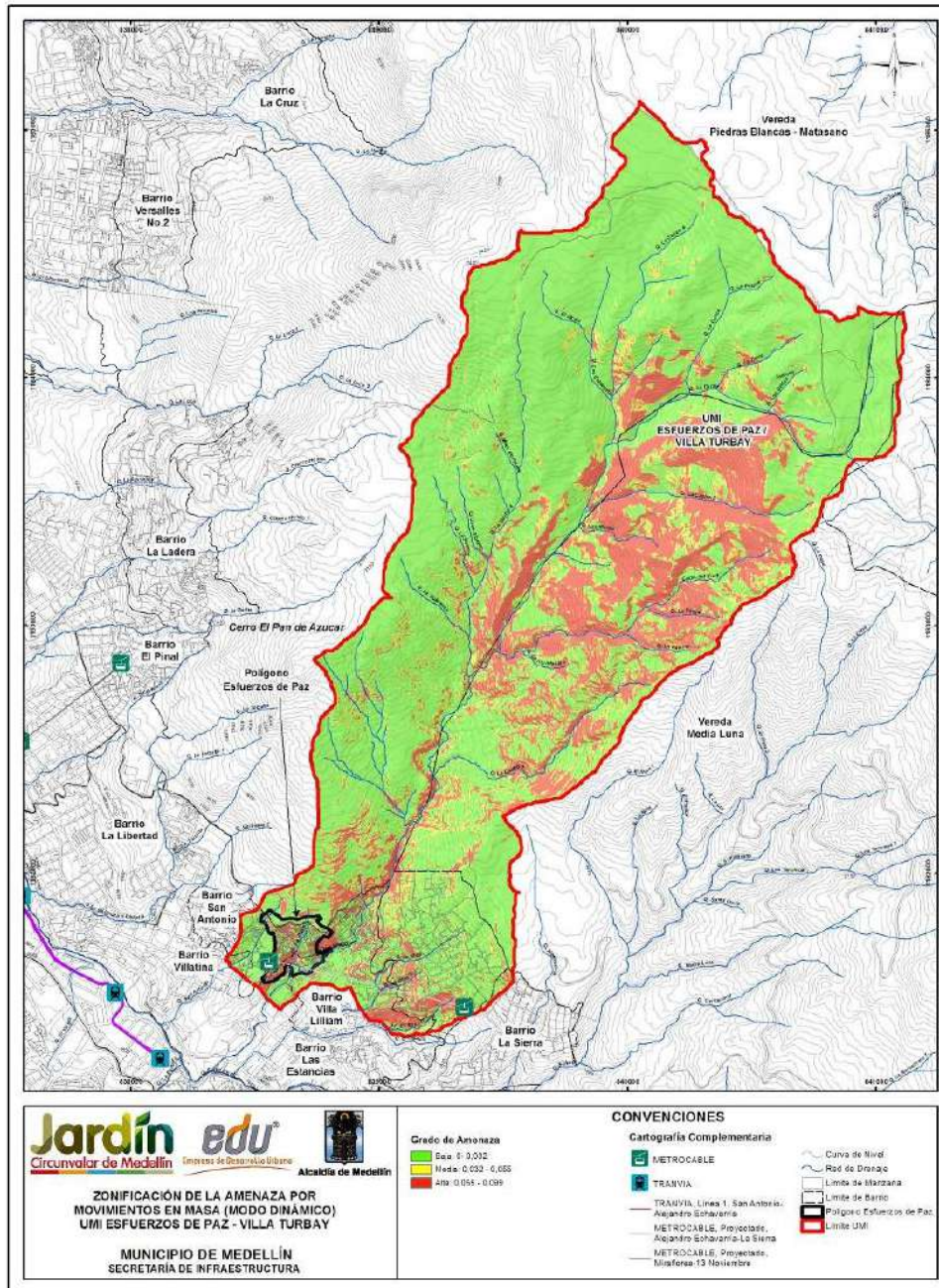
Mapa 38. Probabilidad de falla anualizado de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay en condiciones seudoestáticas con un sismo 0.25g (EDPProbabilidadFallaAnualUMI_Medellin_C)



Mapa 39. Zonificación de la amenaza total de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g
(19_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y
19_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 40. Zonificación de la amenaza del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (Continuación)
(19A_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y 19A_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 41. Zonificación de la amenaza de la UMI Esfuerzos de Paz por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (Continuación)
(19B_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y 19B_EDPAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T)

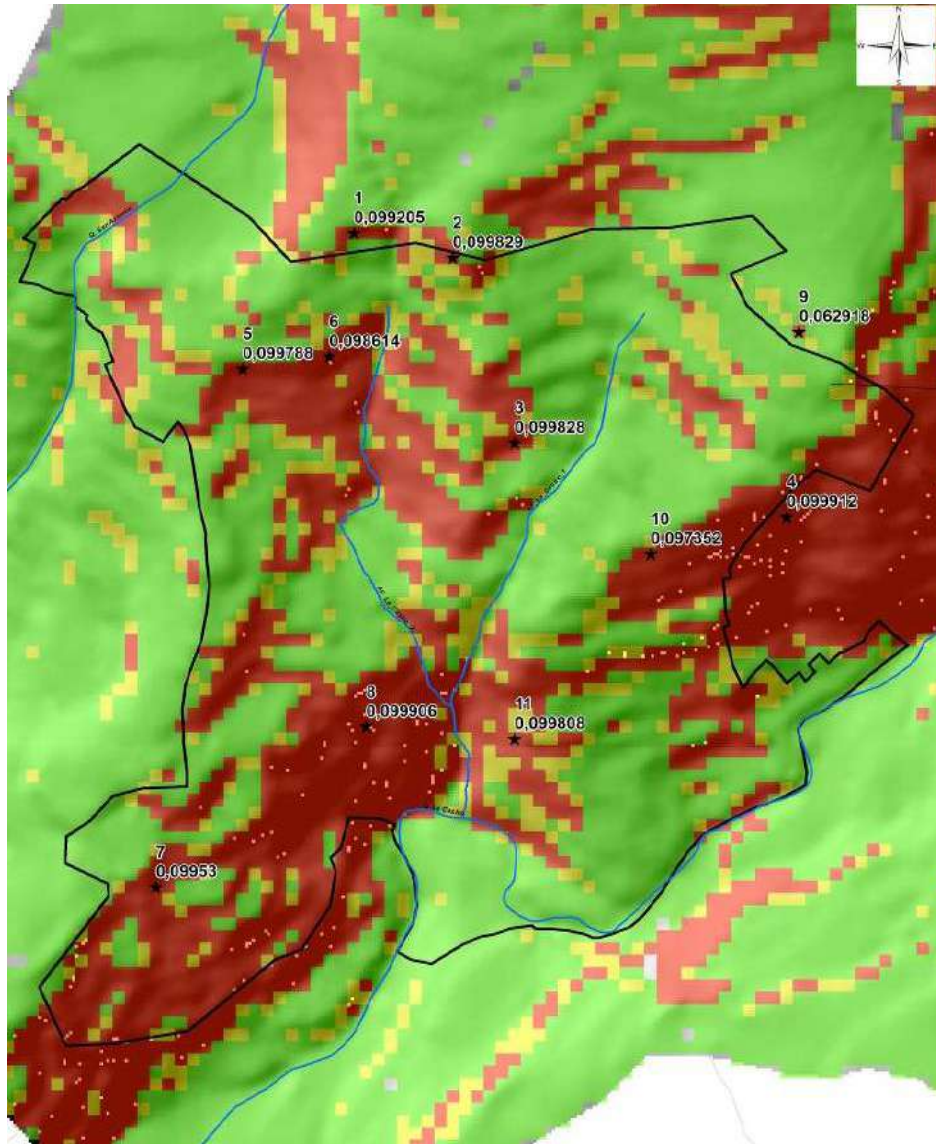


Figura 198. Esquema con localización de los focos de inestabilidad que afectan el Polígono Esfuerzos de Paz

Dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa, se tuvo en cuenta el efecto de los procesos de socavación en los cauces que pudieran desestabilizar las laderas adyacentes luego de sufrir una pérdida de pata por dichos procesos. La socavación general en los cauces naturales se estimó a partir de los resultados de la modelación hidráulica para un periodo de retorno de 100 años como se presenta en el Anexo 05. En la Figura 199 se muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó el valor máximo de socavación.

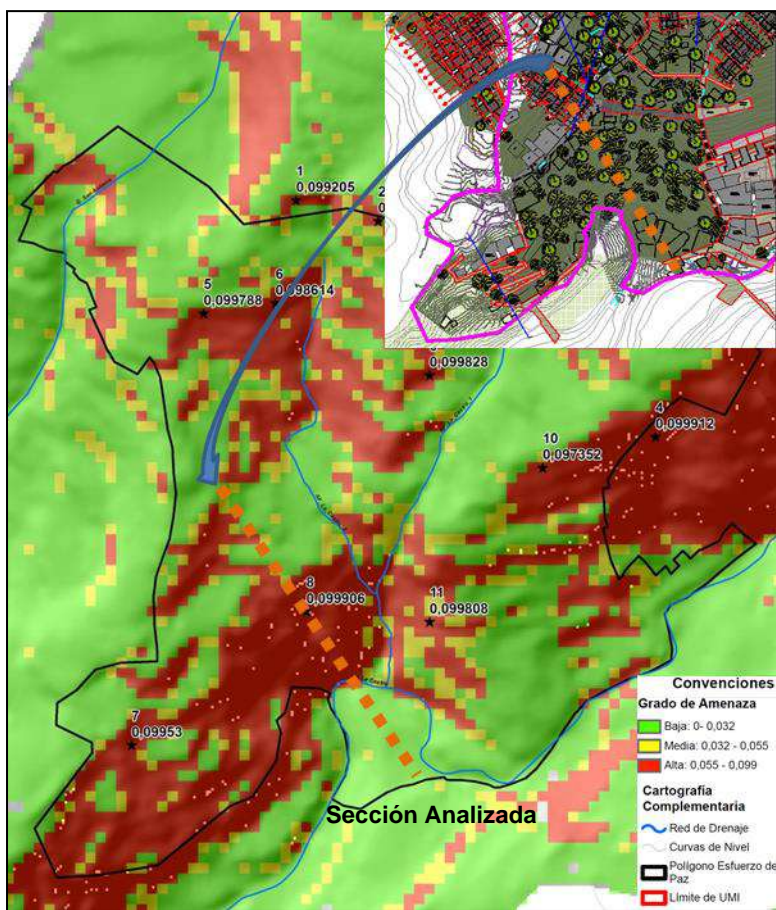


Figura 199. Esquema de localización en planta de la sección analizada

La Figura 200 exhibe los resultados del análisis de estabilidad efectuado para el perfil mencionado, representativo de las condiciones de estabilidad asociado al Foco 8. Fue analizado en condiciones actuales y teniendo en cuenta la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. La Figura 201 presenta los resultados de estabilidad teniendo en cuenta el proceso de socavación y la variabilidad en los parámetros de resistencia al corte y sismo. El valor de probabilidad de falla incluida en ambos casos hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años.

Se observa que incluso en condiciones actuales se tienen superficies de falla con factores de seguridad por debajo del que pudiera considerarse como límite inferior aceptable en caso de sismo y probabilidades de falla en el rango de amenaza alta. Los análisis de estabilidad contemplando la socavación de la que se habló no muestran que realmente haya un cambio drástico en los factores de seguridad, pudiéndose decir incluso que desde el punto de vista numérico se trata de valores iguales de estabilidad.

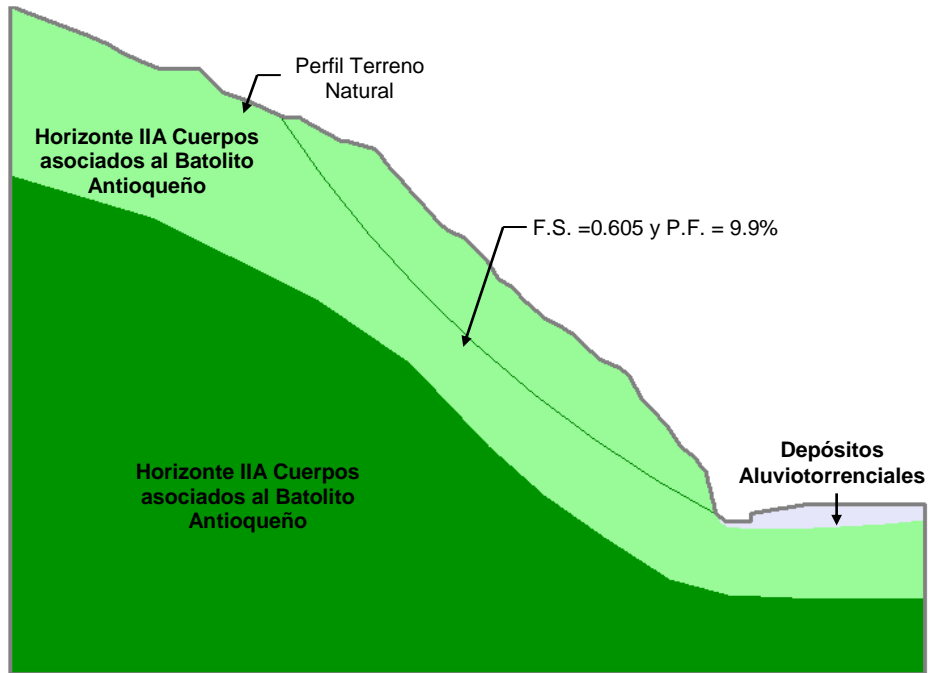


Figura 200. Análisis de estabilidad en condiciones actuales en la Quebrada La Castro

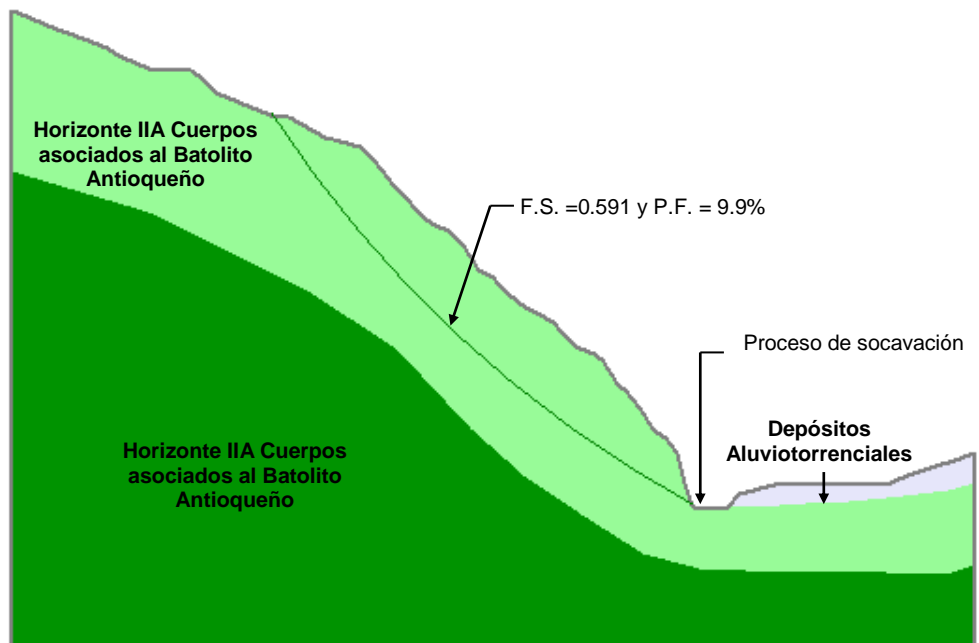






Figura 201. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Castro

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Los resultados obtenidos ratifican entonces los análisis efectuados con la Herramienta SIG (Mapa 41). Se concluye entonces que la socavación no influye en las condiciones de estabilidad de esta zona, siendo entonces esta problemática un tema que realmente se relaciona con la amenaza por deslizamientos. Como se indicó en este mismo numeral al citar el Mapa 41, la inestabilidad potencial se asocia con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas. En los Capítulos 17 a 19 se retoman los temas de amenaza, pero en este numeral, en principio, se anota que se considera adecuada y pertinente la reforestación proyectada en la planta arquitectónica del Proyecto Barrios Sostenibles (Figura 219). Las viviendas que se localizan en la margen izquierda de la Quebrada La Castro sobre depósitos aluvioterrenciales y dentro del polígono de estudio, deberán ser reubicadas como medida de protección porque se encuentran dentro de las zonas de retiro de quebradas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

14. AMENAZA POR INUNDACIONES

14.2 ASPECTOS GENERALES

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (Flórez y Suavita, 1997; INETER y COSUDE, 2005, en AMVA et al., 2010)

Es importante aclarar que dentro del término inundaciones caben dos tipos de fenómenos diferenciados por la velocidad de ascenso de los niveles de agua. El primero corresponde a inundaciones lentas que son características de las zonas asociadas a llanuras aluviales donde la pendiente suave del terreno y los amplios valles permiten un almacenamiento temporal de un importante volumen de agua. El segundo corresponde a inundaciones rápidas donde el nivel del agua asciende rápidamente dado que la geomorfología de terreno facilita altas velocidades de flujo pero no permite almacenamientos importantes. De esta manera, el Polígono Esfuerzos de Paz, cuyo terreno corresponde a una ladera de alta pendiente, es susceptible únicamente a inundaciones de tipo rápidas que traen consigo una alta energía del flujo por las altas velocidades de flujo y normalmente bajas profundidades de flujo.

En el análisis de la amenaza por inundación se incluyeron los fenómenos de inundación generados por desbordamientos e incapacidad de los principales cauces naturales y por incapacidad de aquellos naturales que se han convertido en artificiales por la construcción de canalizaciones y coberturas (alcantarillas, canales y box culverts) ubicados al interior y a lo largo del cauce en el tramo de influencia.

14.3 METODOLOGÍA

Luego de haberse obtenido mediante el modelo hidráulico la magnitud de las variables hidráulicas como la velocidad y la profundidad de flujo, se procedió a calificar el grado de amenaza por inundaciones.

La asignación de la amenaza por inundaciones se realizó a partir de la combinación de la intensidad del fenómeno y de su probabilidad de ocurrencia de acuerdo con metodologías suizas y austriacas para evaluar la amenaza en general, por ejemplo, Ofee et al. (1997) y Fiebigler (1997) en López y Courtel (2006) y en FLO-2D (2012). La intensidad del fenómeno está dada por los valores de la profundidad y la velocidad de flujo, mientras que la probabilidad de ocurrencia está directamente relacionada con el periodo de retorno de la creciente.

La categorización de la intensidad se realizó empleando la clasificación recomendada por la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Mi Rio (2003) para los diferentes tipos de daños posibles según diferentes combinaciones de velocidades y profundidades de

flujo (Figura 202). Se consideraron tres categorías de intensidad, alta, media y baja. Las zonas donde ocurran flujos con potencialidad de generar daños graves o pérdidas de vidas se asociaron a una intensidad alta. Por su parte, los flujos con potencialidad de generar daños moderados se consideraron de intensidad media. Finalmente, la intensidad baja fue asociada a aquellos flujos que presentan una combinación de profundidad y velocidad tal que tienen únicamente potencialidad de generar molestias.

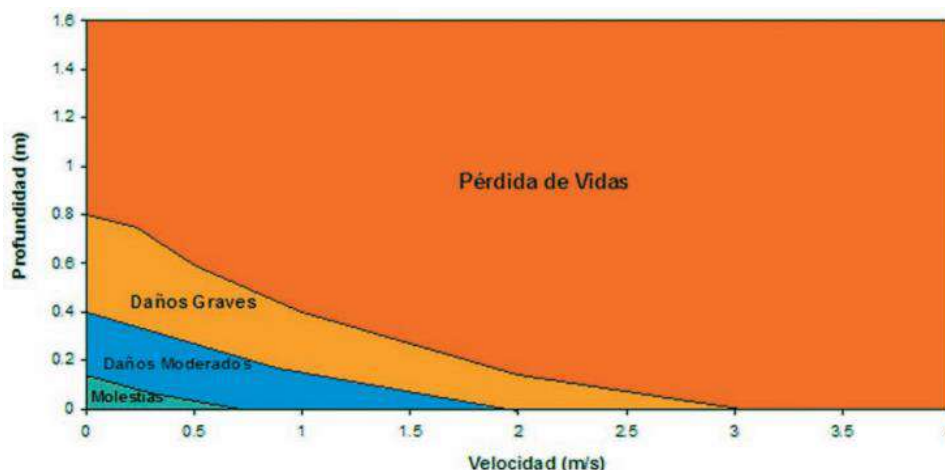


Figura 202. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)

Por su parte, para la probabilidad también se consideraron tres categorías, alta, media y baja. A los eventos generados por crecientes cuya probabilidad anual de excedencia es inferior al 2%, es decir aquellos asociados a periodos de retorno superiores a 50 años, se les asignó una calificación de probabilidad baja. Se calificaron con probabilidad media a aquellos eventos asociados a una probabilidad anual de excedencia entre el 2% y el 10%, es decir, con periodos de retorno superiores a 10 años e inferiores o iguales a 50 años. Finalmente, los eventos con una probabilidad anual de excedencia igual o superior al 10% se consideraron con una probabilidad alta, es decir a aquellos asociados a periodos de retorno de 10 años o menos. En la Tabla 59 y en la Tabla 60 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

Tabla 59. Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones

Calificación de la Probabilidad	Periodo de retorno (Años)	Probabilidad de Excedencia (%)
Alta	TR \leq 10	10% \leq P
Media	10 < TR \leq 50	2% \leq P < 10%
Baja	50 < TR	P < 2%

Tabla 60. Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones

Calificación de la Intensidad	Tipo Potencial de Daños
Alta	Daños graves y pérdida de vidas
Media	Daños moderados
Baja	Molestias

Finalmente, la calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad. Aquellos eventos que presentan una intensidad alta fueron calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Los eventos con probabilidad media e intensidad media se calificaron con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 203 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad.

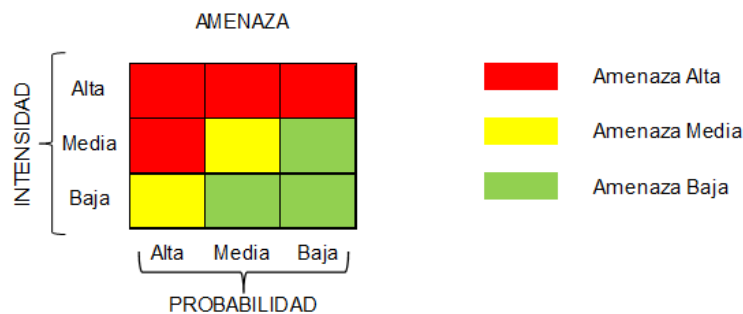




Figura 203. Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al. (1997 y Fiebigler (1997) en López y Courtel 2006)

Es importante anotar que esta metodología es más general que la recomendada en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, la cual indica que para la zona de cauces de montaña la totalidad del área cubierta por un caudal con un periodo de retorno de 100 años se considera zona de amenaza alta. La justificación de esto radica en que en este tipo de corrientes se presentan casi siempre velocidades altas de flujo que implican una alta energía y capacidad destructiva. Sin embargo, se considera que la metodología adoptada en este estudio permite obtener un mejor detalle en la zonificación de la amenaza dado que considera aquellas situaciones o zonas donde se presenten velocidades y profundidades asociadas a una intensidad media o baja a pesar de ocurrir en un evento de 100 años periodo de retorno. Finalmente, se comprobó que los resultados de la zonificación de la amenaza en las corrientes de este estudio son coherentes con lo planteado por el POMCA, lo cual sirve como validación a la metodología adoptada.

Dado el pequeño tamaño de las celdas que componen la malla del modelo hidráulico en relación con el tamaño de las viviendas, es posible que las edificaciones que están en contacto parcial o total con las manchas de inundación tengan en su perímetro de

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

contacto con el flujo diversas asignaciones de la amenaza. En estos casos se asignó a toda la zona cubierta con la edificación la mayor amenaza entre todas las amenazas de todas las celdas adyacentes a ella.

Con la misma idea se clasificaron las vías de acceso, las cuales corresponden a vías vehiculares y andenes, y los equipamientos como colegios, hospitales, parques, iglesias, etc. Para el caso de las vías se clasificó el grado de amenaza en los tramos de vías o andenes que estén dentro de la Amenaza por Inundación y para el caso de los Equipamientos se clasificó según el mayor grado de amenaza existente al interior del equipamiento o aledaño a él.

14.4 RESULTADOS

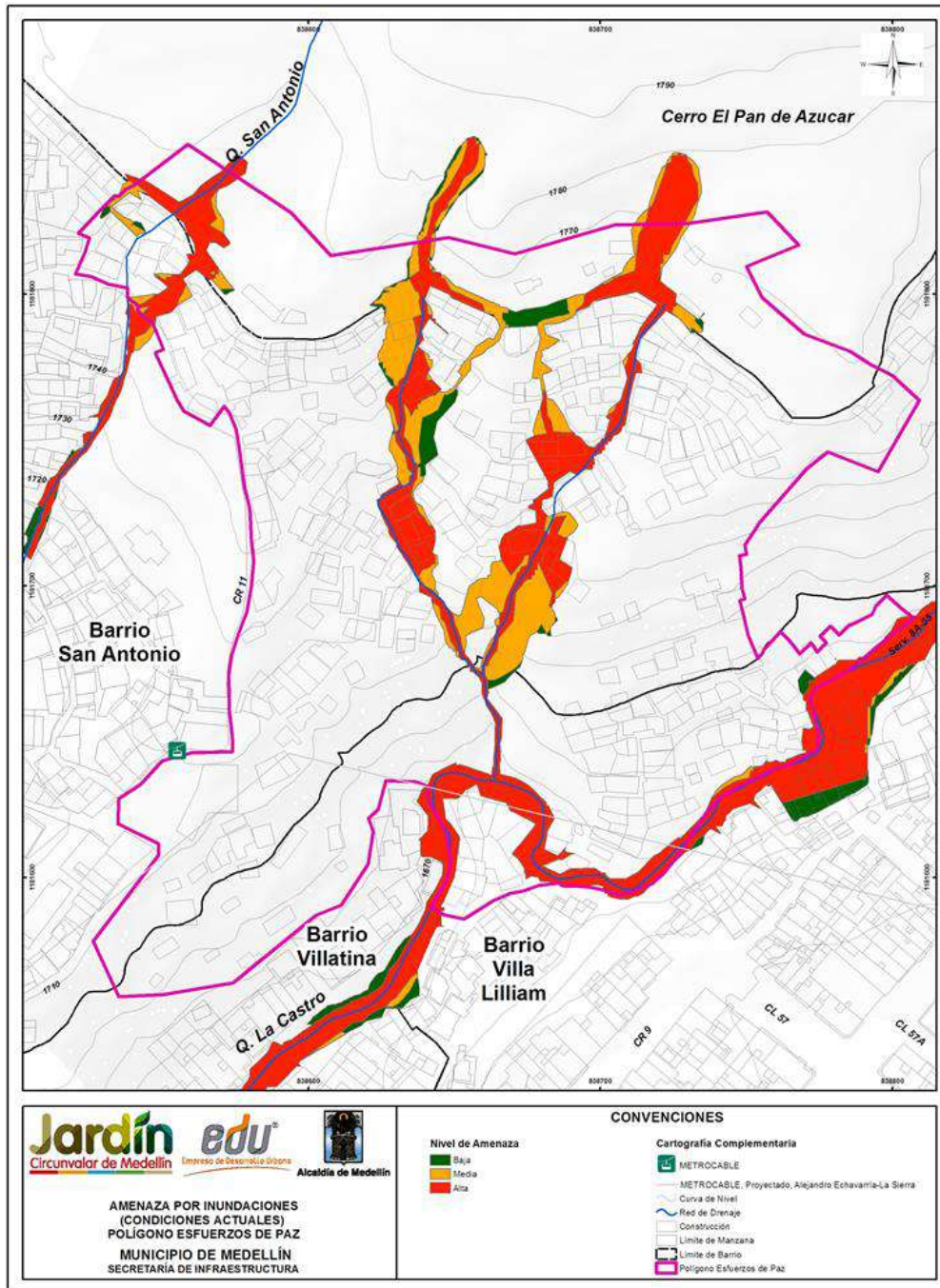
La evaluación de la amenaza por inundaciones generadas en condiciones actuales por las Quebradas La Castro y los Afluentes de la Castro 1 y 2, principales drenajes del Polígono Esfuerzos de Paz, arrojó resultados que indican que la zona que corresponde al cauce principal de estas quebradas presenta una amenaza alta, dado que la intensidad (velocidad y/o profundidad) y frecuencia de los flujos de aguas que por allí transitan presentan valores altos.

Para la Quebrada La Castro, la mayor parte de las viviendas e infraestructura que se encuentran en las inmediaciones de sus márgenes, están expuestas a una alta amenaza por eventos de inundaciones, y en un porcentaje más bajo se clasifica en baja y media.

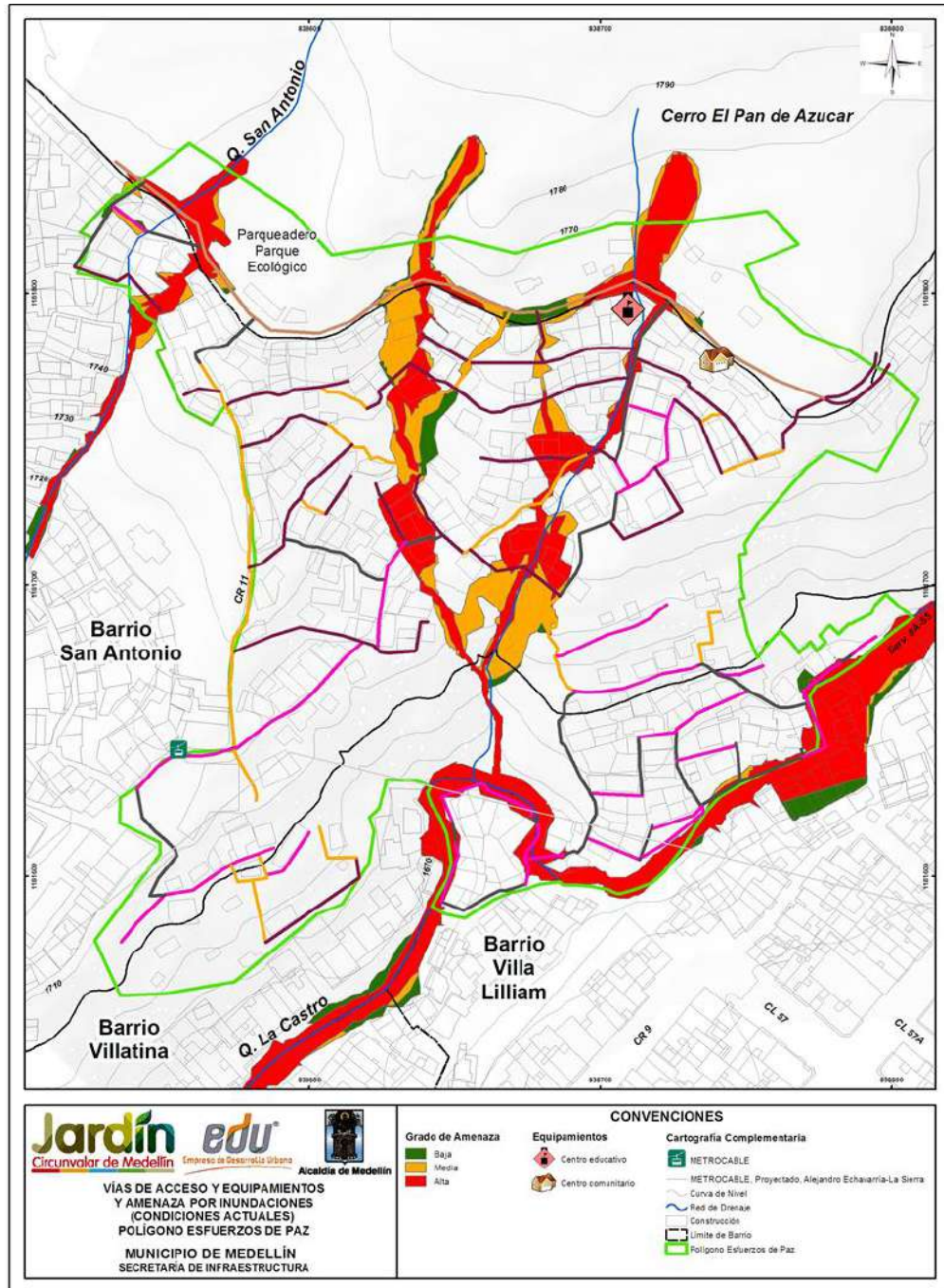
Para la Quebrada San Antonio, y los drenajes Afluente la Castro 1 y 2, se evidencia que la mayor parte de las viviendas aledañas se encuentran en amenaza alta por eventos de inundaciones y algunas pocas están clasificadas como amenaza baja y media, estas condiciones se deben a que no existe un cauce definido que pueda llevar de manera controlada el flujo propagándose por diferentes zonas en el polígono, poniendo en amenaza la mayoría de las viviendas. Esta situación se presenta para todos los periodos de retorno.

En el Mapa 42 se presentan los resultados de la amenaza por inundaciones para las Quebradas La Castro y los Afluentes de la Castro 1 y 2 en el Polígono Esfuerzos de Paz.



En el Mapa 43 se presenta el grado de amenaza para inundaciones, en el que se clasificaron los tramos de vías o andenes y la amenaza para infraestructura especial o equipamientos.



Mapa 42. Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en quebradas La Castro y Afluentes La Castro 1 y 2 del Polígono Esfuerzos de Paz. (25_EDPAmenazasinundaciones_Medellin_C y 25_EDPAmenazasinundaciones_Medellin_T)



Mapa 43. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundación. Condiciones actuales (EDPAmenazaInundacionAccesosEquipamiento_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

15. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

15.1 ASPECTOS GENERALES

Las avenidas torrenciales que son analizadas como parte de este estudio corresponden a los flujos de una mezcla de agua y sedimento en altas concentraciones a través de los principales cauces que tienen influencia sobre el polígono de estudio. Este tipo de fenómenos pueden tener tres orígenes diferentes según Takahashi (2007): el primero, por remoción y transporte del material del lecho de los cauces durante una creciente, el segundo por deslizamientos que aportan material a los cauces el cual es finalmente arrastrado por una creciente, y el tercero por la falla de una presa. Los fenómenos de avenidas torrenciales a considerar en el presente estudio corresponden a aquellos cuyo origen está relacionado con la combinación de eventos de deslizamiento en las laderas de la cuenca que depositan material en el cauce y eventos de crecientes máximas en los cauces. Así mismo se analizó la posibilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales con origen en la remoción y transporte del material del lecho (segundo tipo de origen), pero se descartaron las avenidas torrenciales con origen en la falla de una presa (tercer tipo de origen) dada la inexistencia de estas estructuras en el polígono en estudio.

Así las cosas, la información básica para el estudio de las avenidas torrenciales corresponde a la misma empleada para el estudio de las inundaciones, en adición a los resultados del estudio de los movimientos en masa, en especial la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos y la caracterización de los fenómenos de inestabilidad, así como las características de los materiales que conforman el lecho de los cauces.



15.2 AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA

Del análisis de la amenaza por movimientos en masa en el polígono de estudio se dedujo que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos que podrían alcanzar los cauces que ejercen influencia en el polígono presenta un valor del 10% en el periodo de análisis de 50 años.

Por su parte, la probabilidad de ocurrencia de las crecientes analizadas en el escenario de amenaza por inundación tienen valores que oscilan entre el 100% para las crecientes de 2.33 años de periodo de retorno hasta el 39.5% para las crecientes de 100 años de periodo de retorno, considerando también un periodo de análisis de 50 años.

De acuerdo con los resultados del análisis de movimiento en masa (Apartado 13.1), ambos eventos pueden considerarse estadísticamente independientes. Por tanto, la probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos eventos formadores de la avenida torrencial oscila entre 4% y 10% en el periodo de 50 años.

Los caudales máximos esperados para la Quebrada La Castro, superiores a 20 m³/s para diferentes periodos de retorno, presentarían una importante capacidad de arrastre de los sedimentos que se depositarían en los cauces en caso de ocurrir fenómenos de movimiento en masa.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Por otro lado, durante las actividades de exploración geológica se detectaron depósitos de material de origen aluviotorrencial a lo largo del cauce de la Quebrada La Castro. Estos aspectos, en conjunto con lo reportado en Desinventar, indican que la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de Avenidas Torrenciales no es despreciable para el polígono de estudio.

15.3 AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL LECHO

En este apartado se hace un análisis de la posible ocurrencia de avenidas torrenciales cuyo origen está en la remoción y transporte del material del lecho. Este tipo de fenómeno se presenta cuando, a lo largo de una importante longitud del cauce, el flujo genera un esfuerzo cortante sobre el lecho tal que supera el esfuerzo resistente del material que la compone y remueve la suficiente cantidad de material para convertir la creciente en una avenida de tipo torrencial. Este análisis se realiza para los cauces naturales de las quebradas Afluente La Castro 1 y el Afluente La Castro 2, exceptuando a la quebrada La Castro debido a que ya se concluyó en el numeral anterior que sí es factible que en ella se presenten fenómenos de torrencialidad. Respecto a la quebrada San Antonio, se descarta este tipo de procesos dado que la longitud de cauce que se encuentra en estado natural es del orden de 20 m, lo que indica que existe poco material en ella susceptible de ser removido.

De acuerdo con Takahashi (2007), el esfuerzo resistente del material del lecho tiene dos componentes: una componente friccionante y una componente cohesiva, tal como se observa en la siguiente ecuación.

$$\tau_r = g \cos \theta [C_* (\sigma - \rho) a] \Gamma \tan \phi + c$$

Donde:

- ✓ τ_r es el esfuerzo resistente
- ✓ g es la gravedad
- ✓ C_* es la concentración de equilibrio de partículas gruesas
- ✓ σ es la densidad de partículas
- ✓ ρ es la densidad del fluido
- ✓ a es la distancia medida desde la superficie de la capa de sedimento
- ✓ ϕ es el ángulo de fricción del material
- ✓ c es la cohesión del material

Dado que el objetivo de este análisis es verificar si se da el inicio del proceso de remoción del lecho, el cual ocurriría a nivel superficial, en la anterior expresión se toma la variable “a” con un valor nulo ($a=0$) y se calcula por tanto el esfuerzo resistivo únicamente

considerando la componente cohesiva, sin que los demás parámetros afecten su magnitud (C, σ, ρ, ϕ).

Por otro lado el esfuerzo que genera el flujo sobre el fondo del cauce en cada sección estudiada se encuentra dado por la siguiente expresión (Sotelo, 2002):

$$\tau = \gamma R_H \text{Sen} \theta$$

Donde:

- ✓ τ es el esfuerzo que genera el flujo.
- ✓ R_H es el radio hidráulico de la sección.
- ✓ γ es el peso específico del agua.
- ✓ θ es el ángulo de inclinación del fondo del cauce.

Con base en lo anterior se realizó un análisis comparativo entre el esfuerzo que genera el flujo sobre el lecho de los cauces y el esfuerzo resistivo de los materiales que componen el lecho, basado únicamente en el componente cohesivo de la resistencia por tratarse del análisis en superficie que es donde se iniciaría el fenómeno.

Para estimar el esfuerzo resistivo se emplearon los resultados del estudio de geología local y los resultados de la exploración y caracterización geológico-geotécnica de los materiales que actualmente conforman el cauce, en especial los parámetros de resistencia al corte, los cuales se resumen en la Tabla 61 para el cauce de la Quebrada Afluyente La Castro 1 y para el cauce de la Quebrada Afluyente La Castro 2.

En la Tabla 61 puede observarse que los materiales de las corrientes estudiadas tienen cohesiones que varían entre 13.1 kPa y 24.2 kPa correspondiendo el primero a llenos antrópicos y el segundo a las Dunitas de Medellín (JKuM).

Tabla 61. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Esfuerzos de Paz

ESFUERZOS DE PAZ	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m ³)
Afluyente La Castro 1			
Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	29.00	19.00	17.50
Depositos de flujo de lodos y escombros	24.13	22.79	17.43
Dunitas de Medellin (JKuM)	26.50	24.20	16.71
Afluyente La Castro 2			
Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	29.00	19.00	17.50
Lleno Antropico	26.90	13.05	17.43
Dunitas de Medellin (JKuM)	26.50	24.20	16.71

El esfuerzo ejercido por el flujo sobre el lecho en cada sección a lo largo de las quebradas Afluyente La Castro 1 y Afluyente La Castro 2 se presenta en la Figura 204 y en la Figura 205. En esta figura también se ha ubicado la menor cohesión existente de los materiales presentes en el cauce. De manera comparativa puede observarse que en la

totalidad del cauce analizado, el esfuerzo cortante que se transmite al lecho es inferior al valor de la cohesión de los materiales, es decir, inferior al esfuerzo resistivo.

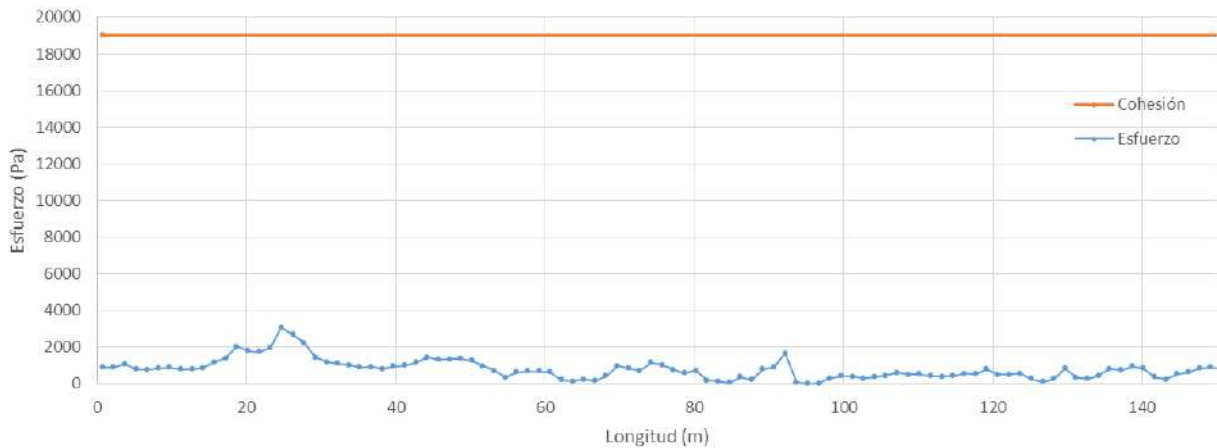


Figura 204. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada Af. La Castro 1

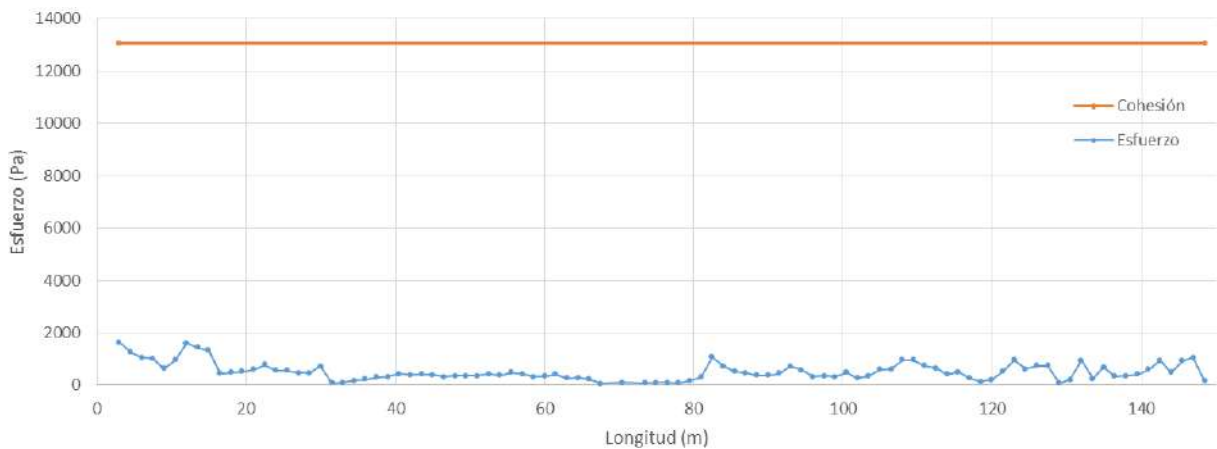




Figura 205. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes lo largo de la Quebrada Af. La Castro 2

El análisis realizado permite por tanto concluir que no es factible la ocurrencia de la remoción de un volumen de material suficiente para ocasionar una avenida torrencial en las quebradas Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2 en el polígono de estudio.

15.4 METODOLOGÍA

La metodología para el análisis de las avenidas torrenciales comparte gran parte de los procedimientos del estudio del fenómeno de las inundaciones: modelo de elevación digital, direcciones de drenaje, delimitación y caracterización de cuencas y estimación de caudales, que en este tipo de análisis se denominan caudales líquidos. De manera

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

adicional, se toman los resultados del estudio del fenómeno de movimiento en masa, incorporando los sedimentos que se convierten en caudales sólidos dentro de la mezcla que conforma un fluido que puede presentar propiedades y comportamiento diferente en comparación con el flujo de aguas claras. Este tipo de flujos normalmente presentan un mayor peso específico y una mayor viscosidad que el agua clara, y pueden comportarse como fluidos no newtonianos cuando la concentración volumétrica de sedimentos supera un umbral cercano al 20%.

El Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 hace referencia al Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para establecer la metodología de análisis de los cauces con características torrenciales. El POMCA indica que “si la corriente presenta características tales que la hacen susceptible a flujos torrenciales, el retiro hidrológico se calculara a partir de un incremento del 40 % en el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años. Este incremento sería un factor de seguridad en el caso de caídas de material de arrastre en el cauce, como es el típico de las corrientes con flujos torrenciales.” El Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 indica que “de acuerdo con lo establecido en el Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para cauces con características torrenciales, los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 100 años, deben ser mayorados en un 40%.”

Sin embargo, tanto el POMCA como el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012, no son explícitos en el tipo de modelo a emplear para analizar este tipo de fenómenos, y es común en el medio el empleo de modelos de aguas claras a pesar de las diferencias en el comportamiento hidráulico entre los dos fenómenos (inundaciones y avenidas torrenciales).

En relación con el tipo de modelo, en este estudio se considera importante emplear un modelo que represente con mayor precisión el comportamiento de la mezcla agua-sedimentos. Existen en la actualidad diversas aproximaciones para modelar los flujos con altas concentraciones de sedimentos. Entre ellas se resaltan las siguientes tres: la primera consiste en la aplicación de las ecuaciones tradicionales de capacidad de carga y transporte de sedimentos, la segunda que tiene en cuenta los fenómenos de difusión y convección de los sedimentos y la tercera que aplica la conservación tanto en el volumen como en la concentración de los sedimentos. La primera aproximación se considera no viable puesto que en los flujos hiperconcentrados se inhibe o anula la velocidad de caída de las partículas debido a la viscosidad del fluido y al contacto entre partículas. La segunda aproximación es de mayor complejidad y busca predecir la depositación de sedimentos según fracción de tamaño. La tercera es más práctica y su objetivo es balancear el volumen potencial de sedimentos con el volumen de agua para un flujo de diseño (O'Brien, 2010).

En este estudio, la modelación de los flujos hiperconcentrados que ocurren durante avenidas torrenciales se realiza a través del Modelo FLO-2D, el cual aplica la conservación tanto en el volumen como en la concentración de los sedimentos (tercera aproximación descrita). Es un modelo en el cual las propiedades del fluido controlan el flujo y en el que se trata al fluido como un continuo. Su limitación consiste en que no

permite el intercambio de sedimento con el lecho pero su gran ventaja es que permite predecir el área de inundación y afectación para la condición más desfavorable (O'Brien, 2010). El modelo emplea entonces la siguiente ecuación para estimar la concentración volumétrica:

$$C_v = \frac{\text{Volumen de sedimento}}{\text{Vol. de Sed. + Vol. de Agua}} = \frac{\text{Volumen de sedimento}}{\text{Volumen de la Mezcla}}$$

A partir de esta expresión, la concentración volumétrica que debe emplearse es de 0,3 para obtener el incremento del caudal recomendado por el AMVA (2012), del 40% respecto al caudal de aguas claras, para considerar el efecto de torrencialidad.

El peso específico de la mezcla se calcula a partir de la siguiente expresión, donde γ es el peso específico del agua, C_v es la concentración volumétrica y γ_s es el peso específico de los sedimentos.

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma)$$

El factor de hinchamiento, o *BF* por sus siglas en inglés (Bulking factor) refleja el incremento en el volumen por efecto de la concentración de sedimentos, el cual se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$BF = \frac{1}{(1 - C_v)}$$

Este procedimiento se realiza sobre los cauces más importantes que tienen influencia en el polígono de estudio, en el tramo comprendido al interior del polígono.

Al igual que para inundaciones, la asignación de la amenaza por avenidas torrenciales se realiza a partir de la combinación de la intensidad del fenómeno y de su probabilidad de ocurrencia de acuerdo con metodologías suizas y austriacas para evaluar la amenaza en general, por ejemplo, Ofee et al (1997) y Fiebiger (1997) en Lopez y Courtel, (2006) y en FLO-2D (2012). La intensidad del fenómeno está dada por los valores de la profundidad y la velocidad del flujo en las avenidas torrenciales, mientras que la probabilidad de ocurrencia es inversamente proporcional al periodo de retorno del evento.

La categorización de la intensidad se realiza empleando la clasificación recomendada en Fiebiger (1997), OFEE (1997) y O'Brian (2010) donde la máxima profundidad y el producto de la máxima profundidad con la máxima velocidad son los factores que determinan el grado de intensidad del fenómeno, según la **Tabla 62**.

Tabla 62. Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales

Calificación de la Intensidad	Profundidad Máxima (m)	OP	Producto de profundidad Máxima y Velocidad Máxima (m ² /s)
Alta	$h > 1.0 \text{ m}$	ó	$vh > 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0.2 \text{ m} < h < 1.0$	y	$0.2 < vh < 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0.2 \text{ m} < h < 1.0$	y	$vh < 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$

Por su parte, para la probabilidad también se consideran tres categorías, alta, media y baja. A los eventos generados por crecientes cuya probabilidad anual de excedencia es inferior al 2%, es decir aquellos asociados a periodos de retorno superiores a 50 años, se les asigna una calificación de probabilidad baja. Por su parte, se califican con probabilidad media a aquellos eventos asociados a una probabilidad anual de excedencia entre el 2% y el 10%, es decir, con periodos de retorno superiores a 10 años e inferiores o iguales a 50 años. Finalmente, los eventos con una probabilidad anual de excedencia igual o superior al 10% se consideran con una probabilidad alta, es decir a aquellos asociados a periodos de retorno de 10 años o menos.

La calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad según lo recomendado en Fiebigger (1997) y Ofee (1997). Aquellos eventos que presentan una intensidad alta son calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Por su parte, los eventos con probabilidad media e intensidad media se califican con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 206 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza para avenidas torrenciales según la probabilidad y la intensidad.

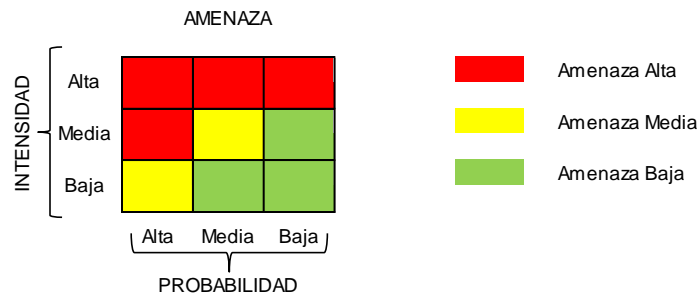




Figura 206. Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno

De igual forma, se clasificaron las diferentes vías de acceso y los edificios especializados o de equipamiento como andenes y vías vehiculares, colegios hospitales, parques, iglesias, etc. Para el caso de las vías se clasificó el grado de amenaza en los tramos que estén dentro de la Amenaza por Inundación y para el caso de los Equipamientos se clasificó según el mayor grado de amenaza existente al interior del equipamiento o aledaño a él.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Con la misma idea se clasificaron las vías de acceso, las cuales corresponden a vías vehiculares y andenes, y los equipamientos como colegios, hospitales, parques, iglesias, etc. Para el caso de las vías se clasificó el grado de amenaza en los tramos de vías o andenes que estén dentro de la Amenaza por Inundación y para el caso de los Equipamientos se clasificó según el mayor grado de amenaza existente al interior del equipamiento o aledaño a él.

15.5 RESULTADOS

15.5.1 Resultados generales

De acuerdo con lo expuesto en los numerales 15.2 y 15.3 se ha aplicado la metodología para la evaluación de las avenidas torrenciales en la quebrada La Castro, única corriente susceptible a transitar o generar avenidas torrenciales dentro del polígono de estudio.

En el Mapa 44, se presenta la mancha de las avenidas torrenciales para los diferentes periodos de retorno evaluados y en el Mapa 45, se presenta la amenaza por este fenómeno, ambas estimadas siguiendo la metodología descrita en el apartado anterior. En el Mapa 46, se presenta el grado de amenaza para avenidas torrenciales, en el que se clasificaron los tramos de vías o andenes, se puede observar que no hay la amenaza para infraestructura especial o equipamientos. Este evento solo ocurre en la Quebrada La Castro.

Puede observarse que, en general, la mancha del fenómeno es de mayor amplitud que la mancha de inundaciones debido al efecto de amplificación generado por la presencia de los sedimentos en altas concentraciones, implicando con ello mayores profundidades de flujo.

En las figuras mencionadas, el polígono en estudio corresponde al delimitado en color negro para cada mapa, y puede observarse que la mancha del fenómeno y por tanto la amenaza por avenidas torrenciales afecta a la mayoría de las viviendas y estructuras en ambos márgenes de la quebrada dada su ubicación cercana al cauce.

En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación de las avenidas torrenciales para los periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. En el Anexo 12 correspondiente a la geodatabase, se presentan los mapas tipo raster de los resultados de la modelación, específicamente la velocidad y la profundidad de flujo.

15.5.2 Resultados en puentes o pasos peatonales sobre la Quebrada La Castro

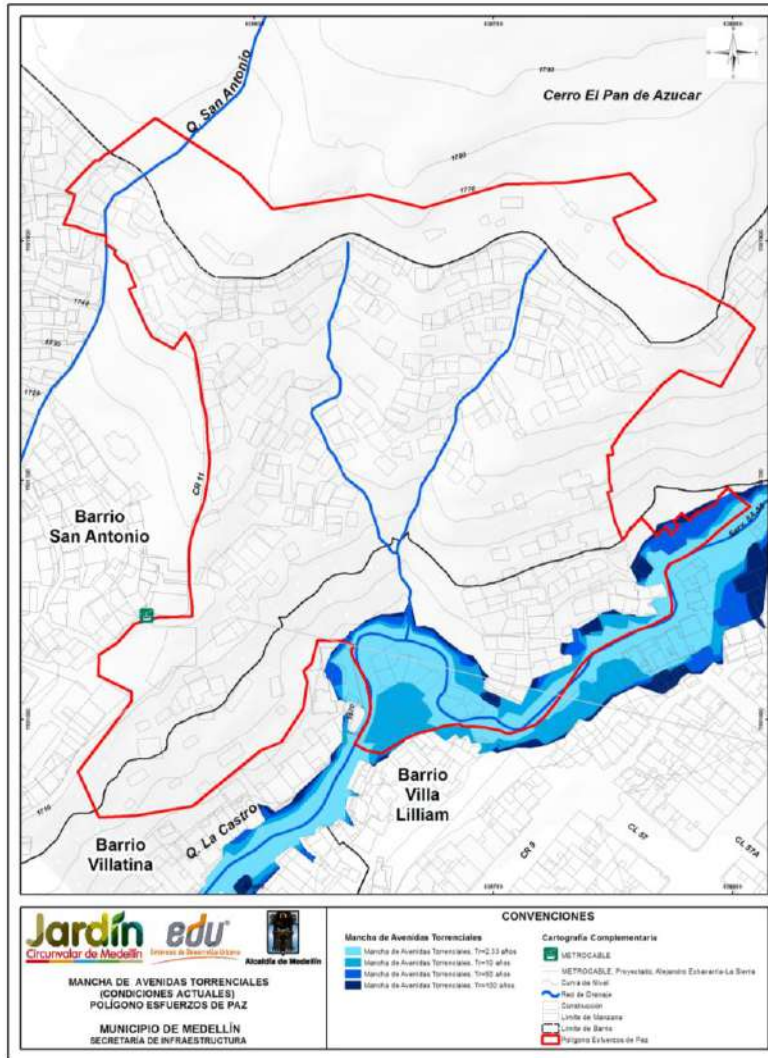
A partir de la modelación hidráulica de las avenidas torrenciales se determinó la cota de la superficie del flujo en cada una de las zonas donde se ubican los puentes o pasos peatonales, de esta manera se determinó que los puentes denominados PTE 1 hasta PTE25 generan un control hidráulico ya que el nivel del agua en estas zonas se encuentra por encima de las cotas inferiores de los tableros para un periodo de retorno de 100 años en condiciones actuales (Tabla 63). En esta tabla, el gálibo indicado como N/A significa que no presenta gálibo disponible dado que el tablero se ubica bajo el nivel del flujo.

Las condiciones mencionadas significan que estas estructuras estarían sumergidas completamente en el flujo de la avenida torrencial, ayudando incluso a intensificar el fenómeno en las zonas inmediatamente aledañas por efectos del control y del incremento en la lámina del flujo. De esta manera, estas estructuras juegan un papel doble en el fenómeno de las avenidas torrenciales, por un lado, se encuentran bajo amenaza por estos fenómenos, y a su vez podrían ayudar a intensificar la problemática dada su geometría, su posición respecto al flujo, su elevación, y su ubicación respecto de viviendas y otras estructuras. Sin embargo, es importante mencionar que dada la gran magnitud del fenómeno en relación con el tamaño de la estructura y del cauce en sí, el efecto de la ampliación o extensión de la mancha del fenómeno podría ser poco apreciable.

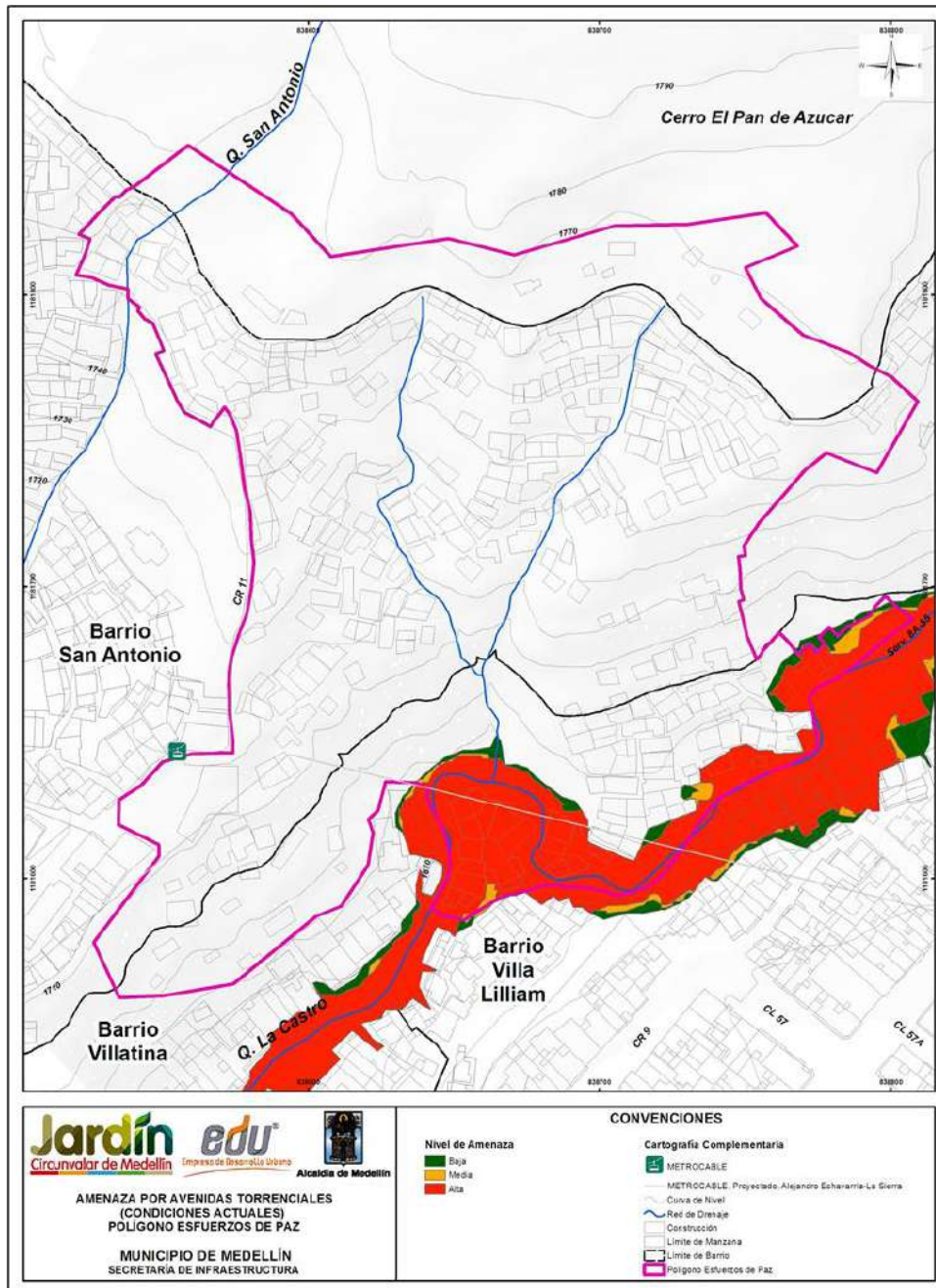
Estas condiciones de amenaza alta para estas estructuras significan a su vez condiciones de riesgo alto, dado que son estructuras que pueden ser fácilmente afectadas por la exposición directa al flujo e impacto de una avenida torrencial.

Tabla 63. Verificación de las condiciones hidráulicas de los puentes o pasos peatonales en la Quebrada La Castro por Avenidas Torrenciales para un $T_r=100$ años. Condiciones Actuales

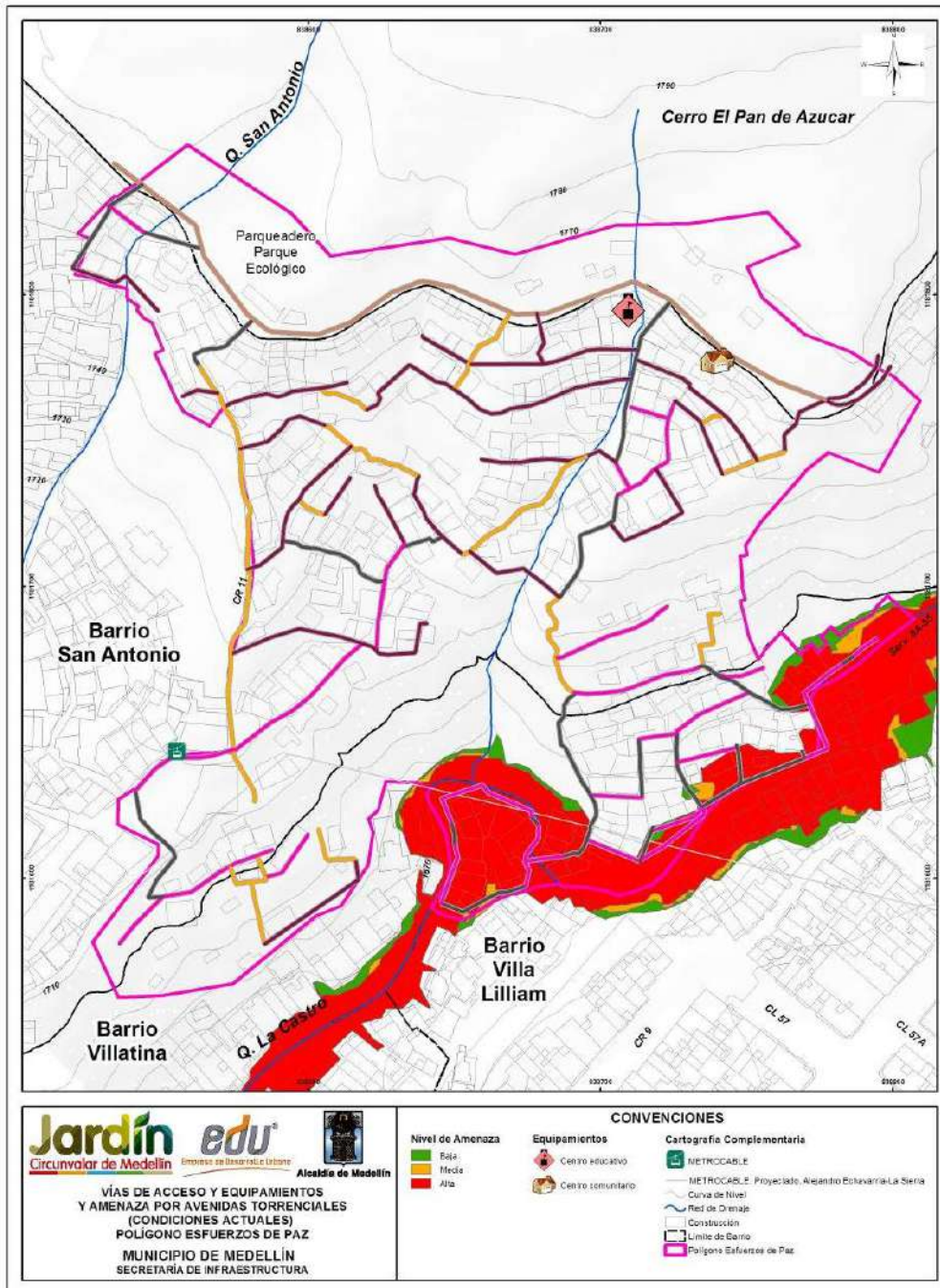
PUENTE	Cota Inferior del tablero (m.s.n.m)	Cota Superficie de Agua (m.s.n.m)	Gálbo Disponible (m)
PTE 1	1686.27	1690.29	N/A
PTE 2	1685.20	1689.00	N/A
PTE 3	1681.61	1685.64	N/A
PTE 4	1680.00	1684.53	N/A
PTE 5	1679.59	1682.96	N/A
PTE 6	1673.43	1680.18	N/A
PTE 7	1668.35	1675.17	N/A
PTE 8	1667.06	1672.45	N/A
PTE 9	1666.90	1671.16	N/A
PTE 10	1666.87	1671.86	N/A
PTE 11	1665.14	1669.96	N/A
PTE 12	1664.32	1668.71	N/A
PTE 13	1663.66	1668.73	N/A
PTE 14	1662.74	1667.4	N/A
PTE 15	1662.43	1666.15	N/A
PTE 16	1661.99	1667.31	N/A
PTE 17	1661.59	1666.94	N/A
PTE 18	1661.30	1666.27	N/A
PTE 19	1661.10	1666.32	N/A
PTE 20	1660.76	1665.53	N/A
PTE 21	1660.44	1664.24	N/A
PTE 22	1660.25	1663.44	N/A
PTE 23	1659.80	1663.05	N/A
PTE 24	1659.32	1661.31	N/A
PTE 25	1659.03	1660.71	N/A





Mapa 44. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3)
(23_EDPManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 23_EDPManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 45. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3)
 (27_EDPAmenazaAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 27_EDPAmenazaAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 46. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales (EDPAmenazaAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_C)



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

15.6 COMPARACIÓN ENTRE AMENAZA POR INUNDACIONES Y POR AVENIDAS TORRENCIALES

Los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales tienen en común al elemento hidrológico como uno de los detonantes del evento, y las amenazas que generan ambos fenómenos están concentradas casi siempre en las zonas aledañas o bajo influencia de los cauces. Para la planificación de la ordenación del territorio se hace entonces necesario seleccionar cuál de los dos eventos o tipos de amenazas debe ser el empleado para esta labor.

Al realizar un análisis comparativo entre las manchas de inundación y las manchas de las avenidas torrenciales de la Quebrada La Castro, presentadas en el Mapa 33 y en el Mapa 44 respectivamente, es posible observar que las manchas de los fenómenos de avenidas torrenciales cubren una mayor extensión que las manchas de inundaciones. Esto implica también, junto con el sistema de clasificación empleado para calificar la amenaza, que ésta última para los eventos de avenidas torrenciales sea más severa en comparación con la amenaza generada por las inundaciones.

Por lo tanto, se concluye que para efectos de planificación del ordenamiento del territorio en el cauce de la Quebrada La Castro es recomendable emplear la zonificación de la amenaza indicada por los eventos de tipo torrencial. En el caso de las quebradas San Antonio, Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2 el tipo de evento que debe considerarse para estos efectos es el correspondiente a Inundaciones dada la ausencia en ellos de amenaza por avenidas torrenciales.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

16. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

16.1 ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL



Según el POT de Medellín 2014, la vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Para entender la vulnerabilidad y los factores que lo controlan, es necesario dividir los elementos expuestos de las características que hacen que ese elemento sea vulnerable. Adicionalmente, debe incluirse en la medición o determinación de la vulnerabilidad, las capacidades de determinada comunidad el resistir a una amenaza en específico y a la capacidad de recuperarse en caso de que el evento ocurra. Es así entonces como los elementos de la vulnerabilidad pueden ser subdivididos en elementos expuestos, elementos resistentes y elementos resilientes:

- ✓ Los elementos expuestos están directamente asociados a la localización geográfica del elemento en relación a la amenaza.
- ✓ Elementos resistentes se asocian a las características de las edificaciones en el caso de la vulnerabilidad física.
- ✓ Elementos resilientes se asocian a la habilidad del elemento alcanzado por la amenaza de retomar sus capacidades.

Para este proyecto en especial, la vulnerabilidad se enfatizó en el análisis de la vulnerabilidad física al interior de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles y metodológicamente se enfocó en los siguientes aspectos primordiales:

Inicialmente se realizó un análisis de información básica. Para esto se consideraron varios aspectos importantes consignados en el documento técnico elaborado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB, 2014) UPB bajo el contrato *“ESTUDIOS, DIAGNÓSTICO, FORMULACIÓN Y DISEÑOS DE LOS PROYECTOS BARRIOS SOSTENIBLE EN EL SECTOR LA ARENERA Y TRES SECTORES MÁS AL INTERIOR DE LOS PLANES MAESTROS PAN DE AZÚCAR, LLANADITAS Y LOS SECTORES DEL PLAN MAESTRO CENTRO-ORIENTAL PERTENECIENTES A LA COMUNA OCHO, DENTRO DEL MARCO DEL PROYECTO CINTURÓN VERDE METROPOLITANO EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN”*. Del estudio mencionado se tuvo en cuenta la información referente al número de niveles por vivienda (1 piso, 2 pisos, de 3 a 5 pisos o más de 6 pisos), tipo de cubierta (teja de lata, teja de zinc, madera, losa de concreto o plástico), tipo de ocupación (residencial, comercial o mixta) y densidad habitacional, entre otros. La dirección correspondiente a cada predio también es obtenida del estudio elaborado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB, 2014) y es presentada en el actual estudio, como parte de la geodatabase del proyecto. Esta información se relaciona con la ficha de

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

identificación de la estructura a través del Número de Formulario que corresponde al Número de Vivienda en dicha base de datos. Es importante aclarar en este punto que la geodatabase a través del Número de Formulario permite acceder a información detallada de la vivienda consignada en la información entregada como parte del estudio de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB, 2014).

La información de la UPB (2014) fue posteriormente verificada y complementada a través de trabajos de campo. En los trabajos y visitas de campo efectuados por el personal especialista en estructuras del proyecto se levantó información adicional requerida para la valoración numérica de la vulnerabilidad como fue: el tipo de estructura (concreto y madera, madera o lata y cartón), estado y condiciones de las mismas (muy mala, mala, media, buena o muy buena), tipo de fundación (superficial o profunda) entre otras, que se consideran importantes para este proyecto. Todas estas características que fueron de suma importancia para la valoración numérica de la vulnerabilidad física de las estructuras hacen parte de la ficha de identificación de cada uno de los predios y se presentan en el Anexo 06.

Además se identificaron y localizaron dentro de cada polígono del Proyecto Barrios Sostenible, los elementos de estructura física expuestos como son: líneas vitales (vías), equipamientos (equipamientos de salud, parques, plazas, plazoletas, plantas de tratamiento, terminales de transporte, metro, metrocable, tranvía y prevención y atención de desastres), equipamientos básicos sociales y comunitarios (salud, recreación y deporte, culturales, comunitarios, fuerza pública – seguridad, almacenamiento y distribución del sector primario); elementos de soporte ciudadano (patrimonio), elementos de soporte económico (industria, comercio y servicios), estructuras y población expuesta.

Para el análisis de la vulnerabilidad física se estableció una metodología para determinar las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas, en cuanto a: tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras. Se buscaron metodologías en el ámbito científico que lograran agrupar este tipo de requisitos, dividiéndose para el caso de las amenazas por movimientos en masa donde se consideró la metodología de Li et al. (2010), Uzielli et al. (2008) y Guimaraes (2015) y para el caso de las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales se estableció la propuesta de Thouret et al. (2013).

Se deben identificar los diferentes tipos de daño o efecto esperado sobre los elementos expuestos que se pueden presentar como resultado del fenómeno natural. Esto solo se realizó para las estructuras identificadas al interior del polígono del proyecto Barrios Sostenibles.

Finalmente, toda esta información se zonificó en un mapa denominado de vulnerabilidad física, categorizando la vulnerabilidad de cada estructura en alta, media y baja, de acuerdo a las características de los elementos expuestos. De forma adicional, en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las personas que habitan las viviendas y la misma también fue categorizada según el número de personas afectadas dentro de una estructura.

16.2 VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA

16.2.1 Metodología de análisis

La metodología utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad física a movimientos en masa, se fundamentó en la propuesta establecida por Li et al. (2010) y Uzielli et al. (2008) además de otros trabajos existentes en la literatura científica. Este trabajo presenta una propuesta metodológica para determinar la vulnerabilidad ante la amenaza de movimientos en masa y propone un modelo cuantitativo para la determinación de la vulnerabilidad de las estructuras. Como parte adicional, el trabajo sugiere una función aproximada para estimar la vulnerabilidad de las personas que se encuentran dentro de las estructuras.

La base para determinar la vulnerabilidad física según Li et al. (2010), está soportada sobre la intensidad arrolladora que podría experimentar un fenómeno y la resistencia de los elementos físicos expuestos, lo anterior entonces se explica con que la vulnerabilidad es función de la intensidad y la resistencia.

La intensidad para este enfoque, se define como el conjunto de parámetros distribuidos espacialmente, que describe la capacidad arrolladora de un fenómeno natural (Hungar, 1997) en este caso un movimiento en masa. Según Amatruda et al. (2004), la intensidad podría estar expresa en términos de la energía del impacto, la velocidad media y la profundidad del suelo en las zonas potencialmente erodables.

En el trabajo específico de Li et al. (2010), la intensidad de la amenaza es definida como una función de dos variables: el factor de intensidad geométrico (I_{gem}) y el factor de intensidad dinámico (I_{din}).

El factor de intensidad geométrico tiene que ver con la posición o la proximidad de las estructuras con respecto a lo que se considera la zona de amenaza. Este factor considera entonces las características relacionadas con el tamaño del movimiento en masa. Cuando la estructura se encuentra al interior de la zona donde se podría generar un movimiento en masa, se podrían generar fenómenos de creeping. El factor de intensidad dinámico tiene como principal variable la velocidad del deslizamiento cuando ocurre el impacto contra la estructura localizada fuera del área donde ocurriría el movimiento en masa. Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

$$I = \begin{cases} I_{gem} \cdot I_{dfm} & \text{Factor de intensidad geométrico, cuando las estructuras} \\ & \text{están dentro del movimiento en masa} \\ I_{din} \cdot I_{dpt} & \text{Factor de intensidad dinámico, cuando las estructuras están} \\ & \text{fuera del movimiento en masa} \end{cases}$$

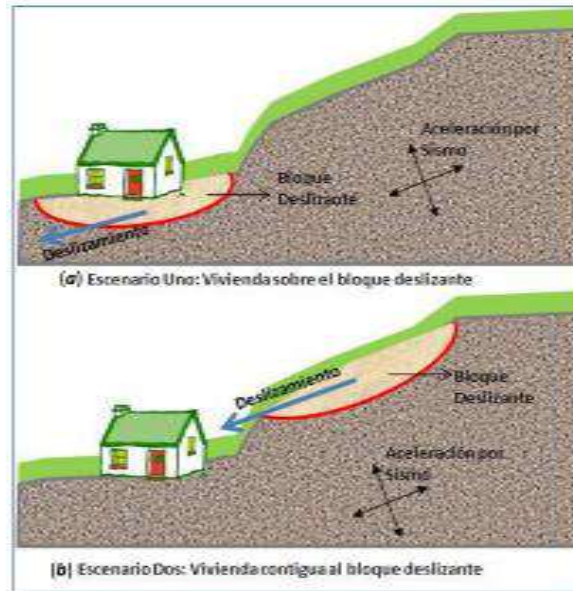


Figura 207. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa

En la expresión anterior, I_{gem} es el factor de intensidad geométrica e I_{dfm} es el factor que considera la deformación de las estructuras cuando se encuentran localizadas al interior del área del movimiento en masa y las cuales sufrirán la acción de deslizamientos con bajas velocidades de deslizamiento o creeping.

Por otro lado, I_{dpt} es el factor que considera el espesor de los detritos que llegan hasta la zona de las estructuras y que impactan las mismas. Este es utilizado para evaluar los elementos exteriores a las áreas de deslizamientos que ocurrieran con altas velocidades y se podría obtener con la ecuación:

$$I_{dpt} = 0.1 \cdot D_{dpt}$$

Finalmente, I_{din} es el factor que relaciona la velocidad de la amenaza con la estructura impactada. En el caso de que la velocidad del deslizamiento pueda superar los $5 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$, Cruden & Varnes (1996) (Tabla 64) afirman que las estructuras serán destruidas y fuera de servicio. Para valores menores de $5 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$, las estructuras permanecerían intactas. Así las cosas, la intensidad dinámica podría ser calculada como:

$$I_{din-E} = \begin{cases} 0,00 & C \leq 5 \times 10^{-7} \quad (\text{mm/s}) \\ \frac{1}{36} (\text{Log}_{10} C + 6,30)^2 & C > 5 \times 10^{-1} \quad (\text{mm/s}) \end{cases}$$

Donde C es la velocidad en la que se podría desarrollar un fenómeno y para la cual Cruden & Varnes (1996) presentan una clasificación de los movimientos considerando la

velocidad. Por ejemplo, para las estructuras fuera de un fenómeno que viaja de forma rápida, estas pueden ser afectadas por bloques de roca o flujo de escombros con alta velocidad. Para las estructuras dentro de la zona de incidencia del fenómeno que viaja lento, los daños pueden estar más asociados a fallos estructurales como deformaciones y desplazamientos de los elementos estructurales que podrían afectar el servicio de la misma.

Tabla 64. Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996)

CLASE	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	PROBABLE NIVEL DE DESTRUCCIÓN
7	Extremadamente rapido	5×10^3	Desastre de gran violencia, estructuras destruidas por impacto del material desplazado, muchos muertos, improbabilidad de escape
6	Muy rapido	5×10^1	Algunas vidas perdidas, la velocidad supera la velocidad de escape de las personas.
5	Rapido	5×10^{-1}	Es posible escapar o evacuar las estructuras, posesiones y equipamientos destruidos.
4	Moderado	5×10^{-3}	Algunas estructuras temporales e insensibles pueden mantenerse temporalmente.
3	Lento	5×10^{-5}	Medidas de remediación pueden ser adoptadas durante el movimiento. Las estructuras pueden mantenerse pero con trabajos frecuentes de mantenimiento.
2	Muy lento	5×10^{-7}	Algunas estructuras permanecen sin daños ante el movimiento.
1	Extremadamente lento		No se tiene percepción del movimiento. Se hace necesario implementar instrumentos.

La resistencia refleja la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del fenómeno con un determinado grado de severidad. Para las personas, esta misma resistencia representaría la capacidad de reacción y evacuación. En el caso de las estructuras, la resistencia total es función de varios factores y en el trabajo de Li et al. (2010) estos factores son específicamente:

$$R = \left(\prod_{i=1}^{ns} \xi_i \right)^{1/ns}$$

Si se consideran los factores de fundación (ξ_{sfd}), los factores por el tipo de estructura (ξ_{sty}), el factor de mantenimiento o estado (ξ_{smn}) y el factor de altura o niveles de las estructuras (ξ_{shl}), la resistencia se podrá calcular como:

$$R = (\xi_{sfd} \cdot \xi_{est} \cdot \xi_{alt} \cdot \xi_{man})^{1/4}$$

Para determinar el factor de fundación Ragozin and Tikhvinsky (2000) propusieron la siguiente ecuación en función de la profundidad de desplante de la fundación (D_{fun})

$$\xi_{sfd} = \left(\frac{D_{fun}}{10} \right)^{1/3} + 0.05$$

Con esta ecuación se podría establecer unos rangos de valores para determinadas profundidades de fundación.

$\xi_{sfd}=1.05$ Para $D_{fun} > 10$ m

$\xi_{sfd}=0.63$ Para $2 \text{ m} < D_{fun} < 10$ m

$\xi_{sfd}=0.5$ Para $D_{fun} < 2$ m

De la Tabla 65 a la Tabla 67 se presentan los demás factores que hacen parte de la evaluación de la resistencia de las estructuras propiamente.

Tabla 65. Factor por tipo de estructura

TIPO DE ESTRUCTURA	ξ_{est}
Muy ligera (lata y cartón)	0.1
Ligera (Madera)	0.2
Mixta (Concreto y madera-Prefabricada)	0.4
Mampostería	0.8
Concreto sin refuerzo	1.3
Concreto reforzado	1.5

Tabla 66. Factor por altura de la estructura

ALTURA DE LA ESTRUCTURA	ξ_{alt}
Un solo piso	0.1
De 2 pisos	0.4
De 3 a 5 pisos	0.9
Más de 6 pisos	1.5

Tabla 67. Factor de estado de la estructura

ESTADO DE LA ESTRUCTURA	ξ_{man}
Muy mala	0.1
Mala	0.4
Media	0.8
Buena	1.2
Muy Buena	1.5

Para determinar la vulnerabilidad, Li et al. (2010) proponen expresiones en función de la intensidad de la amenaza (I) asociada a los elementos expuestos y de la resistencia (R) de esos elementos para soportar esa amenaza.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - \frac{2(R - I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases}$$

Guimaraes (2015) estableció a través de aplicaciones de la metodología de Li et al. (2010) en la Región Serrana de Rio de Janeiro donde se presentan algunas condiciones similares a Medellín en cuanto a ambientes geotécnicos se refiere, que la misma presenta dificultades en la obtención de algunos parámetros fundamentales para el cálculo de la vulnerabilidad física por movimientos en masa. Algunos de esos elementos son por ejemplo la determinación del factor D_{dpt} , ya que se trata de una variable que involucra el espesor de los detritos dejada por el movimiento en masa, la velocidad del deslizamiento C , para el cual tampoco se cuenta con información suficiente, y el I_{dfm} el cual involucra la deformación de las estructuras que se encuentran al interior del movimiento en masa.

Los anteriores factores requerirían entonces que el usuario deba esperar que el evento pase y observar dichas variables, o tener herramientas avanzadas que le permitan hacer simulaciones previas para determinar analíticamente o numéricamente dichos valores, lo que torna poco practica la metodología.

Considerando dichas dificultades, Guimaraes (2015) elaboró una metodología de cálculo para estimar la vulnerabilidad de las estructuras ante movimientos en masa, utilizando parámetros de fácil acceso aplicados sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de la estructura con la localización respecto al movimiento en masa.

Teniendo en cuenta lo anterior, Guimaraes (2015) considera dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, fue considerada la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 208 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la distancia (d) y la altura (h) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z = h / d$.

Finalmente, Guimaraes (2015) llegó a establecer una intensidad definida a partir de la relación de los parámetros geoméricos de la amenaza y de la resistencia de las estructuras impactadas. Así entonces, la vulnerabilidad estructural física se definió matemáticamente como:

$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

La anterior ecuación tiene sentido físico cuando se observa que la vulnerabilidad estructural física (V_e) es la inversa de la capacidad de resistencia (R) de las estructuras.

La Figura 209 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.

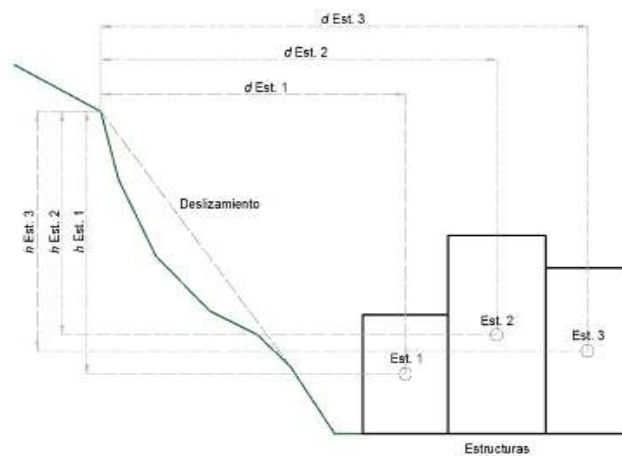


Figura 208. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables

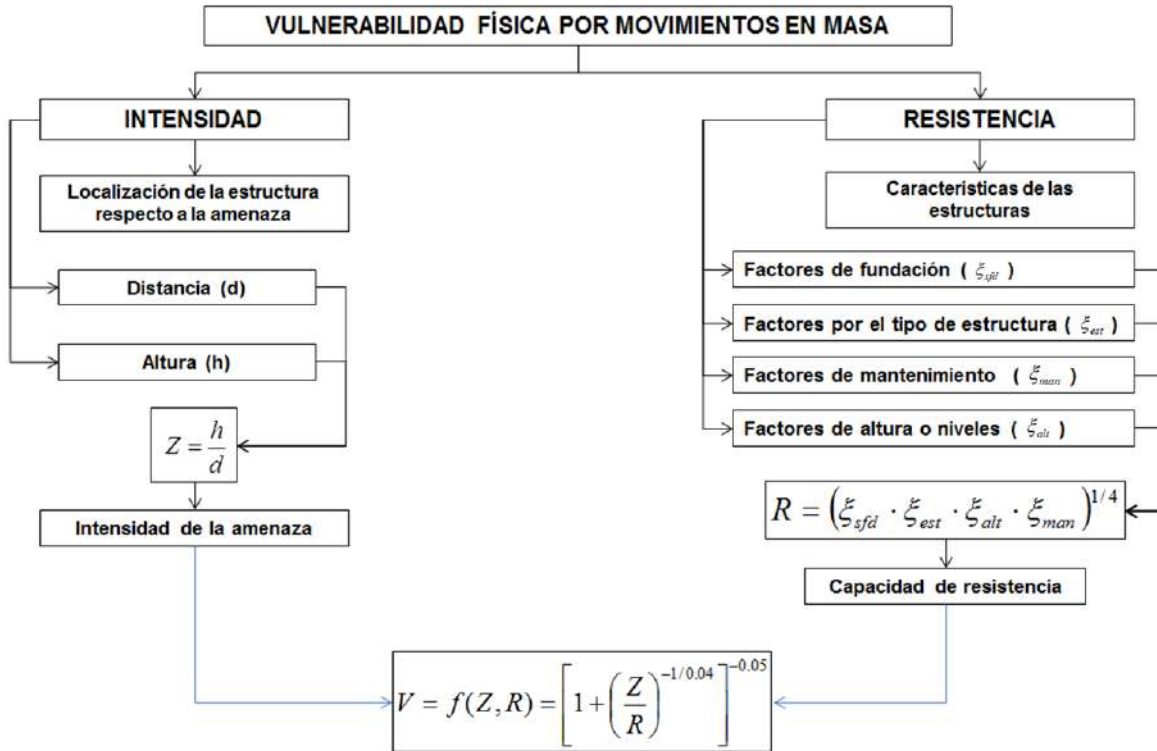


Figura 209. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa

16.2.2 Calibración de la metodología

La metodología presentada en el numeral anterior y explicada en detalle en el Informe I 2445 01 Rev7, fue calibrada a partir del proceso de inestabilidad ocurrido el 27 de septiembre de 1987 en el Cerro Pan de Azúcar, en la ciudad de Medellín. Dicho deslizamiento que terminó impactando parte del Barrio Villatina, en la Comuna 8, provocó la muerte de alrededor de 500 personas, la destrucción de unas 100 viviendas aproximadamente y cerca de 2400 personas damnificadas, por lo que fue considerado como una de las grandes tragedias ocurridas en la ciudad y hasta el 2007 como uno de los 10 desastres urbanos más importantes del mundo según Coupé et al. (2007).

16.2.2.1 Polígono asociado al Deslizamiento Villatina

En la UMI delimitada para el Polígono San Antonio, también objeto de estudio en el Proyecto Barrios Sostenibles (SIGA, 2018), se presentó el conocido como deslizamiento Villatina, el cual generó una mancha de deslizamiento clave para la calibración de la metodología de trabajo usada para evaluar el riesgo por deslizamiento en todos los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles.

Con el objetivo de hacer tal calibración, se procedió al trazado de la que debió ser en su momento la mancha o polígono asociado al deslizamiento Villatina. Se ha construido sobre la cartografía del año 1973, de tal manera que siendo previa a la ocurrencia del deslizamiento permite ejecutar un análisis del tipo retrogresivo “back analysis”.

Como insumo para definir el polígono, se utilizaron registros fotográficos del deslizamiento, tomados desde diferentes ángulos, la descripción del movimiento en masa según los expertos del tema, la información recopilada durante la campaña de campo que hizo parte de este estudio y la interpretación de fotografías aéreas. Esta última actividad permitió identificar la corona y algunos puntos de referencia claves.

Dentro de los puntos que sirvieron como guía para establecer el posible límite de la mancha, se identificó una geoforma denominada en el capítulo de geomorfología del Estudio del Polígono San Antonio (SIGA, 2018) como Peldaño Tectónico, ubicado en la parte SSW del deslizamiento, un drenaje ubicado en el límite occidental y las vías con nomenclatura Calle 56 EE, Calle 56 D y Carrera 16 (Figura 210).

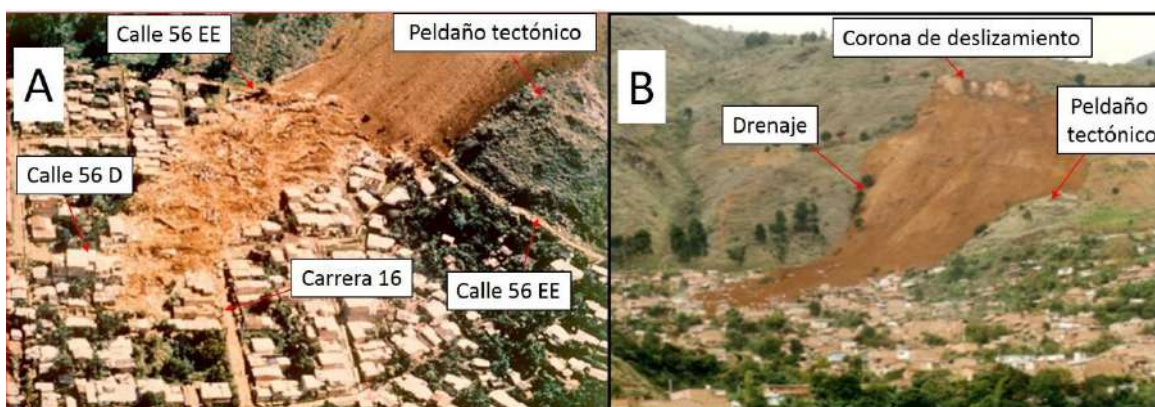


Figura 210. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo

Con la identificación de las referencias mencionadas anteriormente, que se localizan en partes externas del movimiento, y con la interpretación de la cartografía, se demarcó el polígono asociado al evento Villatina (Figura 211).

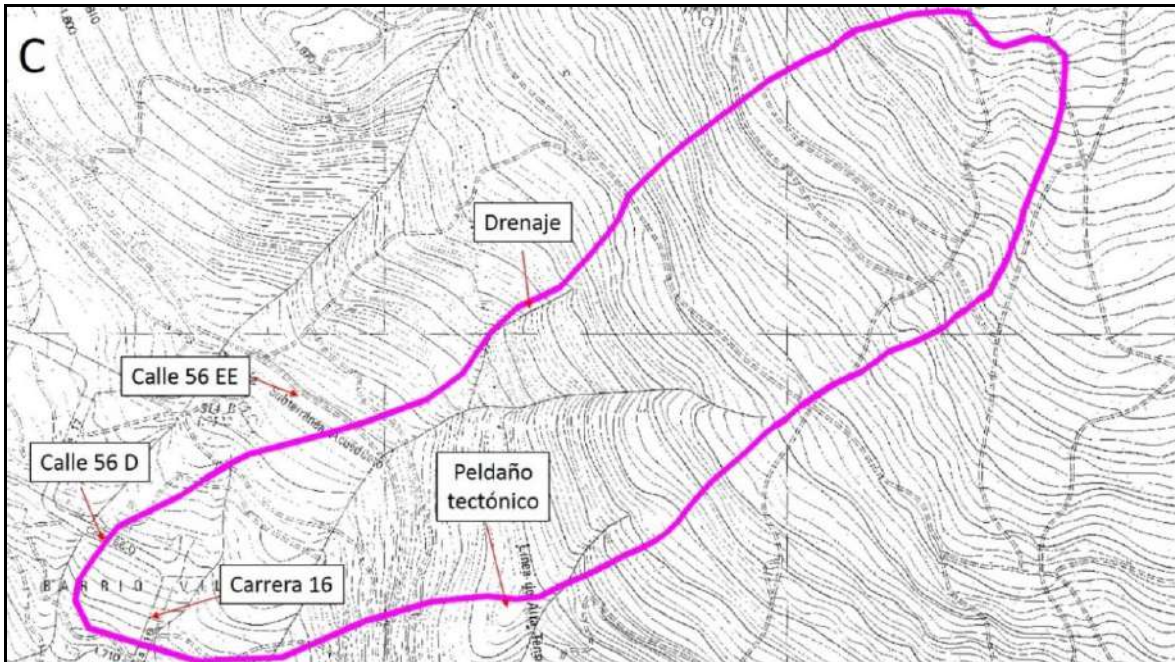


Figura 211. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías

La Figura 212, a continuación, muestra de nuevo el polígono asociado al deslizamiento mencionado, partiendo de su escarpe de tipo acorazonado y llegando hasta la zona conocida como Campo Santo. En el Mapa 47 y la Figura 213 se presentan las unidades geomorfológicas y el Perfil A-A, trazado en parte de la zona del deslizamiento Villatina; de la UMI San Antonio. La explicación en detalle de dichas unidades geomorfológicas se presenta en el Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales para el Polígono San Antonio (Siga, 2018).

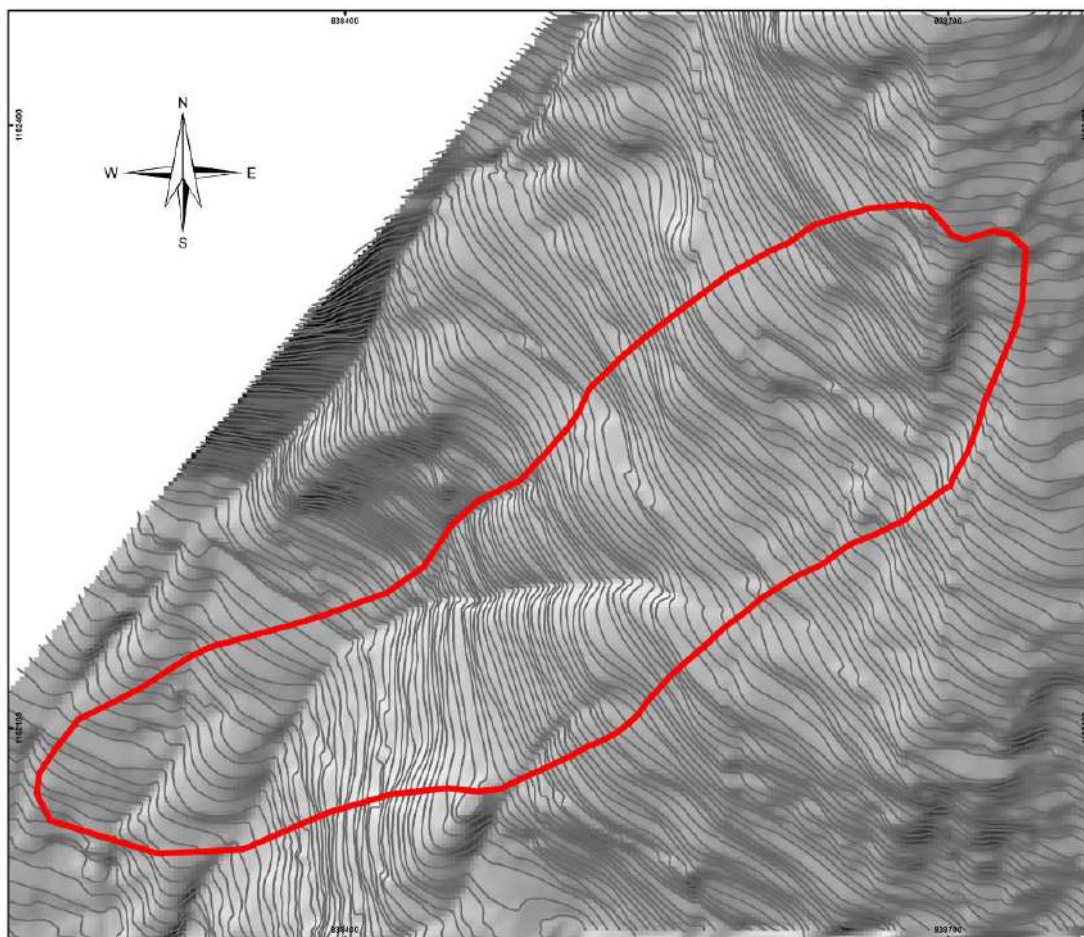
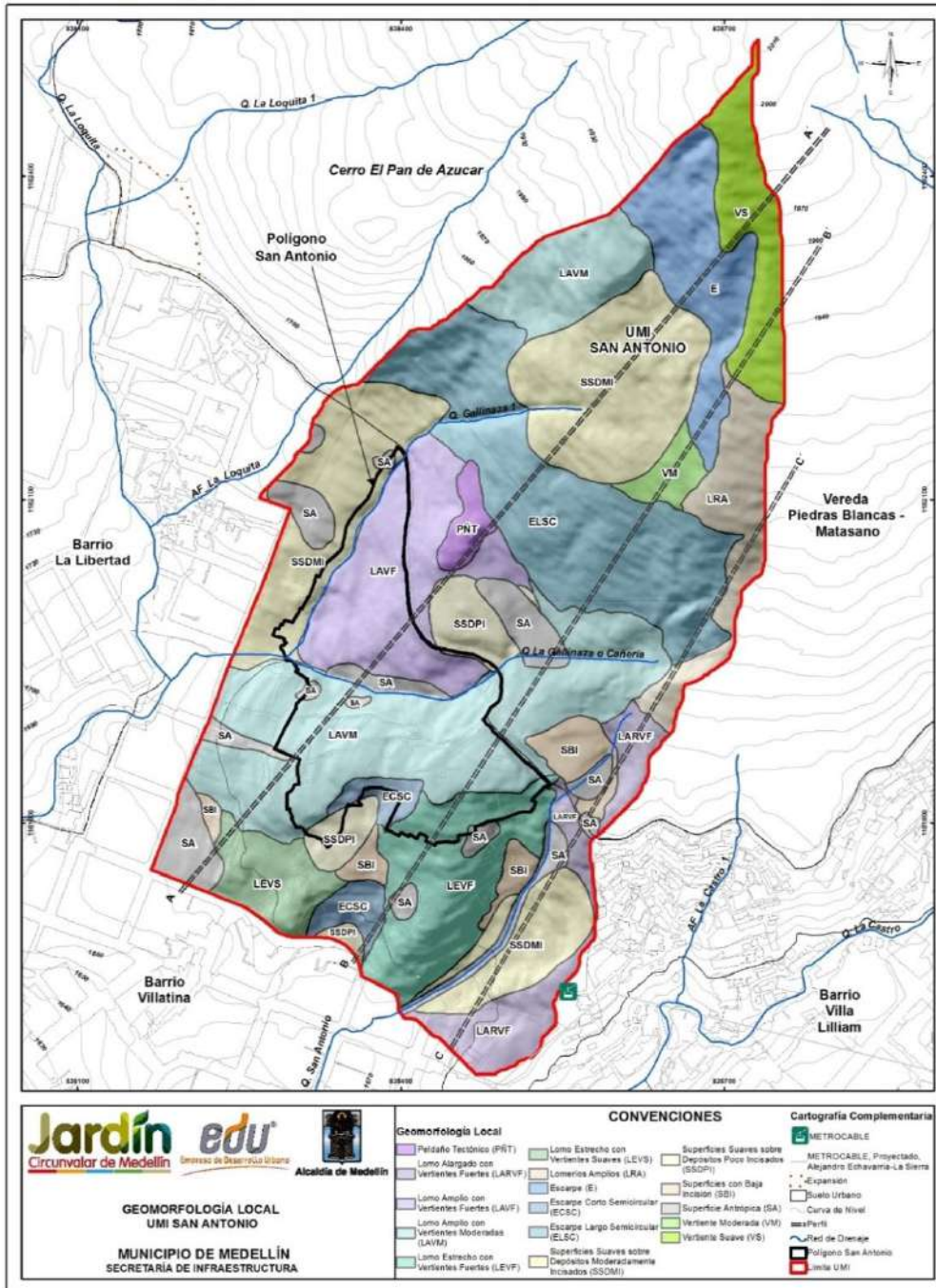


Figura 212. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973



Mapa 47. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

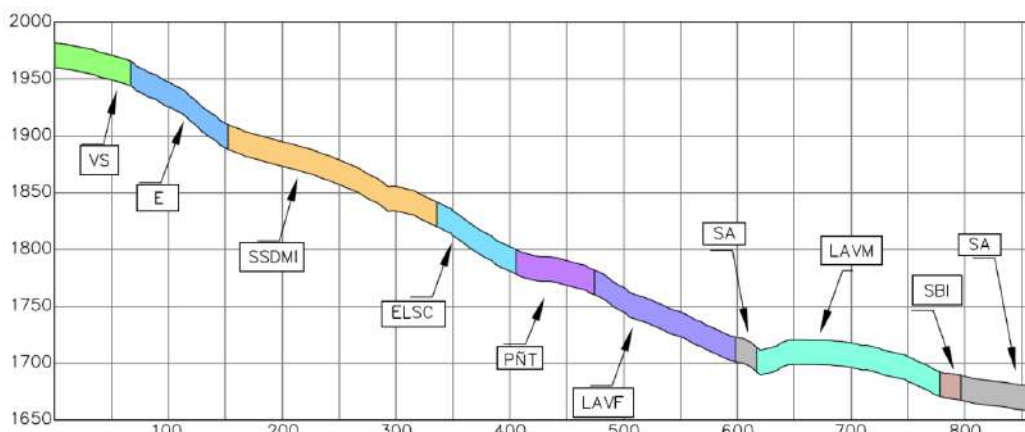




Figura 213. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

El movimiento del material se da desde la unidad de escarpe (E) donde la pendiente es muy alta (mayor a 30°), continua sobre la unidad de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) que tiene pendientes predominantemente altas (15°-30°) y controlado por las geoformas cóncavas (vaguadas) presentes en esta unidad. Nuevamente entra en una zona de pendientes muy altas asociadas a la unidad de escarpe largo semicircular (ELSC) donde se encuentra el inicio de la cuenca de la Quebrada Gallinaza 1, que por su valle estrecho y abrupto facilita la movilidad de materiales en su cauce y que marca la división entre las unidades geomorfológicas de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) al occidente y la unidad de lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), esta última con pendiente muy alta. En este punto, debido a la diferencia en la geomorfología del sector, el deslizamiento se comporta distinto al occidente y al oriente.

El movimiento se extiende hacia el oriente hasta la unidad geomorfológica peldaño tectónico (PNT) que sirve como barrera que desvió el material hacia el occidente. Este desvío junto a la pendiente de la unidad lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), provocan que el material aumente la velocidad y se movilice en dirección al cauce de la Quebrada Gallinaza 1 e incluso la sobrepase.

En la margen occidental a la altura de la unidad escarpe largo semicircular (ELSC), el material se encausa tanto en el cañón de la Quebrada Gallinaza 1 como en el cañón de una quebrada que se observa claramente en la cartografía del IGAC (1973) y en las fotografías planteadas en la Figura 210. Este suceso sumado a la cantidad de material y velocidad del mismo, provocan que continúe en dirección SSW hacia el escarpe del lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), que actúa como barrera, ocasionando el rebote hacia el suroccidente y llegando a depositarse hasta la esquina de la carrera 16 con calle 56 D (Figura 210). Es importante mencionar que el drenaje utilizado como referencia, no hace parte de la red hidrográfica de la cartografía actual del POT (2014), siendo este un cambio morfológico importante ocurrido después del fenómeno deslizamiento Villatina.



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

16.2.2.2 Factor de intensidad

Se habló en el Numeral 16.2.1 sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de una estructura de acuerdo con la localización respecto a un probable movimiento en masa. Según Guimaraes (2015) se consideran dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, se tiene en cuenta la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 208 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la altura (h) y la distancia (d) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z=h/d$.

La metodología para llegar a la definición de esta variable de vulnerabilidad Z es como se indica a continuación. Para mayores detalles se recomienda consultar el Informe I-2445-01A-Metodología SIG.

- ✓ Se crean puntos críticos (focos de deslizamiento) con el objetivo de determinar cuáles sitios tienen los valores más altos de probabilidad de ocurrencia de deslizamiento. Para facilitar esta búsqueda, el archivo raster se convierte a puntos y luego se seleccionan aquellos más críticos. Los valores umbral cambian para algunos polígonos, pero de manera general se consideraron como críticos aquellos puntos cuyo valor superó a 0,097724987.
- ✓ Se calcula de distancia (d) desde cualquier punto del territorio hasta el foco más cercano. Con los puntos críticos definidos se procede a generar una superficie de distancia con respecto a ese punto, pero esta superficie tiene la propiedad de considerar la inclinación del terreno.
- ✓ Se genera un raster de altura de referencia para generar así otro raster que sirva como referencia para establecer la diferencia de alturas entre el punto crítico y cualquier punto del territorio. Este raster es una malla con un único valor, el valor de altura para el punto crítico.
- ✓ Se determina la diferencia de alturas de cada sitio del territorio con respecto al foco (h). En la sentencia para generar esta nueva superficie se hacen nulas aquellas celdas cuyo valor de altura está por encima del punto crítico, es decir, el modelo está considerando que existe afectación por desprendimiento de materiales sólo para las zonas que están por debajo del punto crítico.
- ✓ Se calcula un raster de Intensidad (Z) para cada punto, lo cual consiste en generar una superficie que denota el grado de intensidad de un movimiento en masa. Este raster está en función de la distancia al punto crítico y de la diferencia de alturas entre el sitio evaluado y la altura del punto crítico. La ecuación que se ingresa al cuadro de diálogo del es (h/d) .

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

- ✓ Se genera un raster de intensidad máxima (Z) que es el resultado de tomar los raster de intensidad de cada punto crítico y para cada ubicación evaluar cuál es máximo valor y asignarle ese a la superficie definitiva.

El cálculo del factor de intensidad (Z) en comparación con el polígono del numeral anterior se considera entonces la mejor manera de darle validez a la metodología usada.

16.2.2.3 Comparación de factor de intensidad con polígono de deslizamiento

La Figura 214, a continuación, presenta en una misma imagen el mapa del modelo geológico de las UMI's San Antonio y Pinares de Oriente obtenido con la cartografía del 2014 tomada del POT y el factor de intensidad (z) calculado con la cartografía del IGAC (1973), en la zona aferente al deslizamiento Villatina, la cual es cercana al Polígono San Antonio. Se ha incluido además el polígono asociado al deslizamiento según los geólogos de esta oficina, el cual se había mostrado y explicado ya en el Numeral 16.2.2.1 de este mismo informe.

Es importante aclarar que el polígono rojo de la Figura 214 al ser trazado sobre la cartografía del IGAC (1973) da lugar a lo que se denomina en el área de la geotecnia un “back analysis”. Esto último por cuanto corresponde a lo que sería la mancha más importante generada por el deslizamiento en una cartografía previa a la de generación del deslizamiento. Se resalta el foco del deslizamiento y la zona que los geólogos mapearon como depósito de deslizamiento, en este caso el asociado al deslizamiento Villatina, el cual queda contenido en el polígono rojo calculado según la metodología.

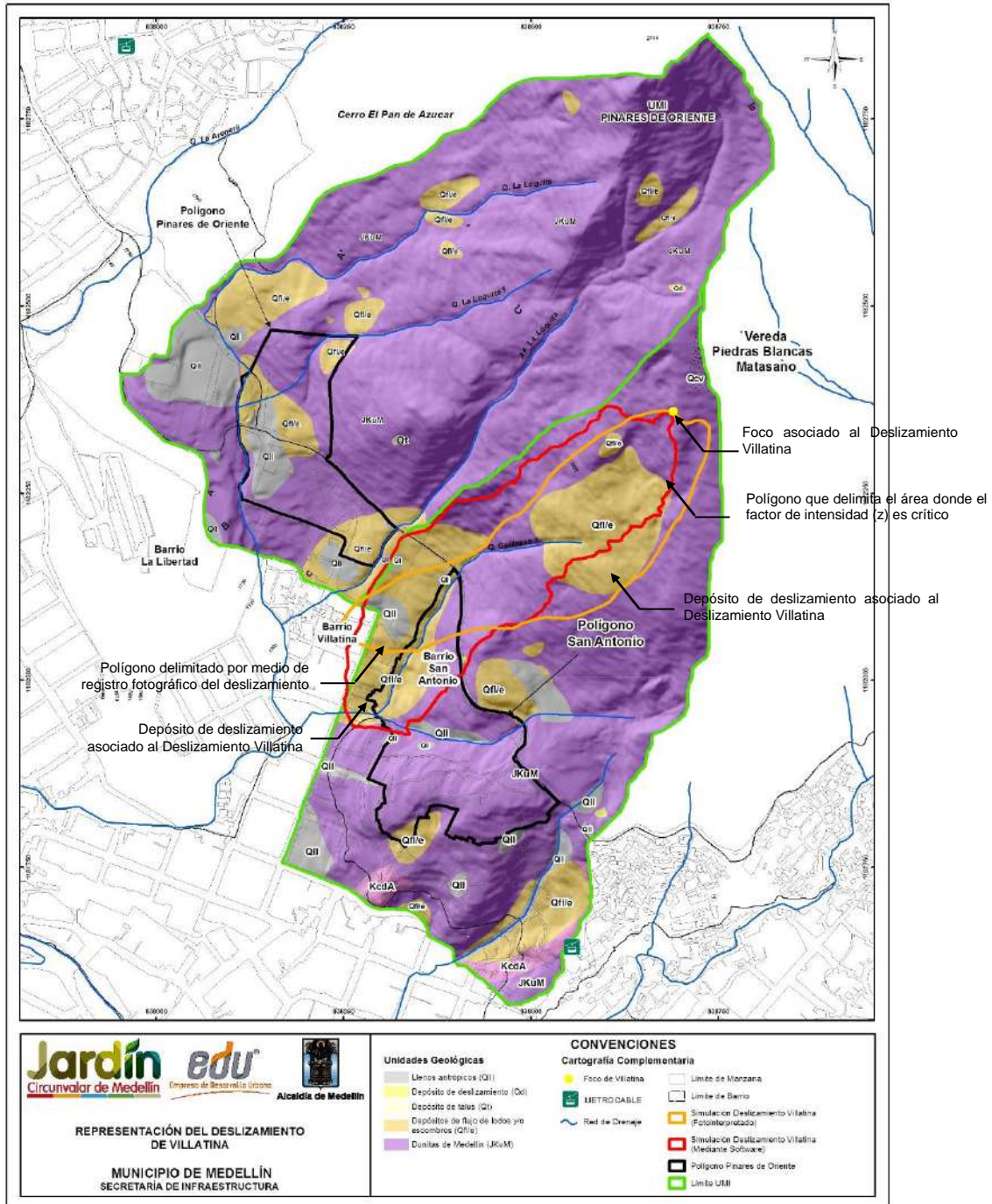




Figura 214. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---



Se destacan varios hechos importantes que hacen que con este ejercicio se pueda dar validez a la metodología usada en este estudio para evaluar el riesgo por deslizamiento teniendo en cuenta el factor de intensidad.

- ✓ En primer lugar, se tiene que el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento está contenido, en términos prácticos, dentro del polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico. Las zonas que del primer polígono quedan por fuera del segundo son pocas y se asocian simplemente a la corona amplia acorazonada que tuvo del deslizamiento Villatina, en comparación con el foco único que la metodología considera para determinar el área donde el factor de intensidad (z) es crítico.
- ✓ Ambos polígonos llegan a lo que se conoce hoy con el nombre de Campo Santo y cubren el drenaje principal (Quebrada Gallinaza 1) y el secundario al oeste del primero. Se tiene entonces de esta forma una trayectoria muy similar del deslizamiento Villatina según ambos polígonos. La extensión de ambos polígonos es casi la misma, lo cual es muestra clara de que el factor de intensidad (z) considerado como crítico es el adecuado.
- ✓ Ambos polígonos explican la localización de las formaciones geológicas denominadas flujos de lodos y escombros asociadas al deslizamiento Villatina. Incluso el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es un poco más amplio en la parte baja y cubre todo lo que en este sector se ha denominado flujos de lodos y escombros, mostrando así que la metodología puede ser conservadora en lugar de liberal, en cuanto al no cubrimiento de áreas susceptibles de ser impactadas con deslizamientos.

No se debe olvidar que el modelo correspondiente asume condiciones ideales que gobiernan los fenómenos físicos modelados, por lo tanto es una aproximación de la realidad. Bajo este criterio es necesario entender que los resultados obtenidos no deben considerarse como valores invariantes, sino que corresponden a órdenes de magnitud que incluyen las incertidumbres con las cuales se conforman los modelos respectivos y son, por consiguiente, las herramientas que permiten apoyar la toma de decisiones. Por tal motivo es normal que se presenten algunas diferencias. Sin embargo, para efectos de la calibración de la metodología de trabajo, se considera que la similitud obtenida entre el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento y el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es racionalmente precisa. Finalmente, se puede concluir con base en el ejercicio efectuado que la metodología usada en este estudio es la adecuada.

16.2.3 Levantamientos de campo y análisis de la información

Para hacer cumplir la metodología anteriormente expuesta, se recolectó información primaria de los componentes relevantes para el análisis. El trabajo inicio con la revisión de la información básica y posteriormente se realizaron visitas de campo donde a través de la implementación de fichas y registros fotográficos se levantaron las estructuras.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

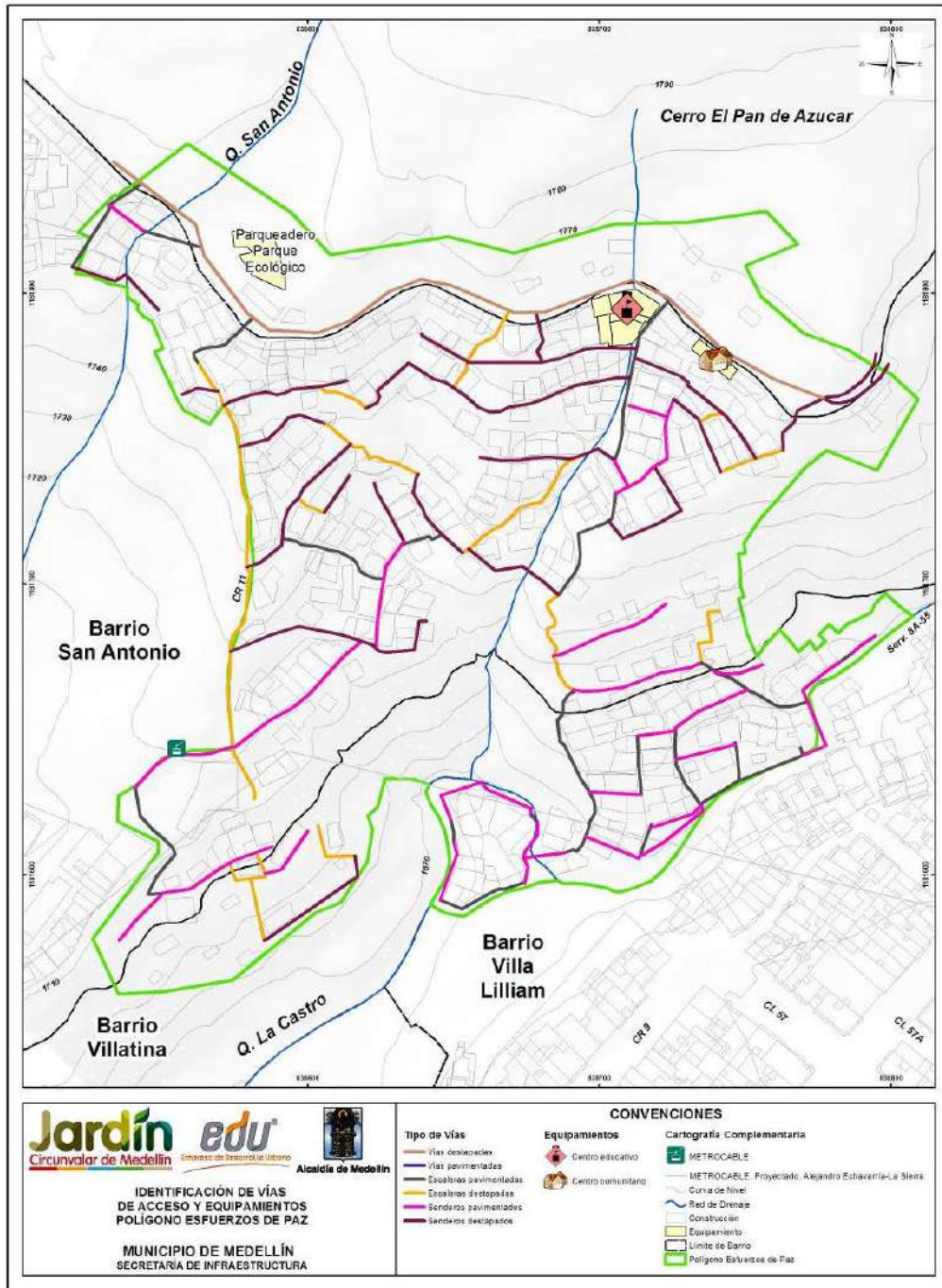
Para la ejecución de los trabajos de campo de forma ordenada, se realizó previamente una zonificación de los polígonos en función de las manzanas físicamente formadas con el objetivo de distribuir los trabajos en campo.

El polígono de intervención fue dividido en cuatro zonas, como se muestra en la Figura 215, para facilitar la inspección de las viviendas en campo. Cabe resaltar que las Zonas 3 y 4: se observan como potencialmente inestables, presentando gran cantidad de escombros y residuos orgánicos. Para la delimitación del polígono de intervención, se utilizaron los siguientes referentes físicos: En el norte por la Calle 56D, al occidente por la Carrera 13 limitando con el Barrio San Antonio, al oriente por la Carrera 10 y al sur por la Quebrada La Castro.



En este capítulo se presentan los resultados de la recolección e inventario de toda la información referente a los componentes físicos relevantes para el cálculo de la vulnerabilidad estructural de acuerdo a la metodología presentada. Los componentes principales inspeccionados fueron: tipo de ocupación, tipo de estructura, estado o condiciones de la estructura, altura de la estructura (número de niveles por edificación) y tipo de cubierta. Se realizó el levantamiento, inspección e inventario completo del Polígono Esfuerzos de Paz, con un total de 342 estructuras. Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. El Mapa 48 presenta las vías de acceso y equipamientos del Polígono Esfuerzos de Paz.



Figura 215. Zonificación esquemática del Polígono Esfuerzos de Paz



Mapa 48. Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono Esfuerzos de Paz (39_EDPVíasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_C y 39_EDPVíasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Luego de recopilada la información de campo, ésta es analizada mediante la conformación inicial de una base de datos con la numeración y atributos de cada estructura. Con esta base de datos se realizó un análisis estadístico mediante la implementación de diagramas circulares (Tabla 68 a Tabla 72) para facilitar la interpretación de los resultados.

De forma general, las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio de mantenimiento. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta calificación debido a que estaban mejor estructuradas e incorporaban en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además, se encontraron estructuras en madera en un estado con notable deterioro. Las fundaciones de las estructuras son superficiales no convencionales dado que existe una gran cantidad de construcciones en las que sus cimentaciones son troncos de madera, terreno natural, delgadas losas en mampostería y/o concreto o simplemente estructuras con una esbeltez no proporcional entre altura y ancho. Específicamente en el Polígono Esfuerzos de Paz se tiene las siguientes características:

- ✓ El uso predominante en el Polígono Esfuerzos de Paz es el residencial, con un 91.81% de los usos presentes. Las construcciones de uso comercial son pocas, con 4.97% (Tabla 68).
- ✓ Un poco más de la mitad de las viviendas tienen un tipo de estructura en mampostería con un 59.06%. Le siguen las estructuras de madera (ligera) con un 38.30%. En menores porcentajes se encontraron estructuras muy ligeras, mixtas y en concreto reforzado, con el 1.46%, 0.88% y 0.29%, respectivamente (Tabla 69).
- ✓ En el Polígono Esfuerzos de Paz el 61.99% de las estructuras inspeccionadas presentan un estado medio de mantenimiento. El estado que le sigue es el malo con un 23.98%. Los estados muy malo, bueno y muy bueno se encuentran en menores porcentajes con el 10.82%, 1.75% y 1.46%, respectivamente (Tabla 70).
- ✓ Más de la mitad de las viviendas inspeccionadas poseen un sólo nivel construido con un 62.87% del total. Le siguen las construcciones de dos niveles con el 33.33% y por último se encuentran las edificaciones entre tres y cinco niveles con un 3.80% (Tabla 41).
- ✓ La mayoría de las construcciones tiene teja de zinc con un 95.91%. Le siguen las cubiertas tipo losa y teja de barro (otro) con un 3.51% y 0.58% (Tabla 72).
- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del Polígono Esfuerzos de Paz, se identificó que el 100% de ellas poseen fundaciones superficiales a través de sistemas de encepados en concretos ciclópeos conformados por piedra y mortero.

Tabla 68. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa

Ocupación	Total Viviendas	%
Residencial	314	91.81
Comercial	17	4.97
Mixto	11	3.22
Total	342	100

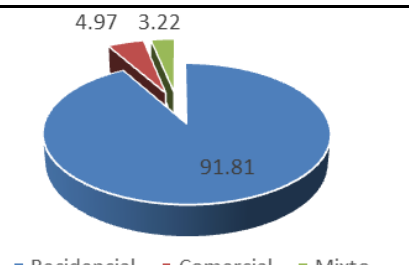


Tabla 69. Tipo de estructura – Movimiento en Masa

Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Muy ligera	5	1.46
Ligera	131	38.30
Mixta	3	0.88
Mampostería	202	59.06
Concreto reforzado	1	0.29
Total	342	100




Tabla 70. Estado de la estructura – Movimiento en Masa

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Muy mala	37	10.82
Mala	82	23.98
Media	212	61.99
Buena	6	1.75
Muy buena	5	1.46
Total	342	100

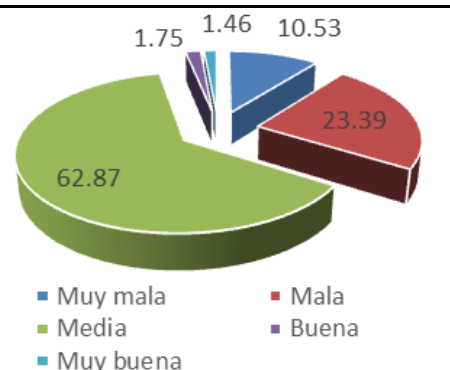


Tabla 71. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa

Altura Estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	215	62.87
De 2 pisos	114	33.33
De 3 a 5 pisos	13	3.80
Total	342	100

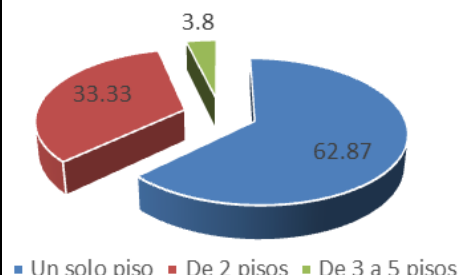


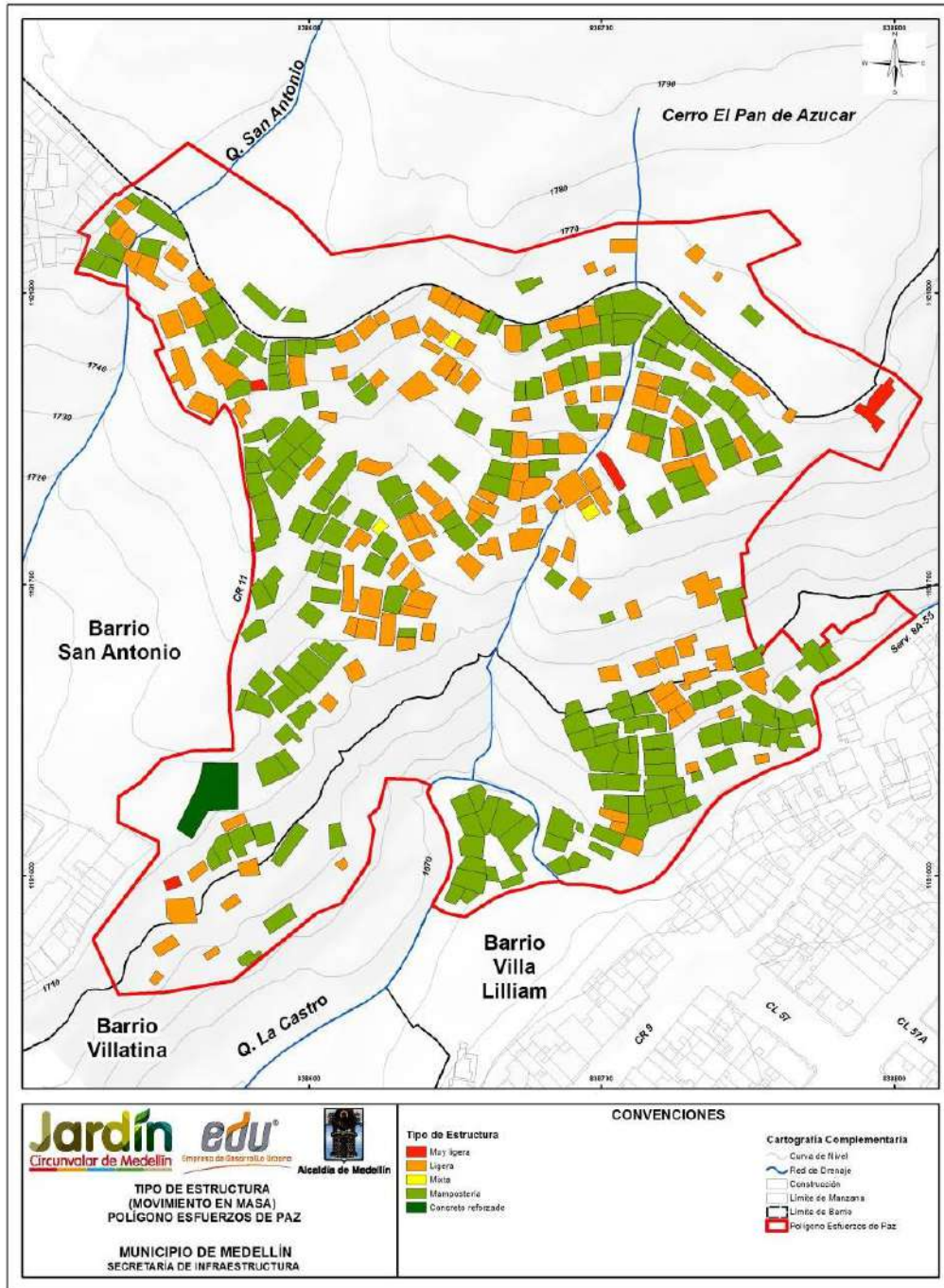
Tabla 72. Tipo de Cubierta – Movimiento en Masa

Tipo Cubierta	Total Viviendas	%
Teja de zinc	328	95.91
Losa	12	3.51
Otro	2	0.58
Total	342	100

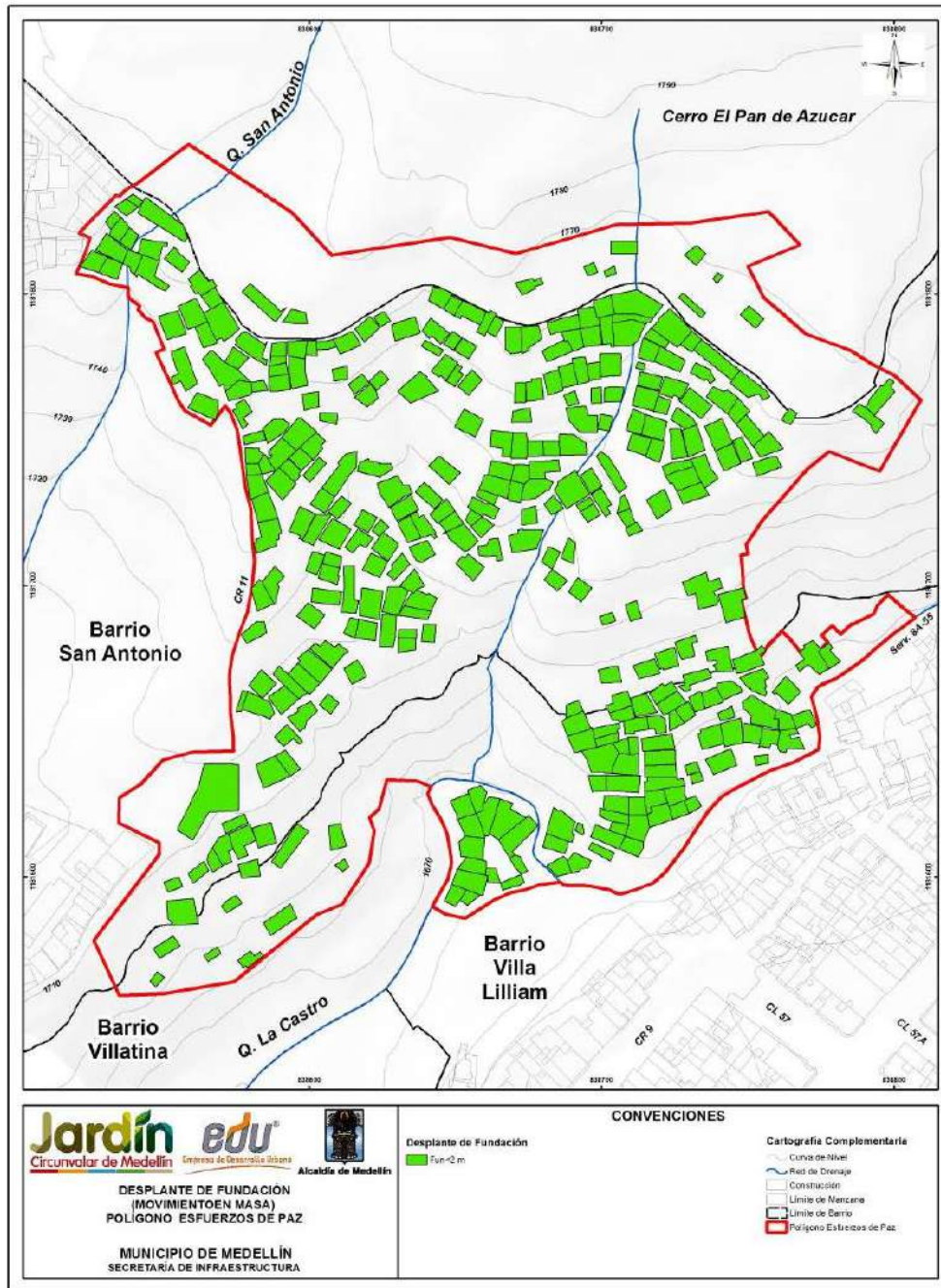


Además de los análisis estadísticos se realizaron mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, los cuales se presentan del Mapa 49 al Mapa 53.

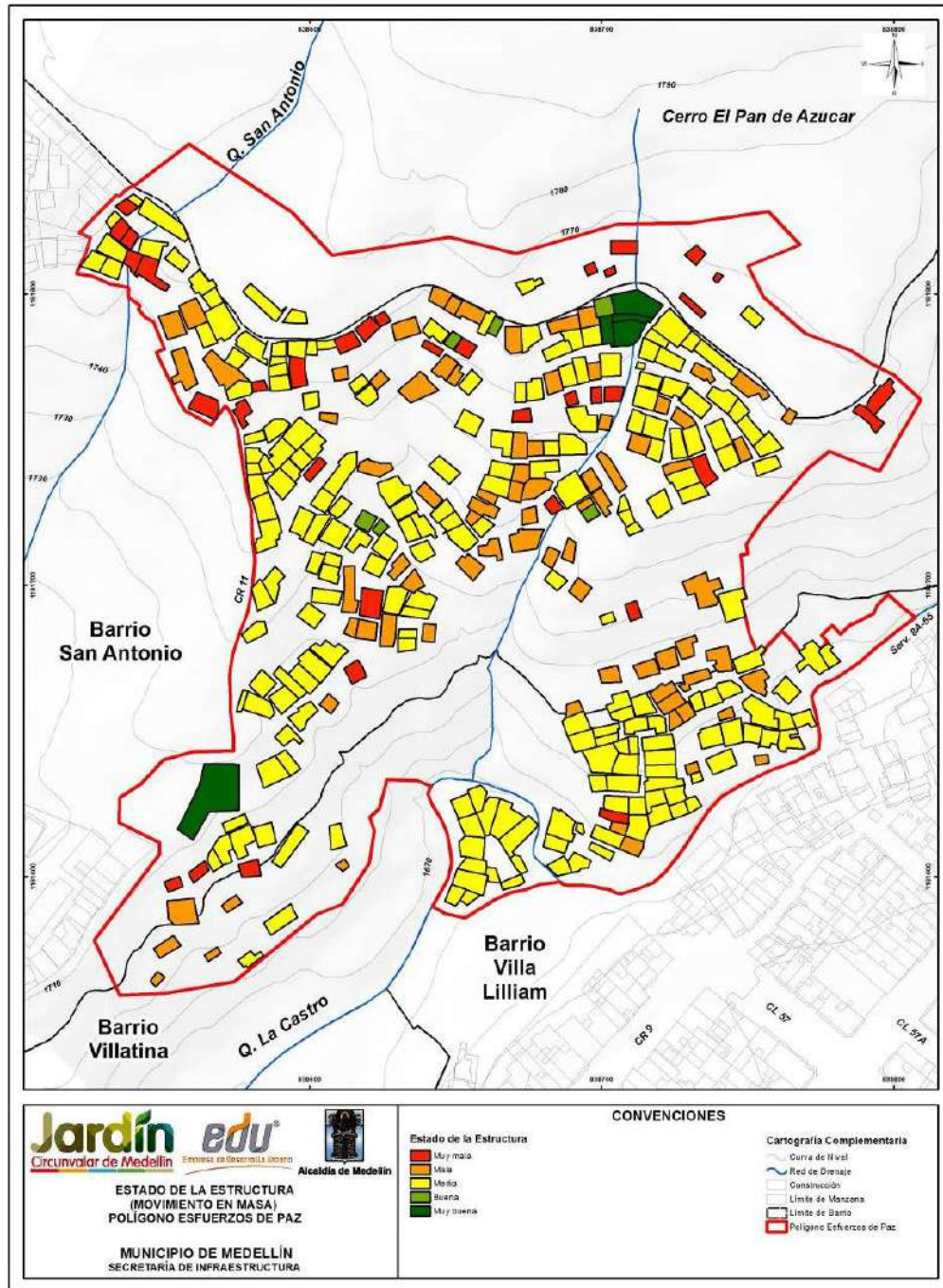
Con la información presentada y la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. En el Mapa 54 se muestra la distribución del factor resistencia donde un factor de resistencia de 1.0 corresponde a una vivienda de máxima resistencia.



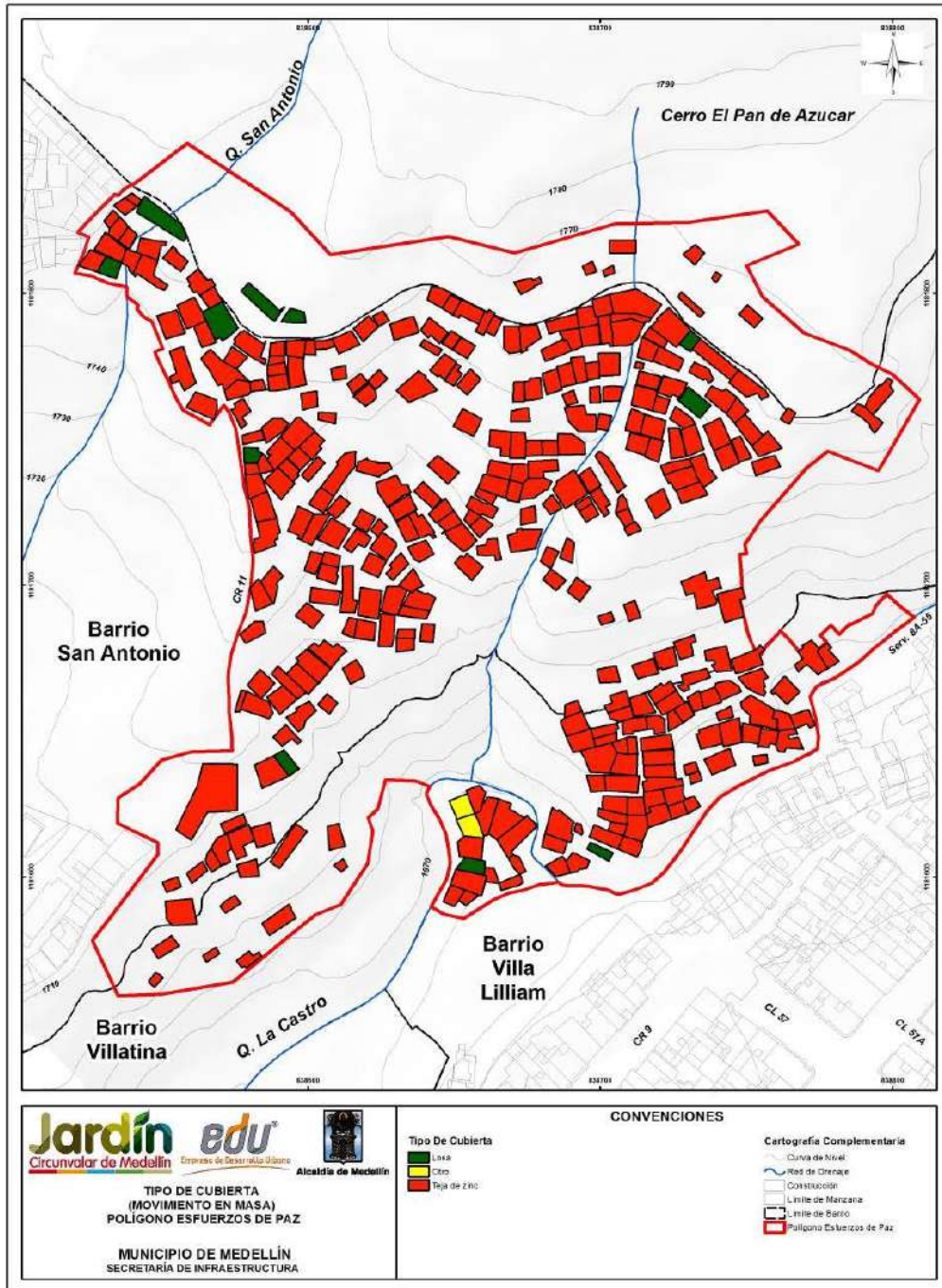
Mapa 49. Localización espacial del tipo de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (29_EDPTipodeEstructura_Medellin_C y 29_EDPTipodeEstructura_Medellin_T)



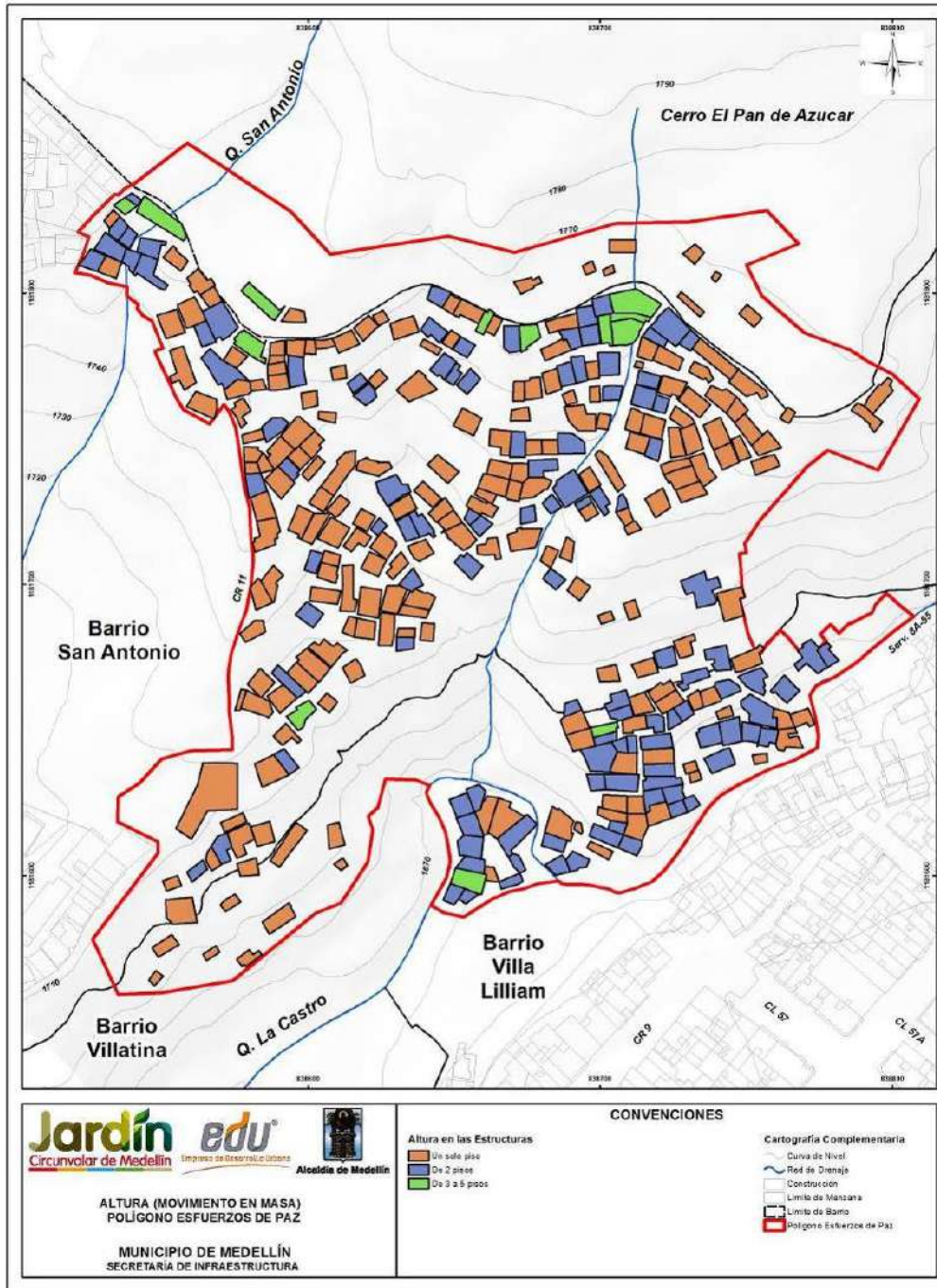
Mapa 50. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (30_EDPDesplantedeFundaciones_Medellin_C y 30_EDPDesplantedeFundaciones_Medellin_T)



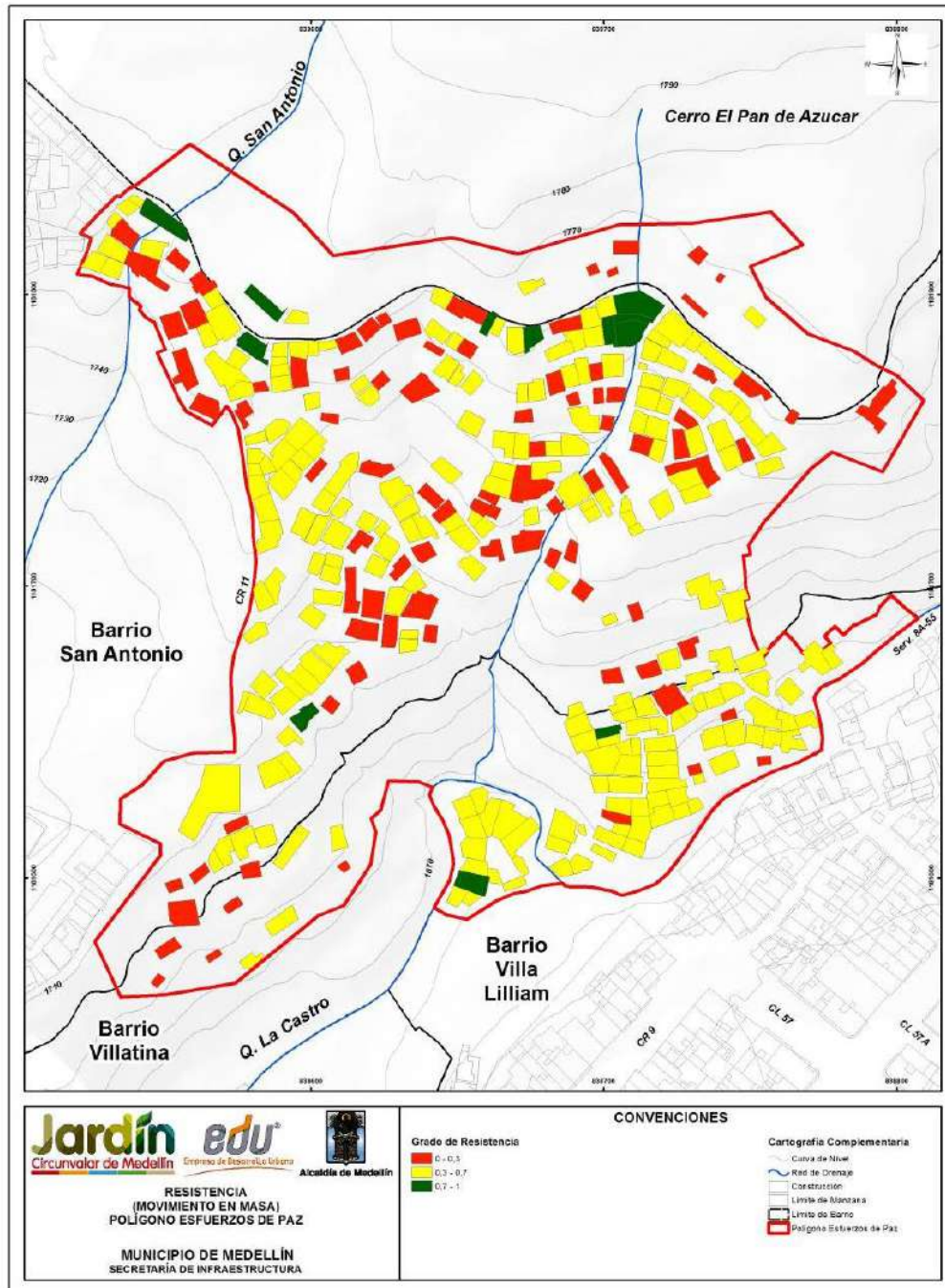
Mapa 51. Localización espacial del estado de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (31_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_C y 31_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_T)



Mapa 52. Localización espacial del tipo de cubierta por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (32_EDPTipodeCubierta_Medellin_C y 32_EDPTipodeCubierta_Medellin_T)



Mapa 53. Localización espacial de la altura de estructura por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (33_EDPAIaturadelaConstruccion_Medellin_C y 33_EDPAIaturadelaConstruccion_Medellin_T)



Mapa 54. Parámetro de resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa (34_EDPMapadeResistencia_Medellin_C y 34_EDPMapadeResistencia_Medellin_T)

16.2.4 Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas

Teniendo en cuenta la propuesta de Guimaraes (2015) y considerando la obtención del factor resistencia de cada una de las estructuras (R) al interior del Polígono Esfuerzos de Paz, observado en el Mapa 54, se procedió a determinar el factor intensidad (Z) a través de los focos de los movimientos en masa más probables que podrían afectar la zona del polígono. Se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años (Mapa 40). Se determinaron las zonas de máxima probabilidad de falla y se evaluó su proximidad al Polígono objeto de estudio. El factor intensidad de los movimientos en masa más probables (Z), que juzga la vulnerabilidad de la estructura por su localización con respecto a su foco de inestabilidad más probable, se determinó mediante la relación entre la distancia real en el terreno (d) y las diferencias de altura (h), ambas medidas entre el foco del deslizamiento y el centroide de las estructuras potencialmente afectadas, resultando el Mapa 55, pudiéndose resaltar lo siguiente.

- ✓ Se observa que el Foco 9 (Figura 198), localizado en la parte alta por fuera del Polígono Esfuerzos de Paz, no generan factores de intensidad al interior del polígono debido a que se ubica en una zona de pendientes moderadas y una masa desprendida desde este punto no tendría la energía suficiente para llegar hasta el polígono. Los Focos 1 y 4 también localizados por fuera del polígono, generan factores de intensidad que van de 0.40 a 0.86, sin embargo, no afectan las viviendas al interior del Polígono Esfuerzos de Paz.
- ✓ Los focos ubicados al interior del Polígono Esfuerzos de Paz, denominados en la Figura 198 como Focos 2, 5, 7, 10, 3, 6, 8 y 11, generan dentro del Polígono Esfuerzos de Paz rangos del factor de intensidad, que van de 0.40 a 0.86. La mayor parte de las viviendas ubicadas en la trayectoria de estos rangos del factor de intensidad, según se puede ver en el Mapa 56, presentan vulnerabilidad física estructural alta por movimientos en masa, es decir, en el rango que va de 0.776 a 1.0.

En conjunto con la resistencia (R) de cada estructura, el factor intensidad de los movimientos en masa más probables (Z), permite obtener la vulnerabilidad estructural de cada elemento por medio de la siguiente expresión:

$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

La vulnerabilidad estructural se expresa en esta metodología como un número adimensional que varía entre 0 y 1, donde 1 es el valor de máxima vulnerabilidad estructural. Este valor bien puede representar un factor de daño. La Tabla 73 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.

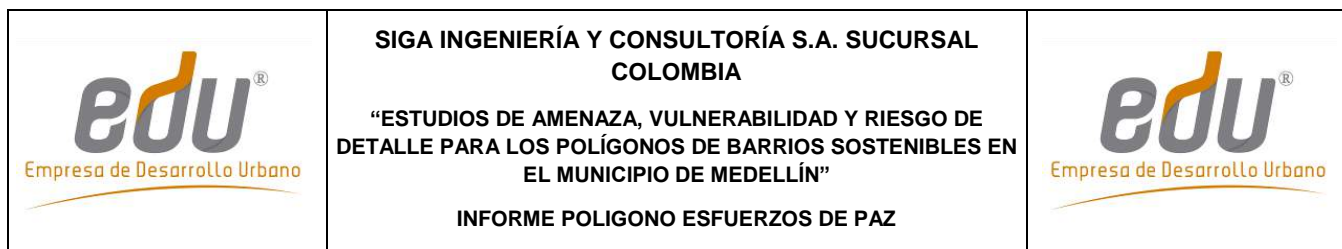
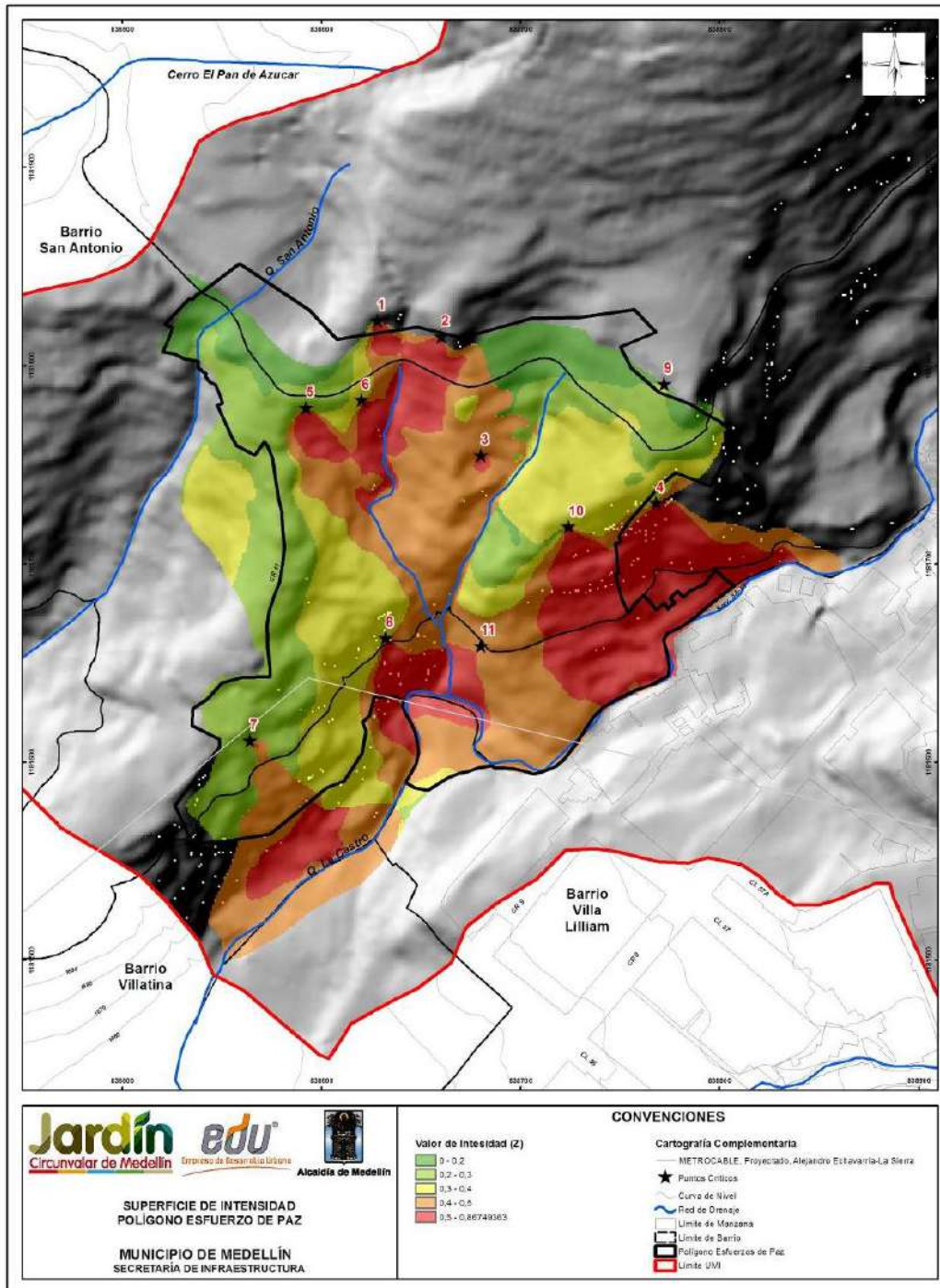


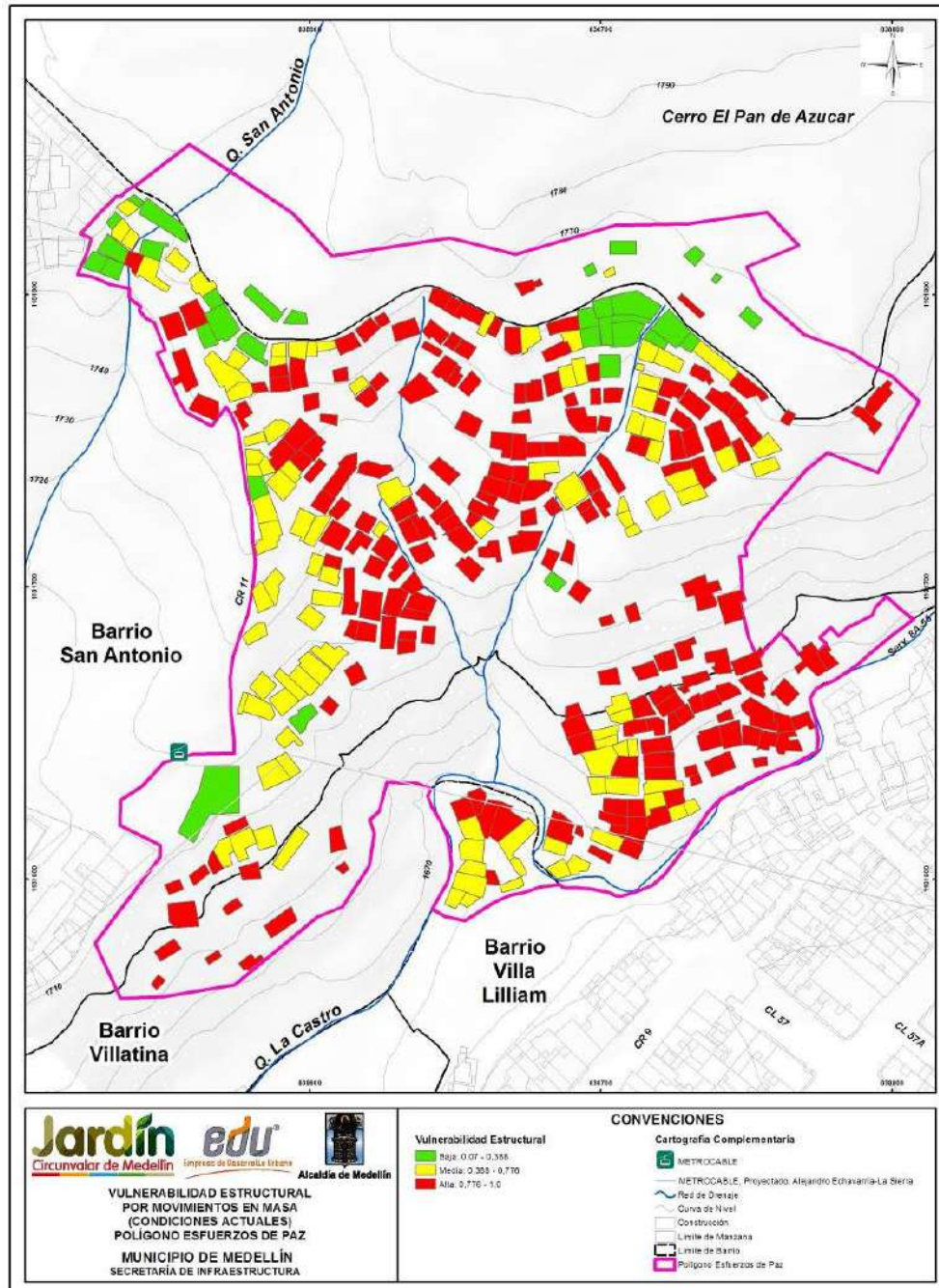
Tabla 73. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría de la Vulnerabilidad	Rango de la Vulnerabilidad	Descripción
Baja	0.0 – 0.388	Estructuras que presentarían condiciones de servicio con ligeros daños los cuales pueden ser solucionados con labores de mantenimiento y repotenciación
Media	0.388 – 0.776	Destrucción parcial de la estructura. Pérdida del servicio de las estructuras. A pesar de que las mismas puedan quedar en pie, el sistema estructural se verá seriamente afectado. Pérdida de elementos de estructurales y de apoyo.
Alta	0.776 – 1.0	Destrucción total de la estructura

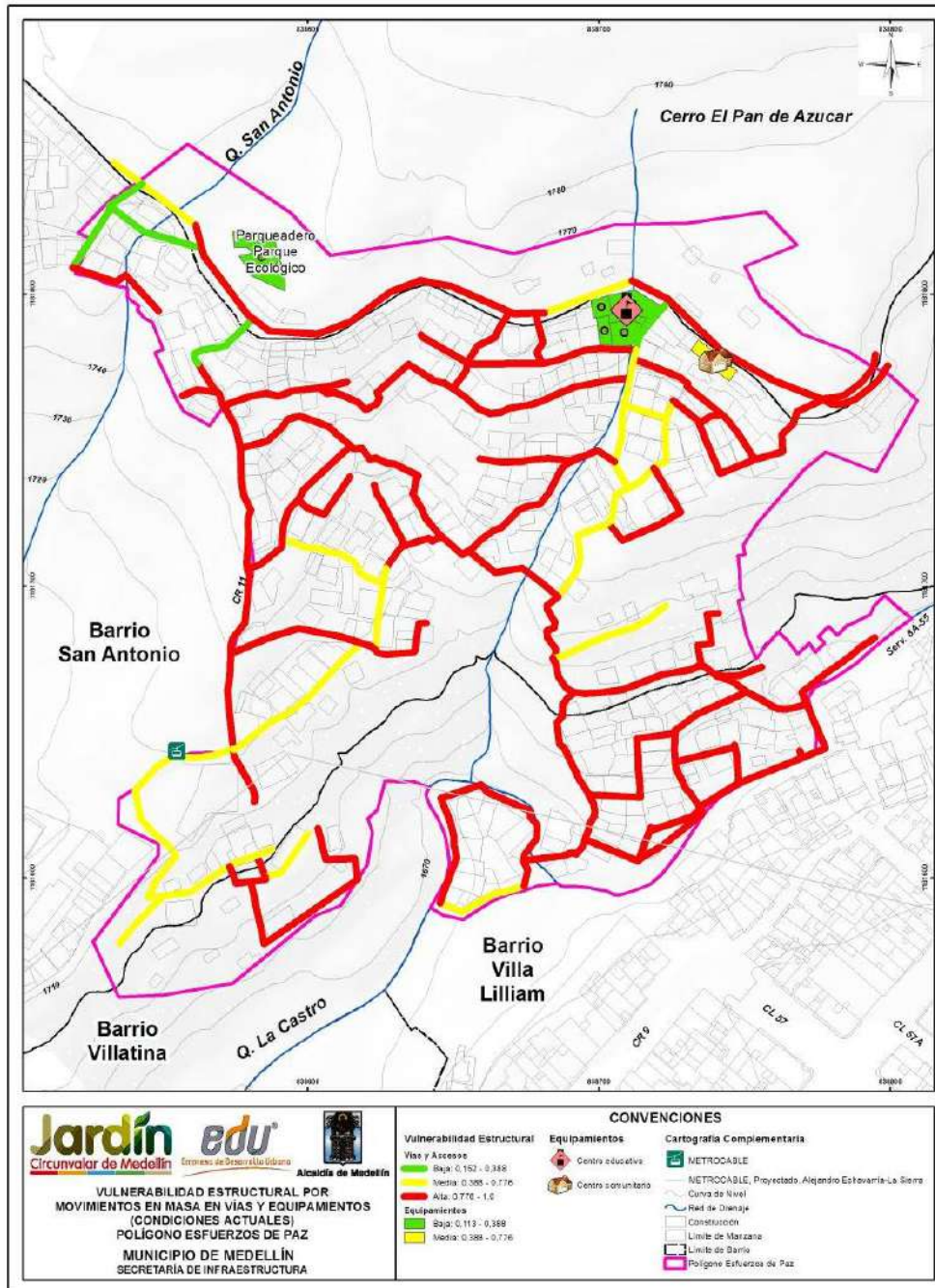
El Mapa 56 y el Mapa 57 presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso del Polígono Esfuerzos de Paz, respectivamente, clasificando entre baja, media y alta según el criterio mostrado en la Tabla 73.



Mapa 55. Factor intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Esfuerzos de Paz (EDPSuperficie de Intensidades ZUMI_Medellin_C)



Mapa 56. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa del Polígono Esfuerzos de Paz
(40_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 40_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 57. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono Esfuerzos de Paz
(52_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_Cy
52_EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

La Figura 216 muestra la distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras por movimientos en masa presentada en el Mapa 56. Se ilustra que el 60% de las estructuras presentes al interior del Polígono Esfuerzos de Paz presentan una vulnerabilidad alta, el 30% presentan una vulnerabilidad media y el 10% presentan vulnerabilidad baja. Las estructuras con vulnerabilidad alta se presentan en todo el polígono, con viviendas en su mayoría de un solo piso construidas y construidas en mampostería (42%) y en madera, lata y cartón (57%).

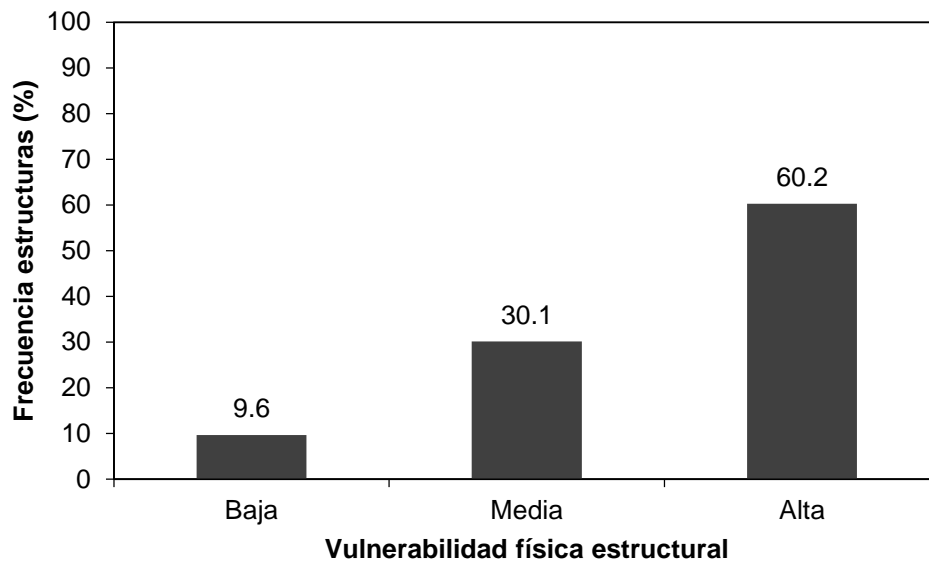


Figura 216. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras

Además de la vulnerabilidad física estructural, la metodología propuesta por Uzielli (2006) permite estimar la vulnerabilidad de las personas (V_p) que se encuentran al interior de las estructuras, en función de la vulnerabilidad estructural (V_e) mediante la expresión:

$$V_p = f(V_e) = 0.0014 \cdot e^{6.07 \cdot V_e}$$

La vulnerabilidad de las personas se expresa en como un número adimensional que varía entre 0 y 0.6, donde 0.6 es el valor de máxima vulnerabilidad de las personas. Finalmente, la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras por efectos de movimientos en masa, se podrá categorizar como se muestra en la Tabla 74.



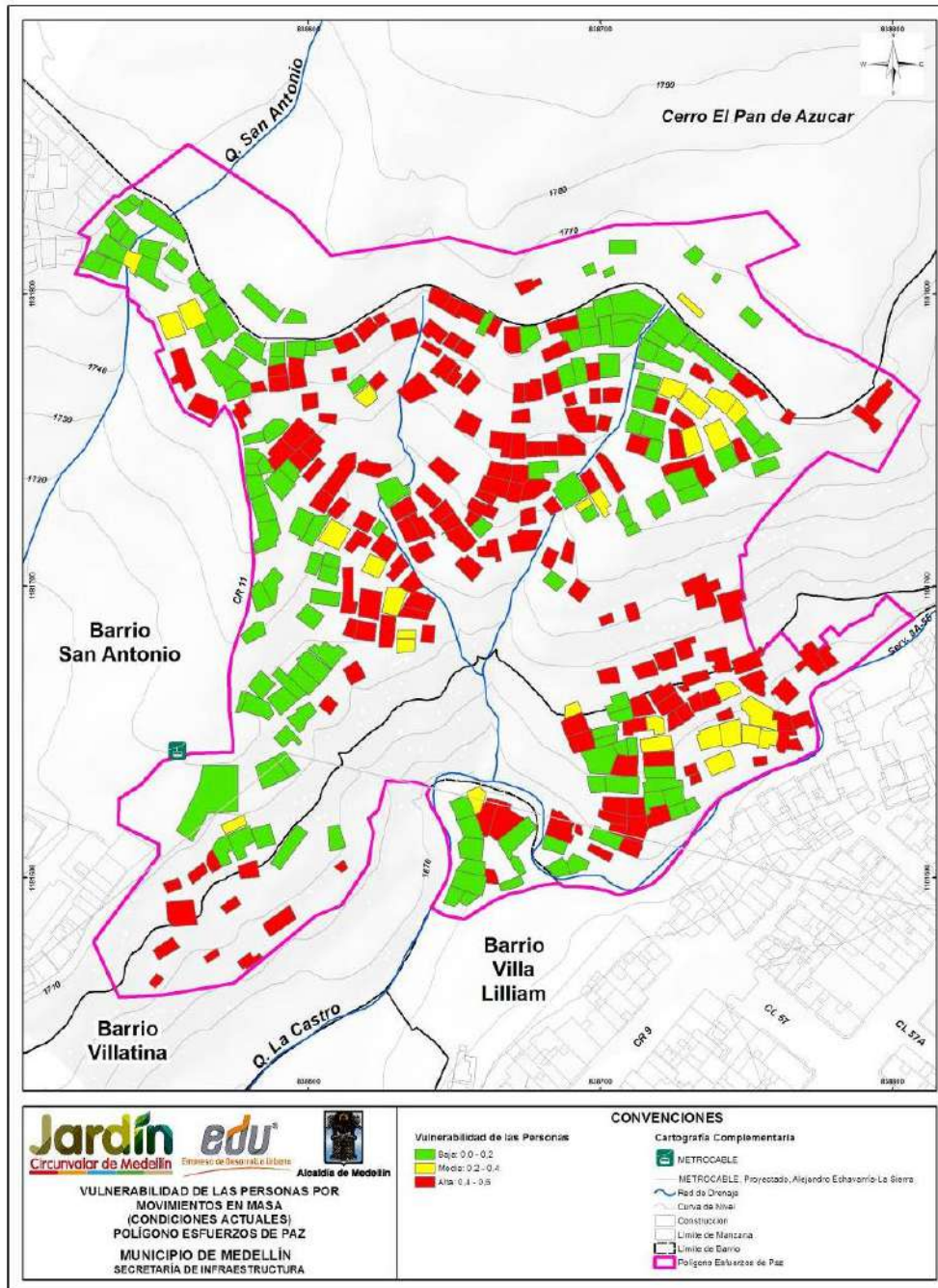
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Tabla 74. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría de la Vulnerabilidad	Rango de la Vulnerabilidad	Descripción
Baja	0.0 – 0.2	Lesiones leves en las personas. A pesar de las lesiones, las personas se mantienen conscientes de lo sucedido y pueden mantenerse en pie sin ningún tipo de asistencia.
Media	0.2 – 0.4	Lesiones moderadas a graves en las personas. Las personas pueden perder ligeramente la conciencia o entrar en estados de shock temporales. Las lesiones pueden ir entre cortes y fracturas pueden requerir de asistencia médica que dejan a la persona sin capacidad de movilizarse de forma temporal.
Alta	0.4 – 0.6	Lesiones muy graves como invalides o pérdida de miembros corporales. Pérdida de vida por efecto del deslizamiento.

En el Mapa 58 se presenta el análisis de vulnerabilidad de las personas del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. Se observa que de las 342 estructuras, 169 presentan alta vulnerabilidad de personas (49%), 143 presentan vulnerabilidad de personas baja (42%) y 30 presentan vulnerabilidad media (9%). Las estructuras que presentan una alta vulnerabilidad de personas coinciden con las que presentan una alta vulnerabilidad física y se concentran en las áreas de máximas pendientes. Considerando el estado de las estructuras, se tiene que el 65% de las estructuras que presentan alta vulnerabilidad de personas se caracterizan por estar construidas en madera.



Mapa 58. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa del Polígono Esfuerzos de Paz
 (41_EDPVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y 41_EDPVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)

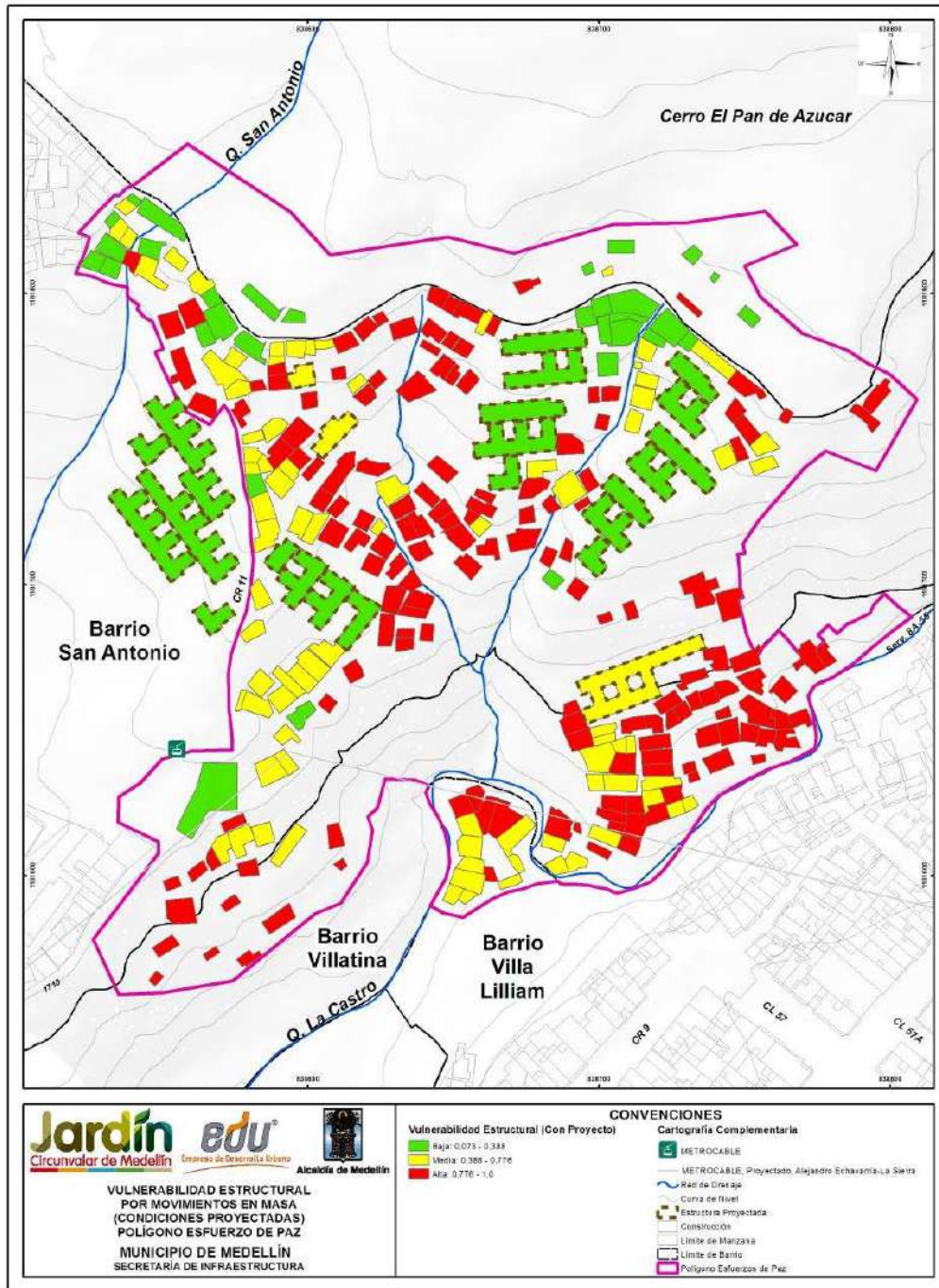
Ahora, considerando las estructuras que harán parte del Proyecto Barrios Sostenibles, se hizo una evaluación adicional de la vulnerabilidad. Para esta modelación se consideró que las nuevas estructuras de dicho proyecto tendrán unas características mejores que las estructuras existentes, al considerar que se trataría de estructuras de muy buen estado, con más de tres niveles en concreto reforzado que cumplirán las respectivas normas técnicas, entre ellas la Norma NSR-10 y que adicionalmente deberán estar cimentadas sobre fundaciones profundas de más de 10 m de profundidad. Por tal motivo, y considerando las calificaciones de la metodología propuesta para el análisis de vulnerabilidad, las nuevas estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles presentan las siguientes características (Tabla 75).

Tabla 75. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono Esfuerzos de Paz

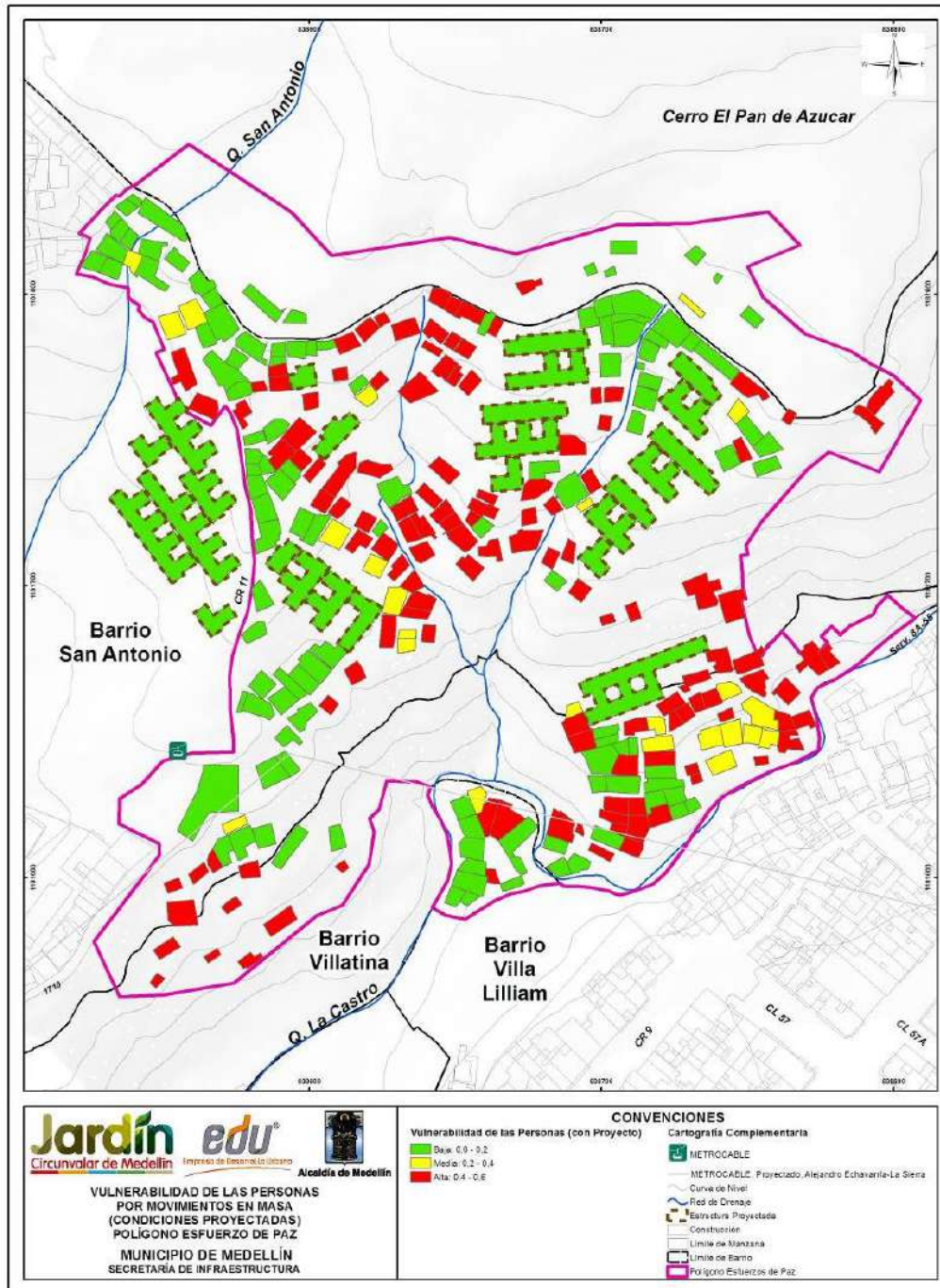
Factores de vulnerabilidad estructural	Calificación
Estado de la estructura (ξ_{man})	1.50
Altura de la estructura (ξ_{alt})	0.90
Nivel de fundación de la estructura (ξ_{sfd})	1.05
Tipo de estructura (ξ_{est})	1.50

Teniendo en cuenta lo anterior, el factor de resistencia (R) para estas estructuras es de 1.20. A este factor se le aplicó un factor de seguridad de 1.20, considerando cualquier factor constructivo y de diseño, enfocado en tener un factor de resistencia conservador, de tal manera que el valor de resistencia finalmente usado fue de 1.0 para todas las estructuras. En el Mapa 59 y el Mapa 60, se presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad mostrados en el Mapa 55. Se observa que las nuevas estructuras se construirán en la parte alta, a lo largo de la zona central del polígono, donde se tienen altas pendientes del terreno con inclinaciones mayores que 15° y estructuras con vulnerabilidad estructural alta.

Se observa que las nuevas estructuras quedan con vulnerabilidad que variarían de medias a bajas. Lo ideal sería que quedaran con vulnerabilidad baja, pero debido a la ubicación de estas estructuras con respecto a los focos de inestabilidad más probables, se tienen factores de intensidad incluso superiores a 0.4, tal como se puede ver en el Mapa 55 los cuales afectan a las estructuras.



Mapa 59. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (EDPVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)



Mapa 60. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Esfuerzos de Paz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (EDPVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)

16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Para el caso de Inundaciones y Avenidas Torrenciales, la vulnerabilidad física se estimará tomando como fundamento la metodología empleada por Thouret et al. (2013) para la evaluación del riesgo por este tipo de fenómenos en Arequipa, Perú. Se considera aplicable esta metodología en la zona del presente estudio dada la gran similitud en tipología estructural que existe en ambas sitios así como la similitud en los fenómenos estudiados.

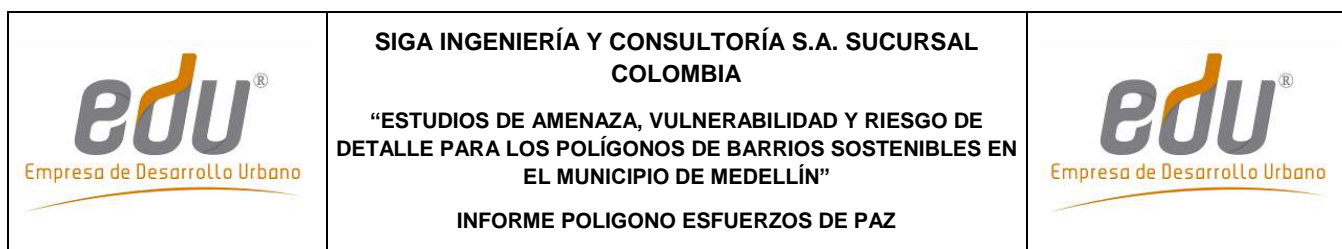
Según esta metodología, la vulnerabilidad física está definida a partir del Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI, por sus siglas en inglés), el cual a su vez está definido según el índice de Vulnerabilidad de la Edificación (BuV). Este último depende estrictamente de las características de las edificaciones, considerando los siguientes tres criterios principales: el tamaño de la edificación, la calidad y/o mantenimiento de su construcción, y la densidad poblacional.

El tamaño del edificio es evaluado a partir del número de niveles, y la calificación de su vulnerabilidad es mayor para aquellas edificaciones que presentan un número de niveles menor. Así, para un edificio de 4 o más niveles, su Factor de Vulnerabilidad por Tamaño de Edificación (FVT) será de 1; para uno de 3 niveles será de 2, para uno de 2 niveles será de 3 y finalmente para uno de 1 nivel será de 4, el mayor de todos.

Por su parte, en Thouret et al. (2013) el factor de vulnerabilidad por la calidad de la construcción (FVC) es evaluada de 1 a 3 según el grado de mantenimiento que presente la edificación. Se asigna una calificación de 1 a aquellas construcciones que tengan buen mantenimiento, 2 a aquellas que tengan un mantenimiento aceptable o medio, y 3 a aquellas que presenten un mantenimiento deficiente. Para el caso en estudio, se considerará para la calidad de la construcción el tipo de material de la vivienda y el estado de la estructura, dado que estos elementos representan con mayor fidelidad el grado de resistencia de la estructura frente a los fenómenos estudiados en la zona. La calificación a adoptar para cada combinación del tipo de material-estado se presenta en la Tabla 76.

Tabla 76. Factor de vulnerabilidad por calidad de la edificación para inundaciones y avenidas torrenciales

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTADO DE LA ESTRUCTURA	FACTOR DE VULNERABILIDAD POR CALIDAD DE LA ESTRUCTURA (FVC)
Muy ligera (lata y cartón) o Ligera (Madera)	Muy mala a Mala	3
	Media	3
	Buena o Muy Buena	2
Media (Concreto y madera) o Mampostería	Muy mala a Mala	3
	Media	2
	Buena o Muy Buena	2
Concreto (con o sin refuerzo)	Muy mala a Mala	2
	Media	2
	Buena o Muy Buena	1



Para el factor por Densidad de Población (FVD), en Thouret et al. (2013) se emplea una calificación de 1 a 4. Se adopta un valor de 4 para altas densidades, de 3 para densidades medias, de 2 para densidades bajas y de 1 para densidades muy bajas.

A partir de estos tres factores, FVT, FVC y FVD, se estima el Índice de Vulnerabilidad de la estructura (BuV) según la siguiente expresión, el cual tomará valores entre 1 y 48:

$$\text{BuV} = \text{FVT} \times \text{FVC} \times \text{FVD}$$

A partir del Índice BuV se estima el Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI), tal como se presenta en la Tabla 77.

Finalmente, para efectos del presente estudio, la vulnerabilidad será clasificada en alta, media y baja, reuniendo los RvI 1 y 2 en Vulnerabilidad Baja, el RvI 3 en Vulnerabilidad Media, y los RvI 4 y 5 en Vulnerabilidad Alta.

Tabla 77. Cálculo Índice de vulnerabilidad residencial (RvI) y la vulnerabilidad física a partir de BuV

BuV	RvI	Vulnerabilidad Física
1 a 3	1	Baja
4 a 6	2	Baja
7 a 12	3	Media
13 a 24	4	Alta
25 a 48	5	Alta

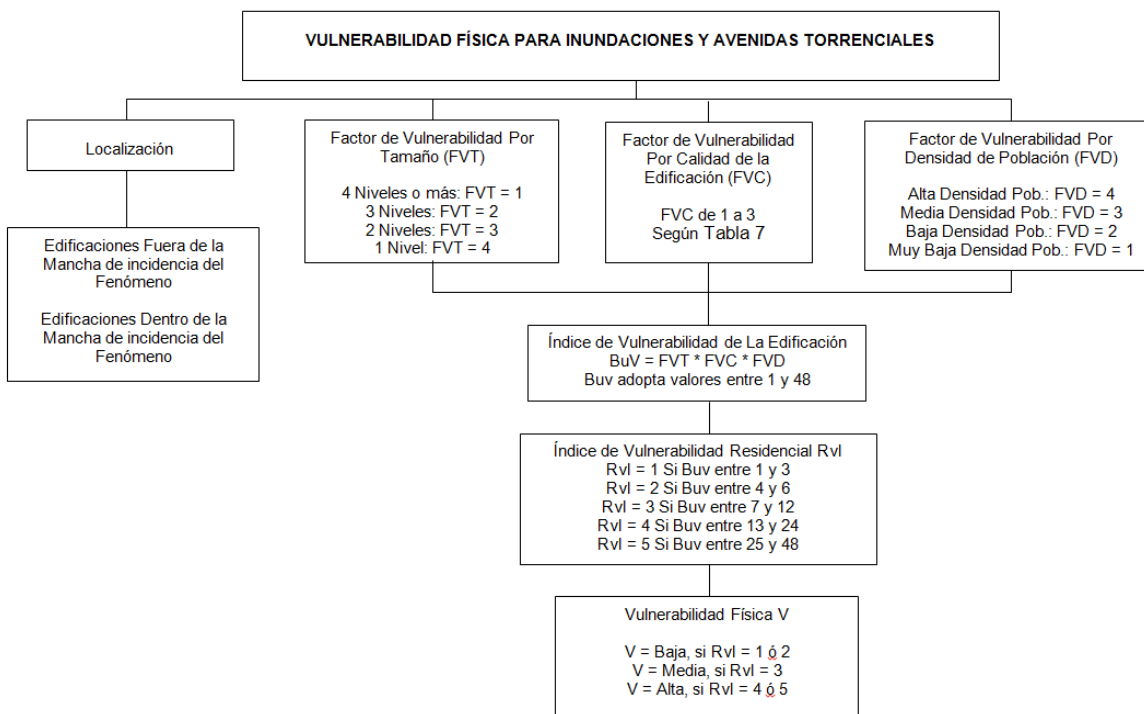


Figura 217. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales

Para el caso de inundaciones y avenidas torrenciales, las etapas son las anteriormente descritas. La diferencia consiste en que se incluye un atributo adicional para cada estructura, que es la densidad habitacional. Este atributo fue extraído del documento técnico elaborado por la UPB para la EDU.

Del Mapa 61 al Mapa 65 se presentan los mapas de atributos para cada estructura, los cuales corresponden a Tipo de Estructura, Estado de la Estructura, Altura de la Construcción, Densidad de Población y Grado de Vulnerabilidad a Inundación.

Del análisis e interpretación de la información existente en la base de datos, se pueden hacer entonces las siguientes anotaciones:

- ✓ En el Polígono Esfuerzos de Paz más de la mitad de las estructuras poseen un tipo de estructura en Mampostería con un 59.94% y el 39.77% corresponde a las construcciones Ligeras. En menor porcentaje se encuentran las estructuras en Concreto con un 0.29% (Tabla 78).
- ✓ El Polígono Esfuerzos de Paz presenta en su mayoría estructuras en estado medio, esto significa que estructuralmente se cuentan con viviendas de materiales tradicionales (mampostería) en un estado aceptable, sin llegar a estar completamente buenos. Esta calificación de estado Medio tiene un porcentaje de

viviendas de 62.57%. El estado que le sigue es el Malo con un 34.21%. En menor porcentaje se encuentran las estructuras Buenas con el 3.22% (Tabla 79).

- ✓ En el Polígono Esfuerzos de Paz más de la mitad de las viviendas inspeccionadas poseen un solo piso con un 62.87% del total. Le siguen las construcciones de dos pisos con un 32.95%. En menor porcentaje se encuentran las edificaciones de tres pisos y las edificaciones de cuatro pisos y más, con un 3.51% y 0.29% respectivamente (Tabla 80).
- ✓ Más la mitad de las estructuras presentes en el Polígono Esfuerzos de Paz tienen una densidad de población baja con un 83.04%. Le siguen las construcciones con densidad media con un 10.53%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades muy bajas y altas con un 5.26% y 1.17% respectivamente (Tabla 81).

Tabla 78. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	136	39.77
Mampostería	205	59.94
Concreto	1	0.29
Total	342	100



Tabla 79. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Mala	117	34.21
Media	214	62.57
Buena	11	3.22
Total	342	100

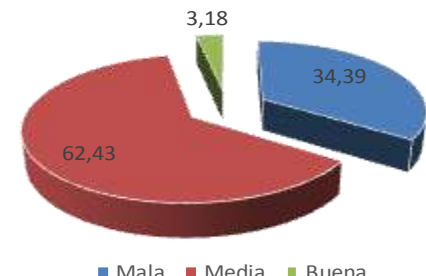


Tabla 80. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

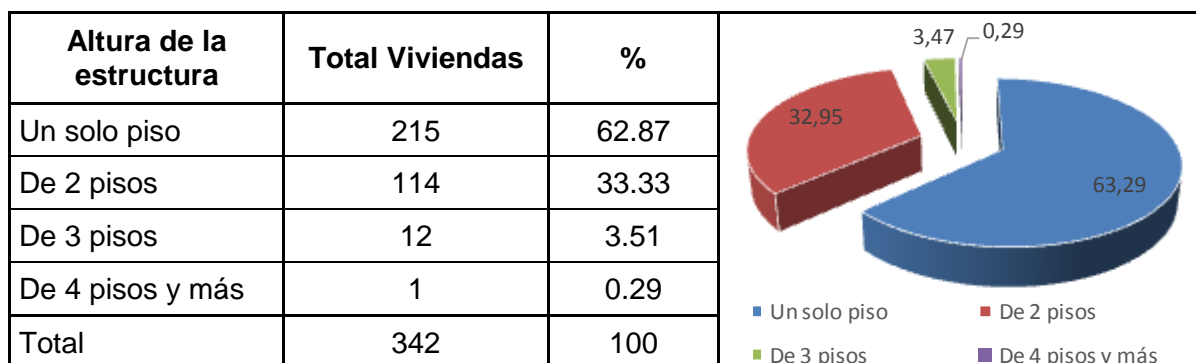
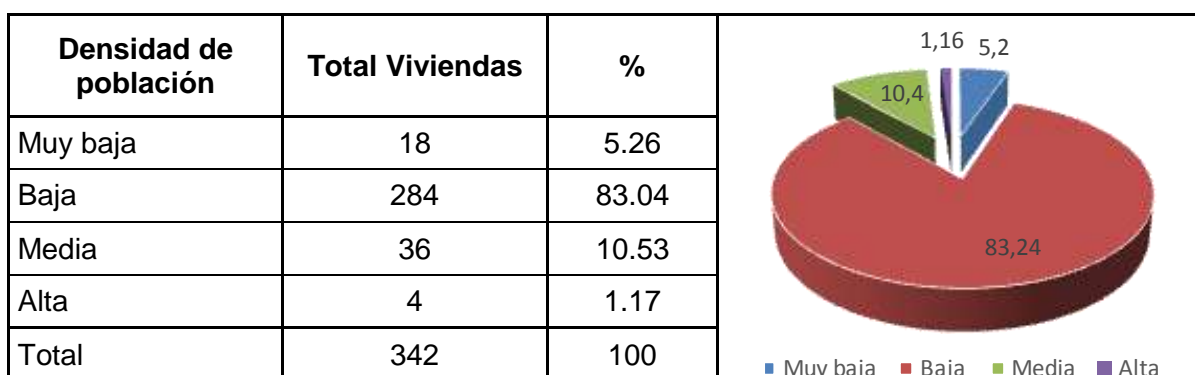
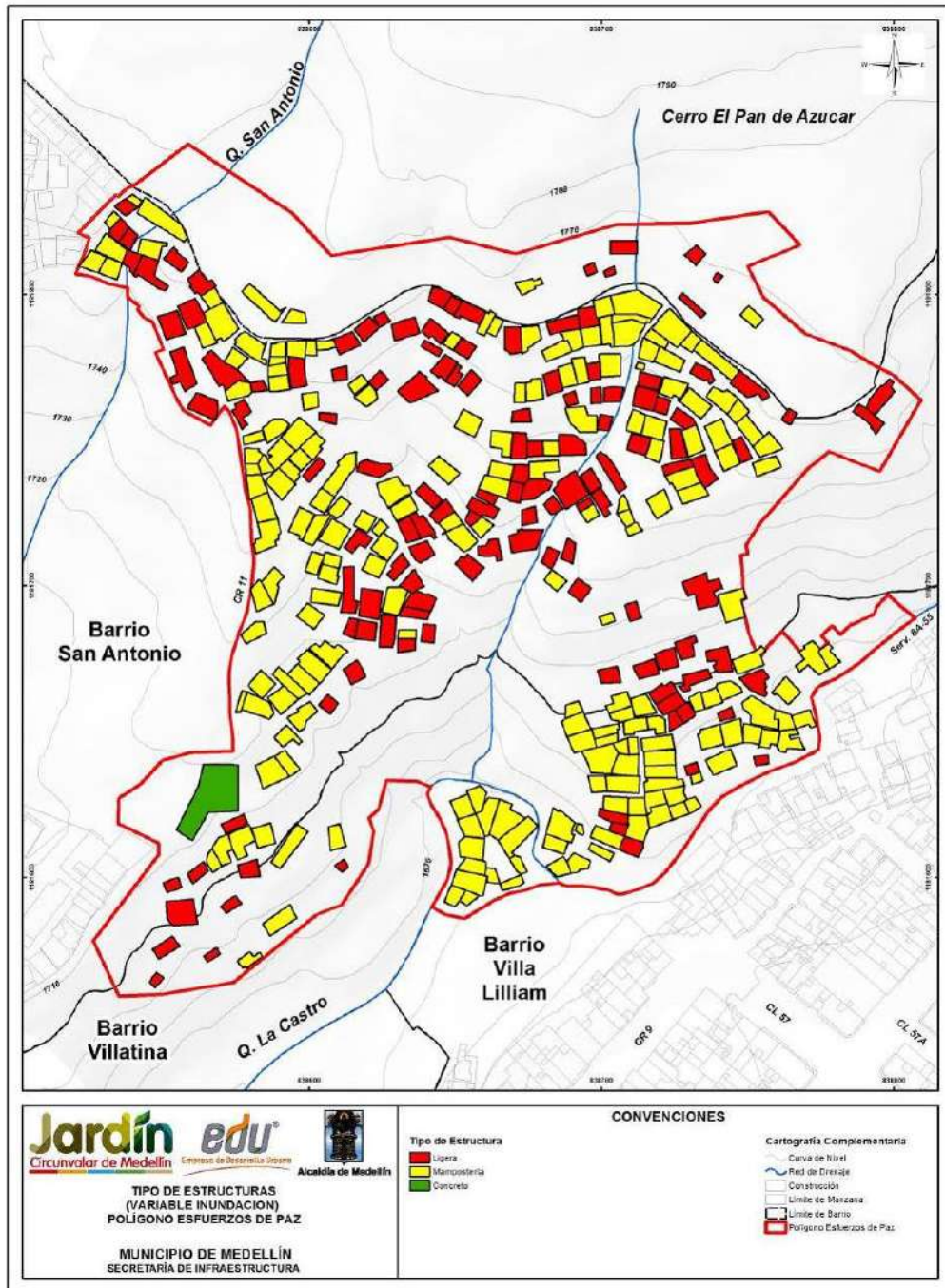


Tabla 81. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales

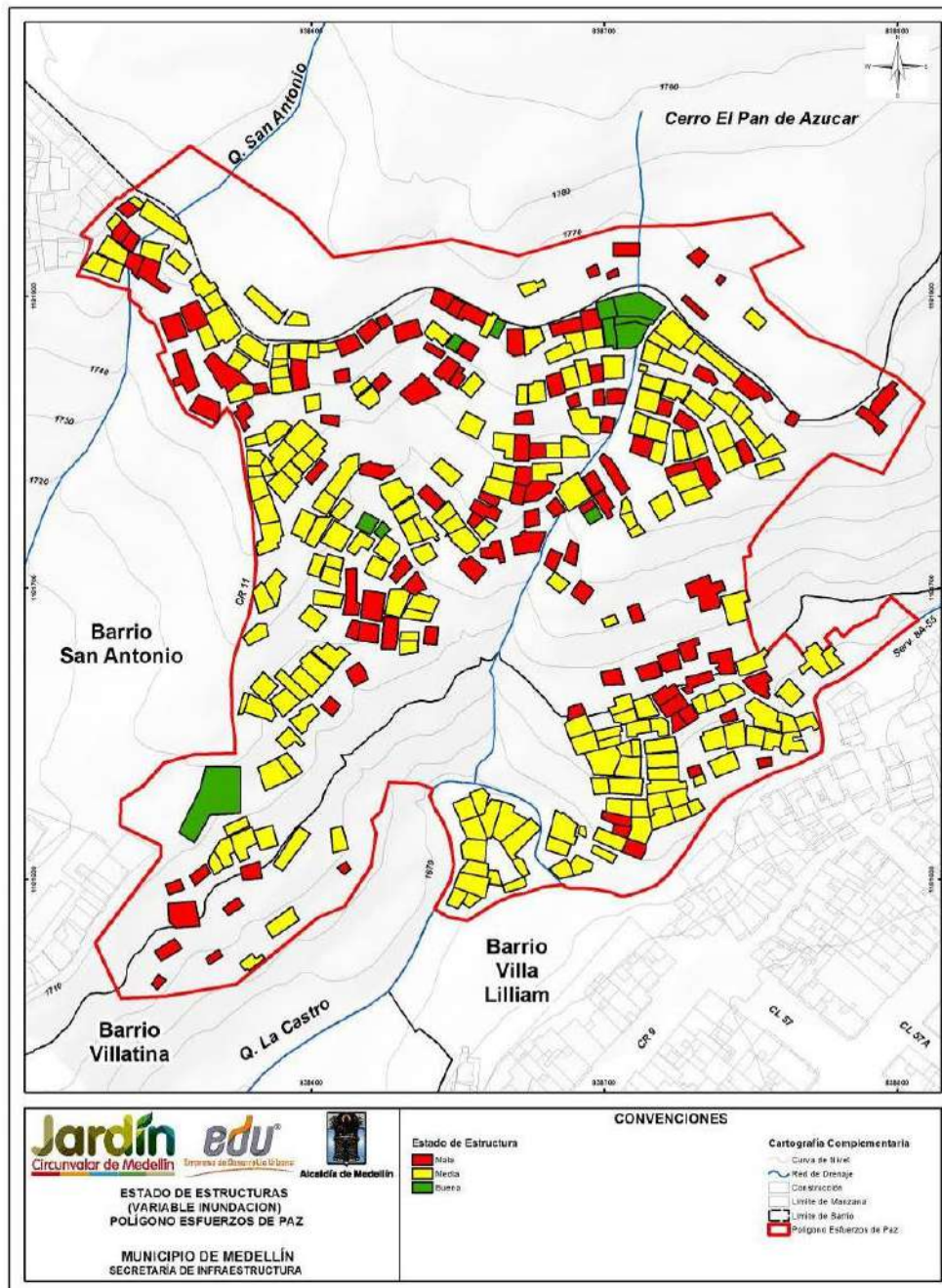


Finalmente con la información y con la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por inundaciones y avenidas torrenciales, se determinó el índice de vulnerabilidad residencial de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. El Mapa 65 presenta el mapa de índice de vulnerabilidad residencial para las estructuras del Polígono Esfuerzos de Paz.

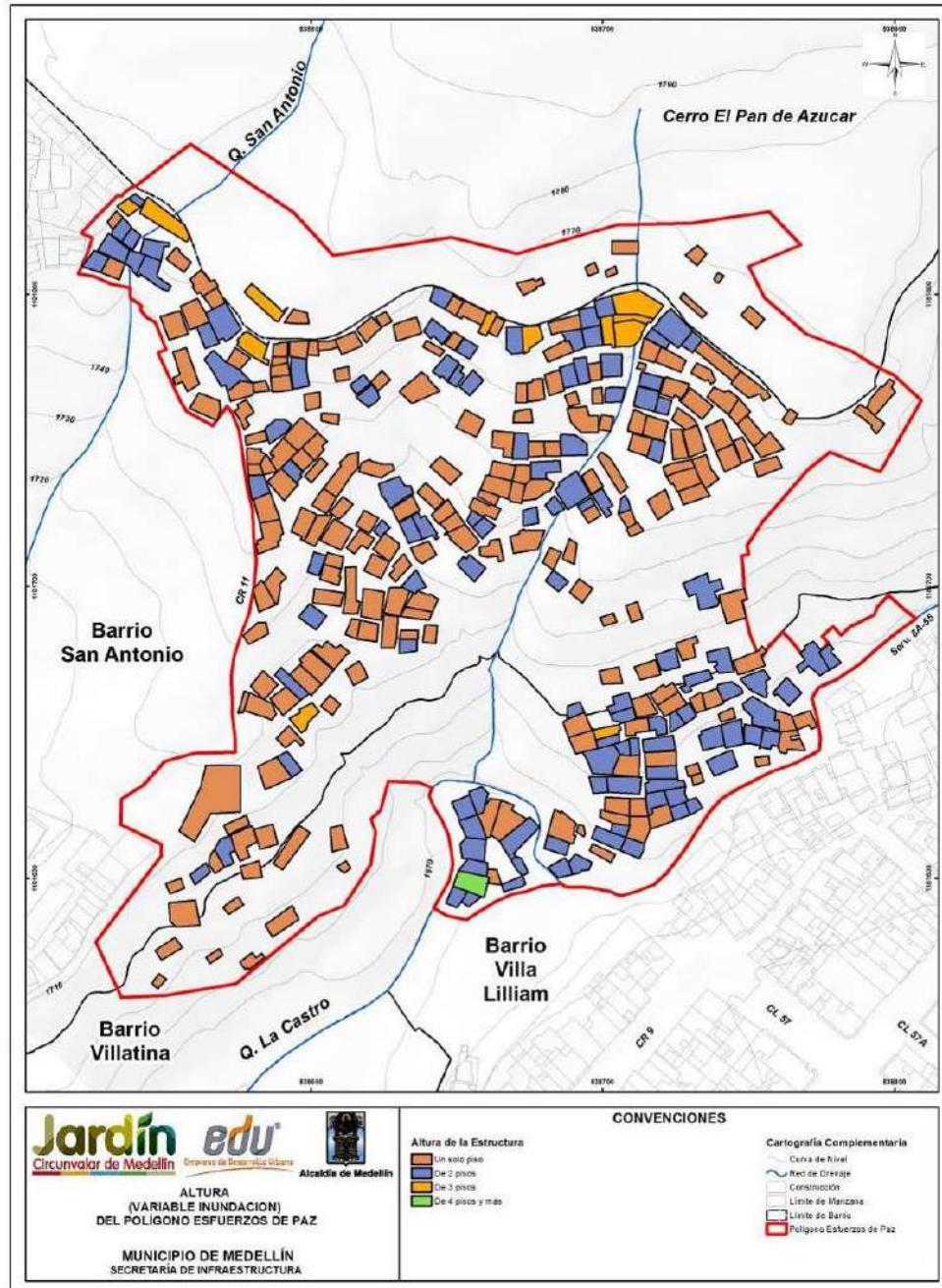
De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono Esfuerzos de Paz. Para el caso de las vías, se tiene que el Factor de Vulnerabilidad por Densidad (FVD) y el Factor de Vulnerabilidad por Tamaño (FVT) son constantes con los valores 4 y 4 respectivamente, asociados a Alta Densidad debido a la circulación de personas y vehículos y considerando que son estructuras de una planta. Para el caso de los equipamientos, su grado de vulnerabilidad sigue siendo el indicado por la misma metodología y factores aplicados en el análisis de vulnerabilidad de las edificaciones. En el Mapa 67 se presenta el resultado del análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones y torrencialidad en el Polígono Esfuerzos de Paz para las vías de acceso y equipamientos.



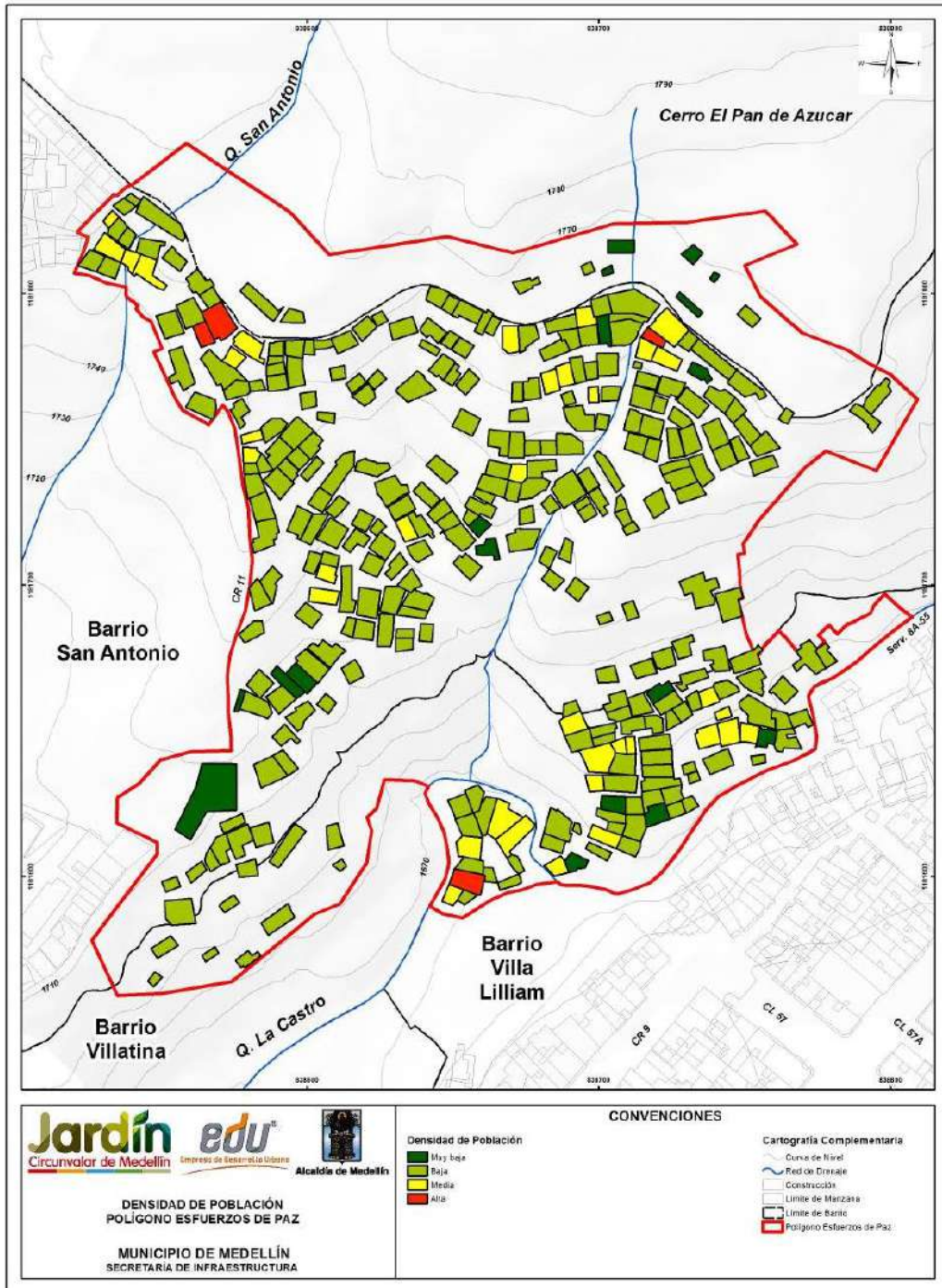
Mapa 61. Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz (35_EDPTipodeEstructura_Medellin_C y 35_EDPTipodeEstructura_Medellin_T)



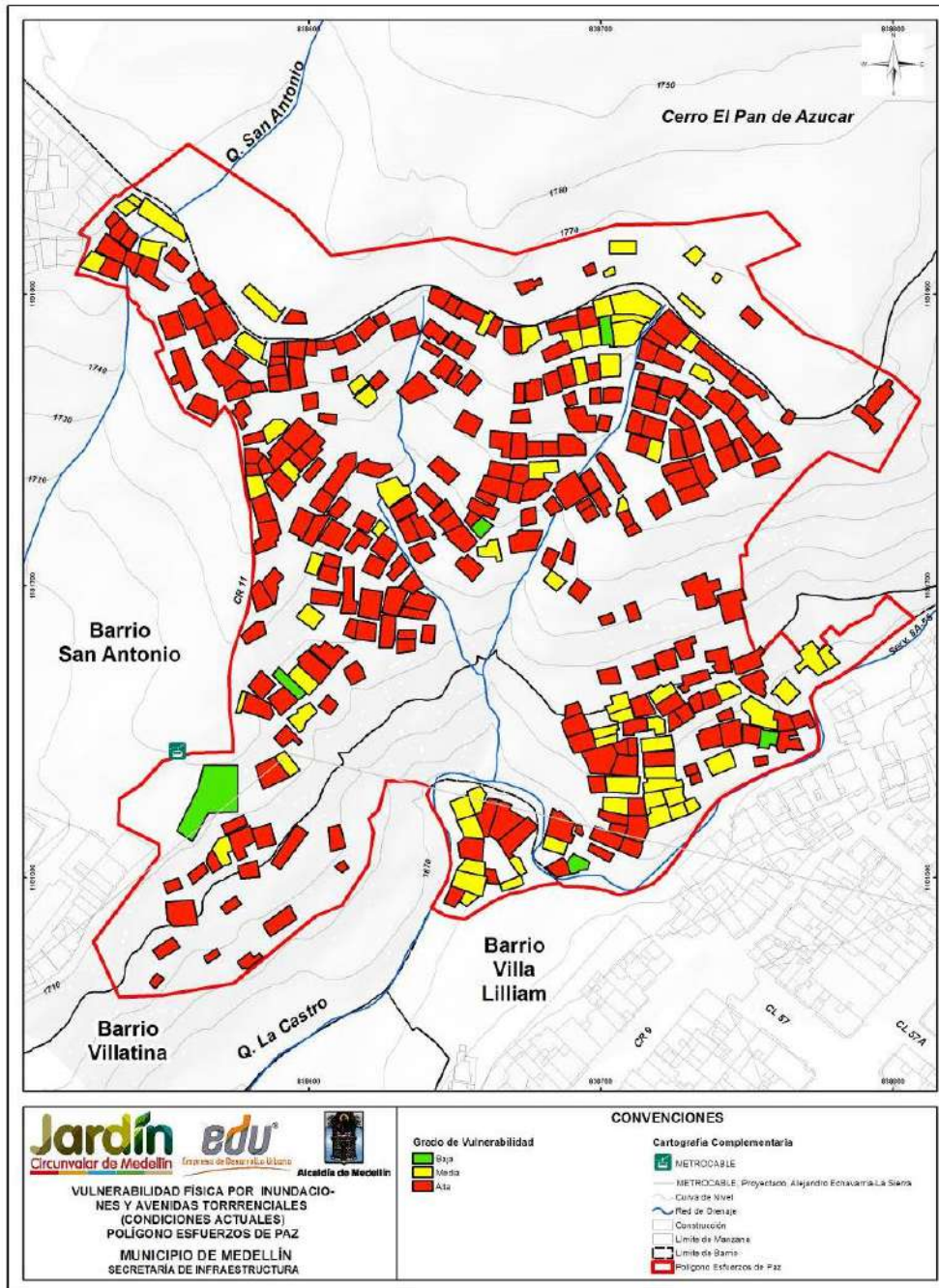
Mapa 62. Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz (36_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_C y 36_EDPEstadodelaEstructura_Medellin_T)



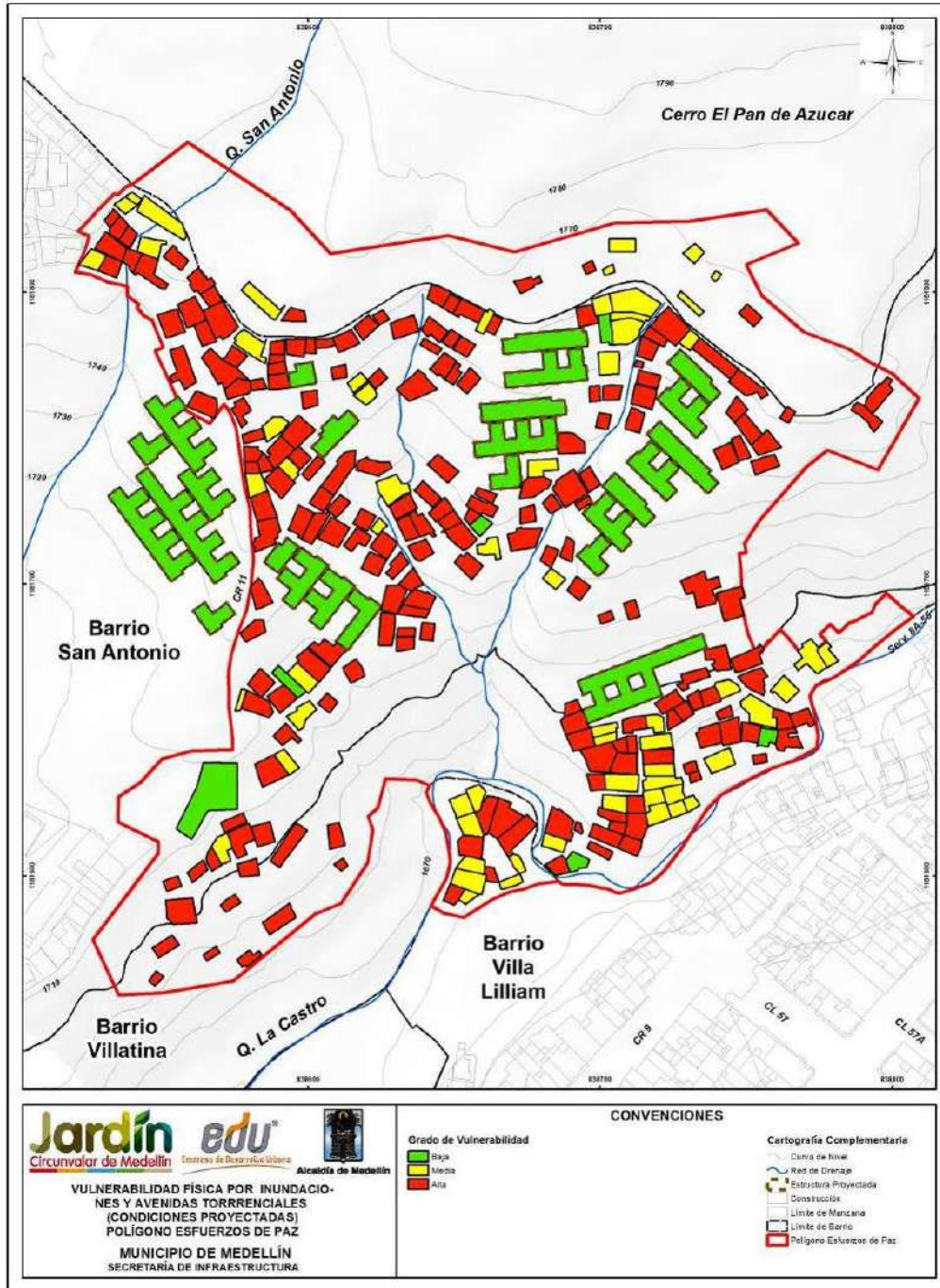
Mapa 63. Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono Esfuerzos de Paz
(37_EDPAIuradelaConstrucción_Medellin_C y 37_EDPAIuradelaConstrucción_Medellin_T)



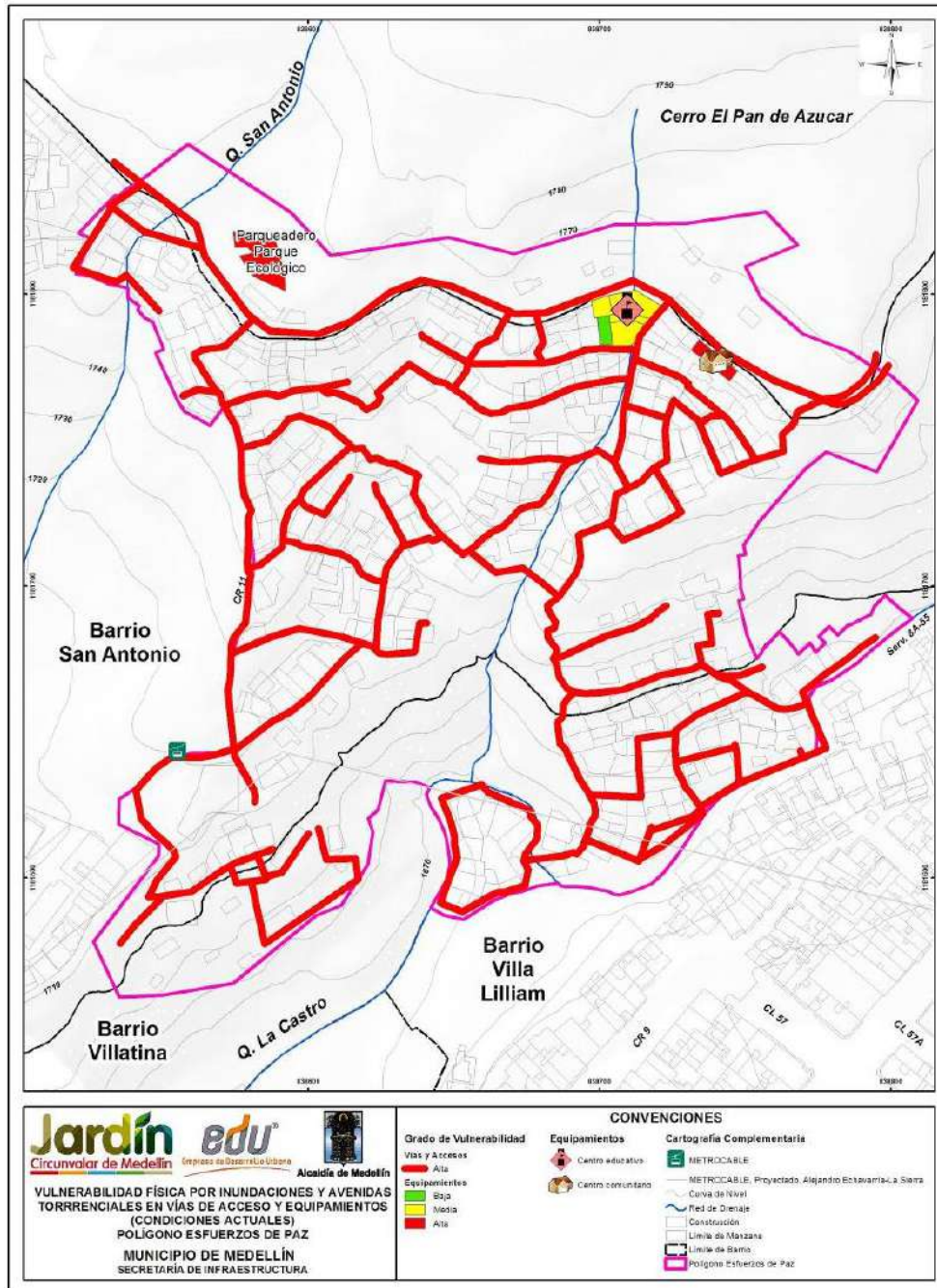
Mapa 64. Localización espacial la densidad de la población en el Polígono Esfuerzos de Paz (38_EDPDensidaddePoblación_Medellin_C y 38_EDPDensidaddePoblación_Medellin_T)



Mapa 65. Análisis de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz
(42_EDPVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 42_EDPVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 66. Análisis de vulnerabilidad para inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz con el nuevo proyecto Barrios Sostenibles (EDPVulnerabilidadFísica,InundacionesyAvenidasTorrencialesProyecto_Medellin_C)



Mapa 67. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las Vías de Acceso y Equipamientos (53_EDPVulnerabilidadInunyAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_C y 53_EDPVulnerabilidadInunyAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_T)

16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS

De la Tabla 82 a la Tabla 84 se presenta el registro fotográfico tomado en el polígono Esfuerzos de Paz.

Tabla 82. Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz

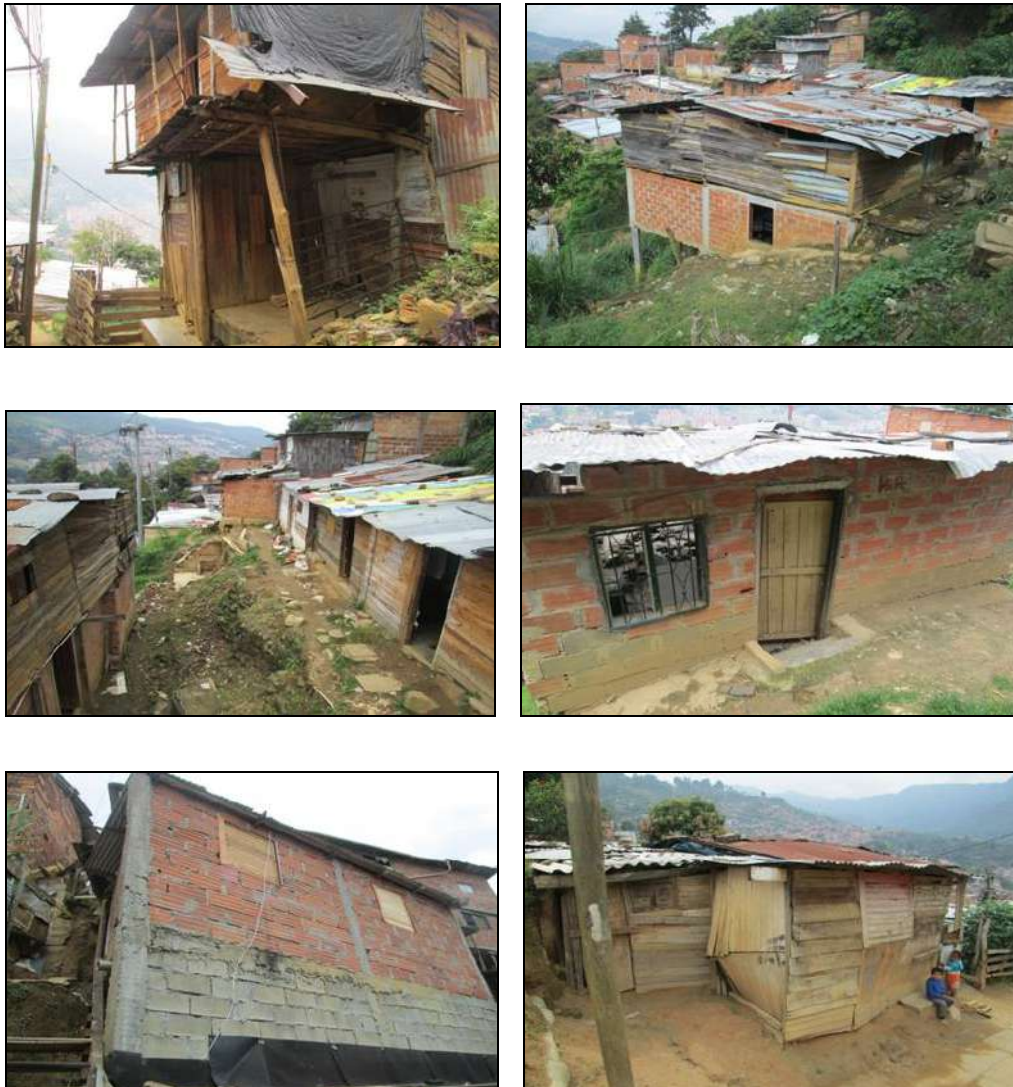




Tabla 83. Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz (Continuación)



Tabla 84. Registro fotográfico en el Polígono Esfuerzos de Paz (Continuación)



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

17. RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

17.1 ASPECTOS GENERALES

Se entiende como riesgo aceptable aquel nivel que los individuos o comunidades se muestran dispuestos a aceptar sin invertir recursos para la contención del mismo. El riesgo admisible o tolerable, por otro lado, es el nivel de riesgo hasta el cual el individuo o la comunidad están dispuestos a aceptar a cambio de ciertos beneficios o con cierta cantidad de inversión.

En el caso del Proyecto Barrios Sostenibles, el riesgo aceptable será el requerido para comparar cuando se tenga la evaluación de las condiciones actuales de la ladera, mientras que el riesgo admisible será aquel que sirva de comparación para cuando se tengan las condiciones de mitigación a través de la implementación de las medidas estructurales y no estructurales.



Actualmente, en Medellín no se tiene una categorización en términos de lo que corresponde a riesgo aceptable o admisible y en el mundo estos valores pueden variar dependiendo, por ejemplo, de la importancia de la obra y la vida útil de la misma. Whitman (1987) cuestionó la existencia de padrones o niveles para establecer el riesgo admisible, y en caso de que los mismos se fijen, podría resultar peligroso establecer un criterio inflexible que podría implicar durante la etapa de diseño la ejecución de análisis con precisiones posiblemente fuera de la realidad.

17.2 CÁLCULO DEL RIESGO

El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se den consecuencias negativas desde el punto de vista de vidas y la infraestructura, de manera que se hace necesaria su estimación cuantitativa para la toma de decisiones. Estos análisis pueden llevarse a cabo, por ejemplo, en forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un evento o escenario o aleatorio, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín et al., 2013).

Las cuantificaciones son claves, puesto que permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas. Más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis empleados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos. Además, facilita la comunicación entre profesionales, propietarios y tomadores de decisiones (Corominas et al., 2014). Analíticamente, el riesgo específico se podrá calcular con base en la siguiente expresión:

$$R = P(H_i) \cdot V \cdot E$$

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

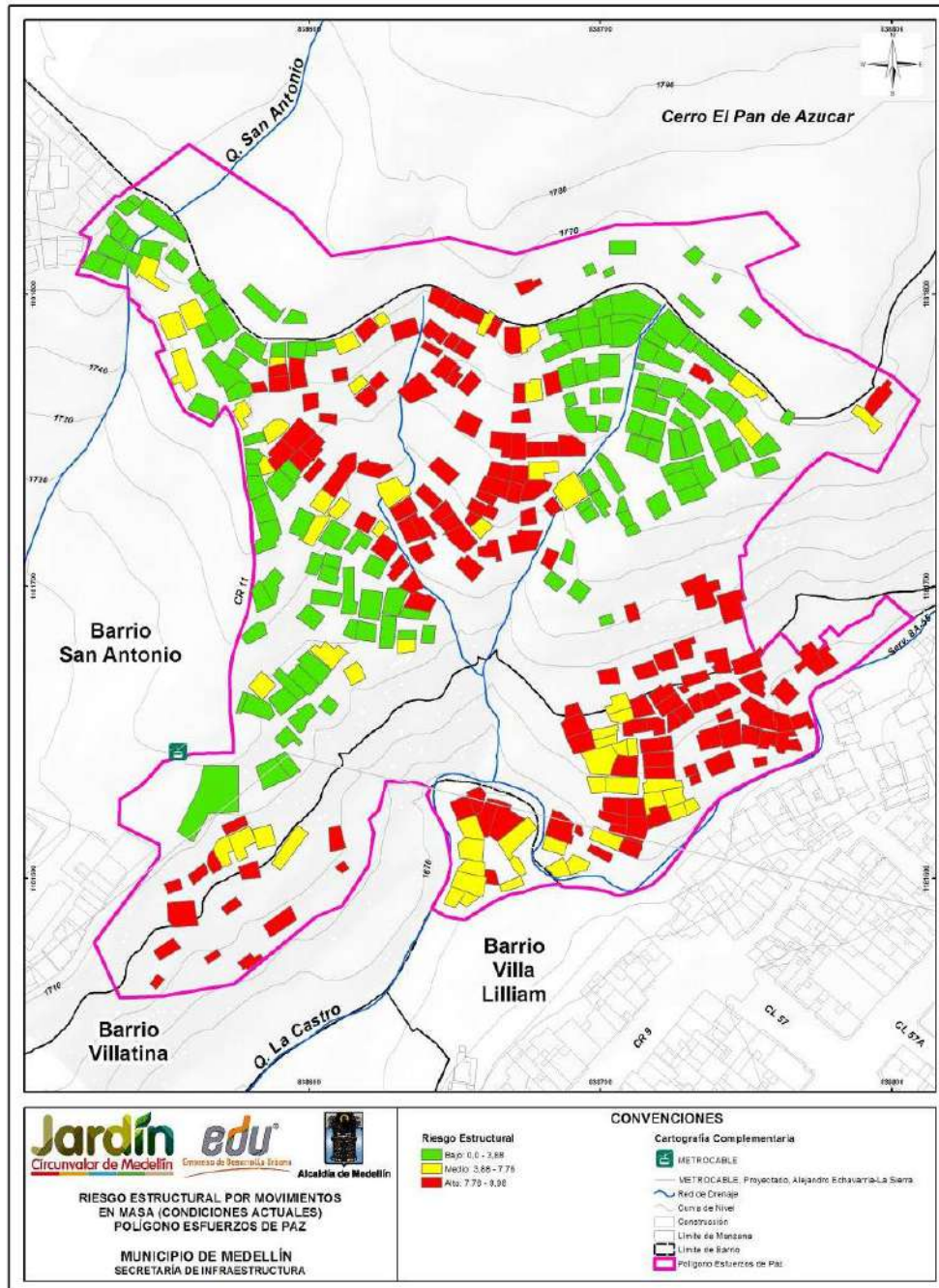
Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (H_i), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. En este caso los escenarios de amenaza son el de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. $P(H_i)$ es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica (H_i) en un tiempo dado y en un área específica. V es vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud (H_i) expresada en una escala entre 0 y 1 como en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa. E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por la amenaza; para el caso de personas.

Teniendo en cuenta lo anterior, los términos a los que se quiere llegar con los análisis de riesgo, son análisis materializados bien sea representados en porcentajes de pérdidas, costos económicos o en pérdidas de vida. De esta forma se tendrá un valor tangible del riesgo que permitirá la toma de decisiones en cuanto al proyecto.

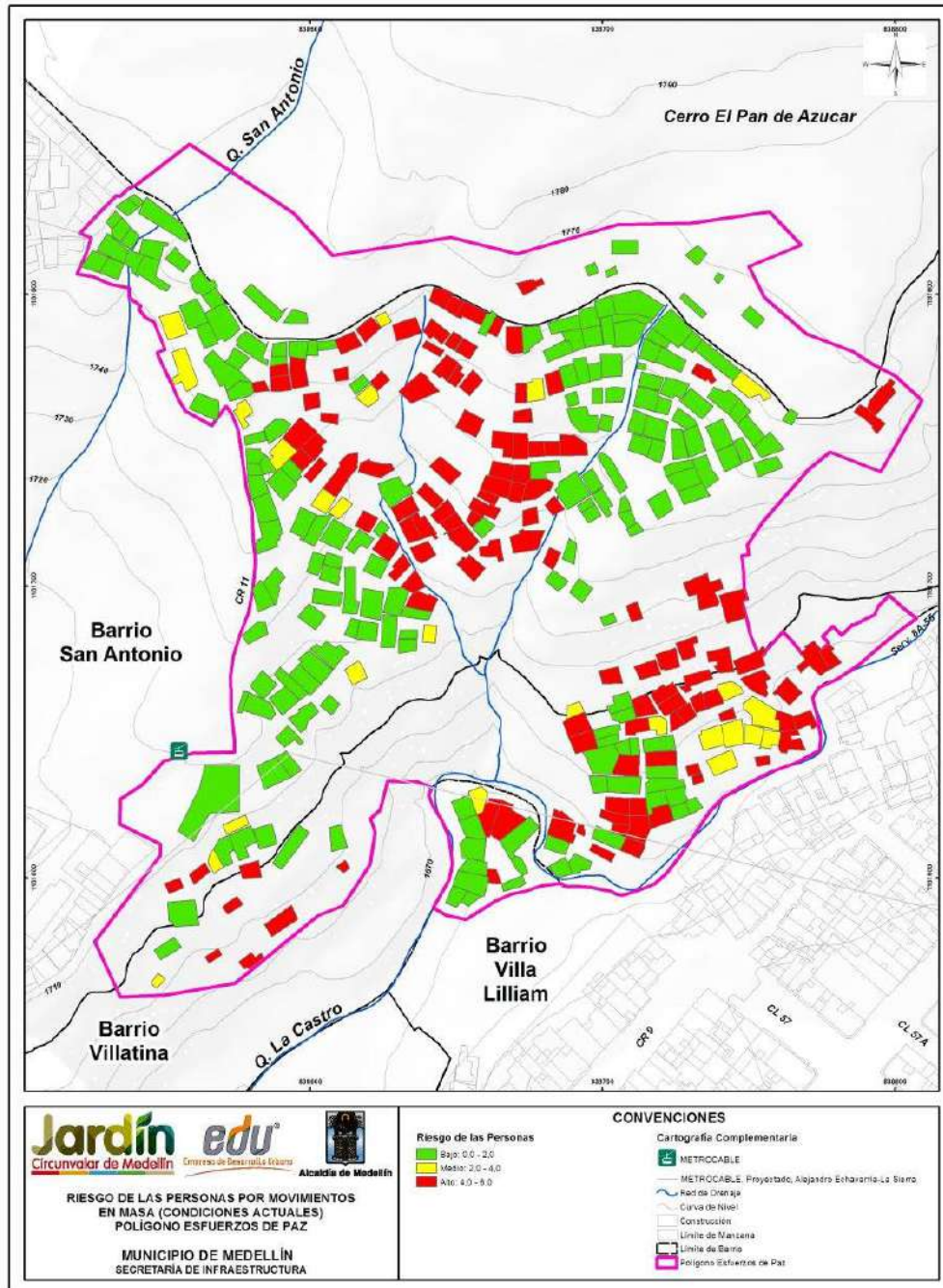
17.3 RESULTADOS

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años presentando en el Mapa 40. En este último se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y la actuación del sismo en 50 años. Se tuvieron en cuenta, además, los mapas de vulnerabilidad estructural y de personas presentados y analizados en el Numeral 16.2.4.

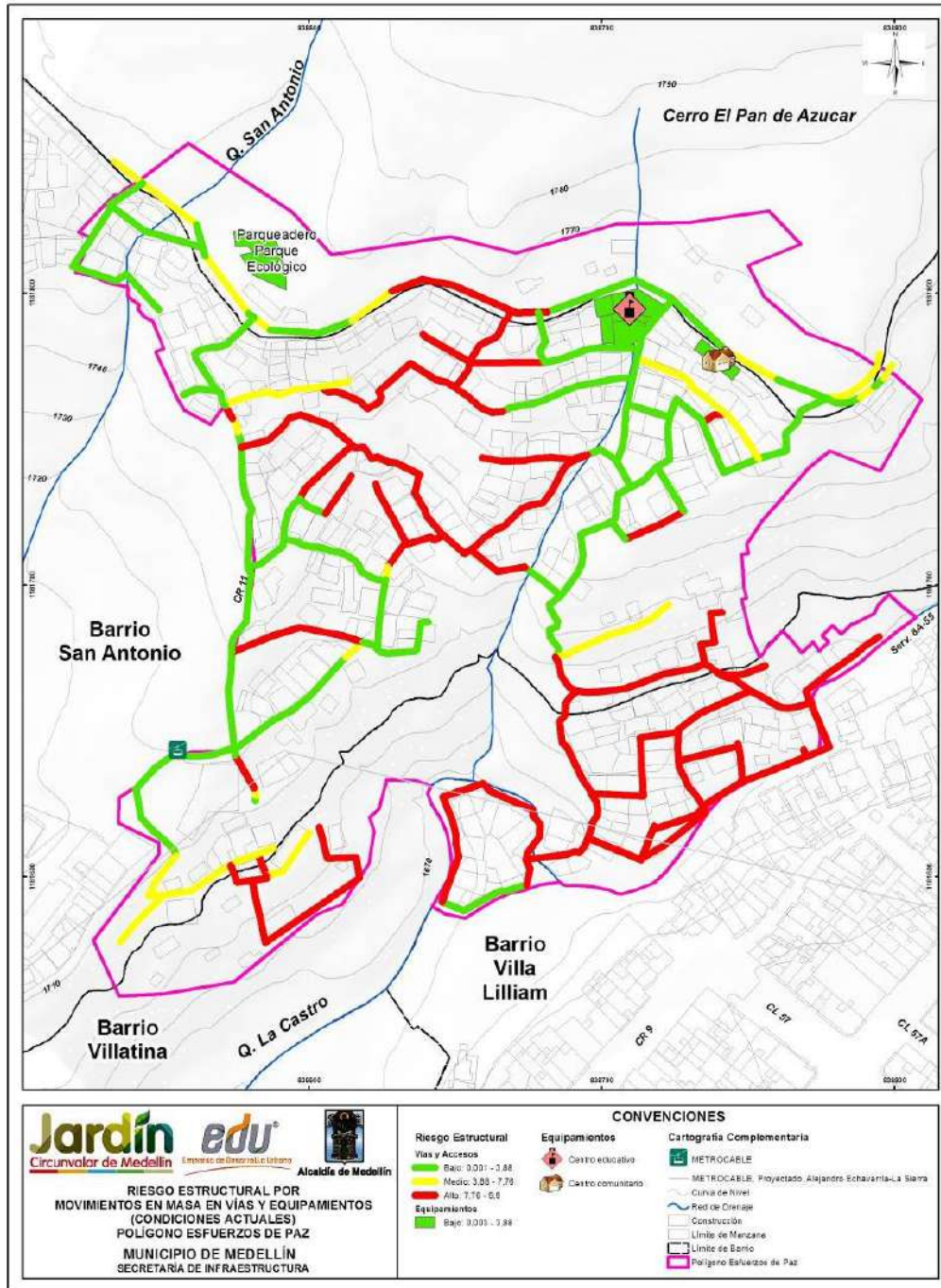
En el Mapa 68 y en el Mapa 69 se presentan los resultados de los análisis de riesgo considerando las condiciones actuales de las viviendas, en términos de porcentaje de pérdidas económicas y en términos de porcentaje de pérdidas de vidas, respectivamente. El Mapa 70 presenta la categorización del riesgo por movimiento en masa de las vías de acceso y equipamientos del polígono, clasificándolo en riesgo bajo, medio y riesgo alto mitigable y no mitigable. Se puede observar que es más crítico el resultado del riesgo en términos de porcentaje de pérdidas económicas y da lugar a un número importante de viviendas y vías de acceso en la zona central, suroriental y suroccidental del polígono con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad dentro del polígono, la responsable de los resultados obtenidos.



Mapa 68. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz (43_EDPRiesgoEstructuralMovimientos en Masa_Medellin_C y 43_EDPRiesgoEstructuralMovimientos en Masa_Medellin_T)



Mapa 69. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz
(44_EDPRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y 44_EDPRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 70. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa (54_EDPRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C y 54_EDPRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se generó un mapa de riesgo total que consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Este mapa de riesgo total se hizo basados en la propuesta del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en su Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015).

Tabla 85. Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total

RIESGO ESTRUCTURAS	RIESGO DE PERSONAS		
	BAJO	MEDIO	ALTO
BAJO	B	B	M
MEDIO	M	M	A
ALTO	M	A	A



Finalmente fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto donde la descripción de cada categoría se indica en la Tabla 86.

Tabla 86. Categorización del riesgo total

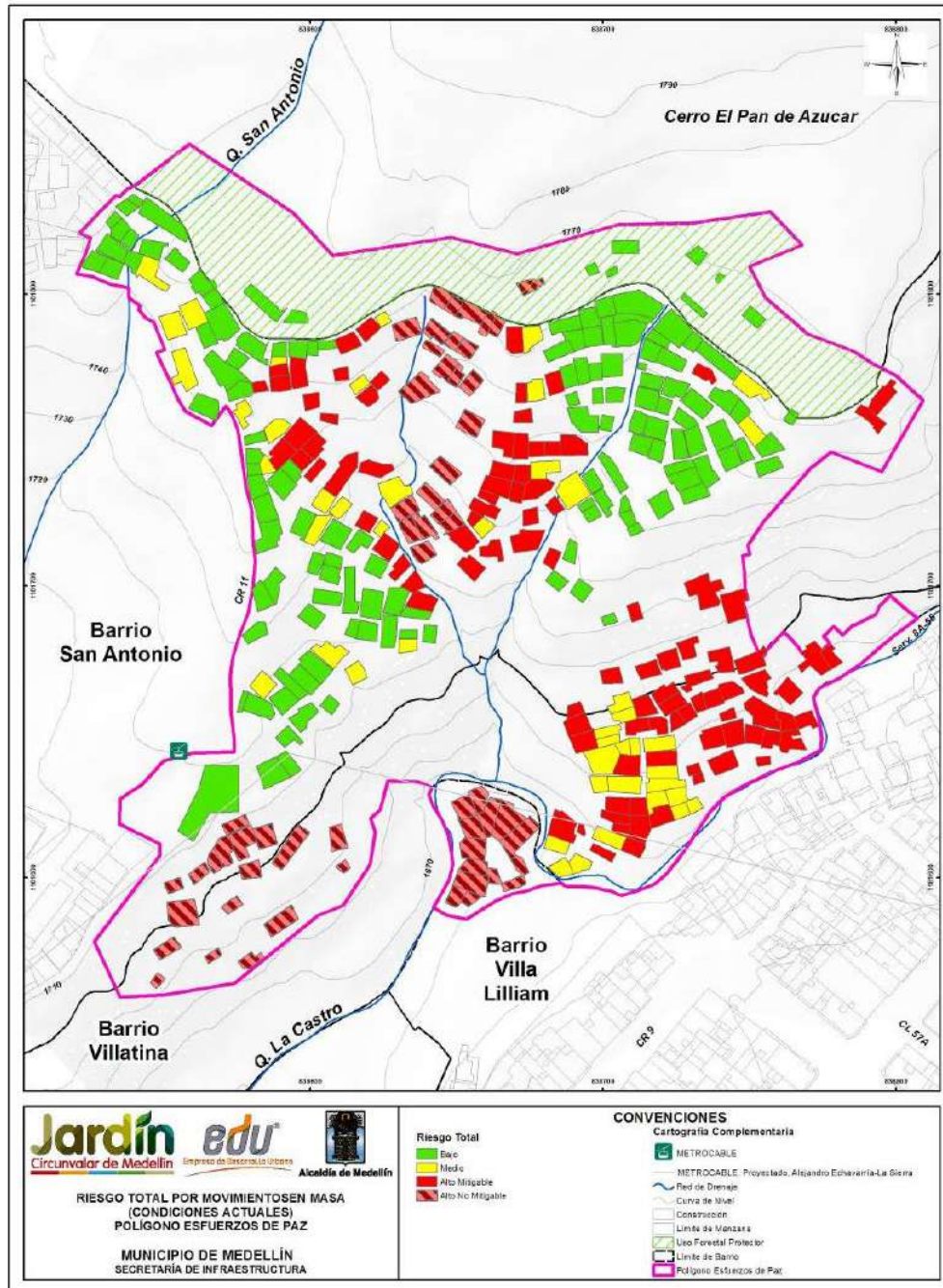
ALTO (A)	Alta probabilidad de víctimas fatales y lesiones serias en la población. La implementación de medidas de intervención es prácticamente inviable desde el punto de vista técnico. Se debe hacer una evaluación económica detallada para establecer la posibilidad de mitigación y disminución del nivel de riesgo. Las pérdidas por materialización de la amenaza superan en todos los casos los valores económicos de los bienes.
MEDIO (M)	Lesiones moderadas muy frecuentes, con alguna probabilidad de víctimas fatales. Se requiere evitar que el nivel de riesgo aumente, pero las medidas de intervención son en todo caso viables técnica y económicamente.
BAJO (B)	Probabilidad de víctimas fatales prácticamente nula. Es un riesgo aceptable y requiere tan solo medidas de prevención.

Adicionalmente, la categoría de riesgo alto fue subcategorizada en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura exceden los costos de las alternativas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si por el contrario, los beneficios de la reubicación de asentamientos e infraestructura representan la mejor opción económica, se deduce que el riesgo es no mitigable.



En el Mapa 71 se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 342 estructuras, 138 de ellas presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (40%), 46 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (13%) y 158 presentan riesgo alto

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

ante movimientos en masa (46%), de las cuales 102 estructuras fueron clasificadas en riesgo alto mitigable, las 56 estructuras restantes fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable. Se puede observar que se tiene un número importante de estructuras con riesgo alto en el centro y al sur del polígono. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que el riesgo se debe la presencia de focos de inestabilidad al interior del Polígono Esfuerzos de Paz.



Mapa 71. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz (45_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_C y 45_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T)

 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

En la Tabla 87 se presenta la descripción de cada una de las estructuras que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz.

Tabla 87. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz

Estructura	COBAM A	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
11	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.158	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
13	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.140	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
18	0813039	Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
19	0813039	Cr 10 N.55-73 Int.104	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
20	0813039	Sin dirección	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
63	0813039	Sin dirección	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
64	0813039	Cr 10 N.55-73 Int.108	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
65	0813039	Cr 10 N.55-73 Int.110	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
66	0813039	Cr 11 N.54-120 Int.106	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
69	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.156_Cr 11 N.54-160 Int.157	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
75	0814002	Cr 11 N.54-420 Int.123	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
76	0814002	Cr 11 N.54-420 Int.125	Residencial	Ligera	< 2 m	Muy mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
77	0814002	Cr 11 N.54-120 Int.127	Residencial	Muy ligera	< 2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
79	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.155_Cr 11 N.54-160 Int.144	Mixto	Ligera	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
81	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.123	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
87	0814002	Cr 11 N.54-27	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
88	0814002	Cr 10 N.54-240 Int.149	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
117	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.122	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
127	0814002	Cr 10 N.55-73 Int.109	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
128	0814002	Cr 11 N.55-120 Int.126	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un	Alto No

Tabla 87. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz

Estructura	COBAM A	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
							piso	Mitigable
129	0814002	Cr 11 N.55-120 Int.126	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
130	0814002	Cr 11 N.55-120 Int.120	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
133	0814002	Cr 10 N.55-423 Int.217	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
137	0814002	Cr 10 N.55-381 Int.151	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
171	0814002	Cr 11 N.54-130 Int.108	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
173	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.145	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
175	0814002	Cr 11 N.54-160 Int.137	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
186	0814002	Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
187	0814002	Cr 10 N.55-423 Int.221	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	De 3 a 5 pisos	Alto No Mitigable
189	0814002	Cr 11 N.54-240 Int.133	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
194	0813039	Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
207	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.139	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
208	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.136-Cr 10 N.55-125 Int.236	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
209	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.134	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
210	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.132	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
211	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.130	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
212	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.125	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
213	0815032	Cr 10 N.55-165_Cr 10 N.55-169_Sin dirección	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
214	0815032	Cr 10 N.55-161	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
215	0815032	Cr 10 N.55-151	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
216	0815032	Cr 10 N.55-149	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable

Tabla 87. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono Esfuerzos de Paz

Estructura	COBAM A	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
224	0814002	Cr 10 N.55-423 Int.221	Residencial	Mampostería	< 2 m	Buena	Un piso	Alto No Mitigable
225	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.142	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
226	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.144	Residencial	Mixta	< 2 m	Buena	Un piso	Alto No Mitigable
227	0814002	Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Muy mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
228	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.151_Cr 10 N.55-395 Int.148	Residencial	Ligera	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
229	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.138_Cr 10 N.55-395 Int.139	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
230	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.140	Residencial	Ligera	< 2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
231	0814002	Cr 10 N.55-395 Int.139	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
294	0815032	Cr 10 N.55-127	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
295	0815032	Cr 10 N.55-133	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
296	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.141_Cr 10 N.55-125 Int.241_Cr 10 N.55-137	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	De 3 a 5 pisos	Alto No Mitigable
323	9008000	Sin dirección	Comercial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
333	0815032	Cr 10 N.55-125 Int.136	Residencial	Mampostería	< 2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
337		Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
339		Sin dirección	Residencial	Ligera	< 2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable

18. RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

18.1 METODOLOGÍA

A partir de los resultados de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad por inundaciones y avenidas torrenciales, es posible evaluar finalmente el riesgo existente en el Polígono Esfuerzos de Paz ante este tipo de fenómenos.

De acuerdo con lo presentado en los capítulos de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, la amenaza evaluada trae implícito la calificación de la intensidad del fenómeno y la magnitud de los daños potenciales. A su vez, la evaluación de la vulnerabilidad considera la densidad habitacional y la resistencia de las estructuras frente a este tipo de fenómenos. Con base en esto, la asignación del riesgo se realizó de manera cualitativa combinando los resultados de los niveles de amenaza y los niveles de vulnerabilidad según el esquema mostrado en la Figura 218.

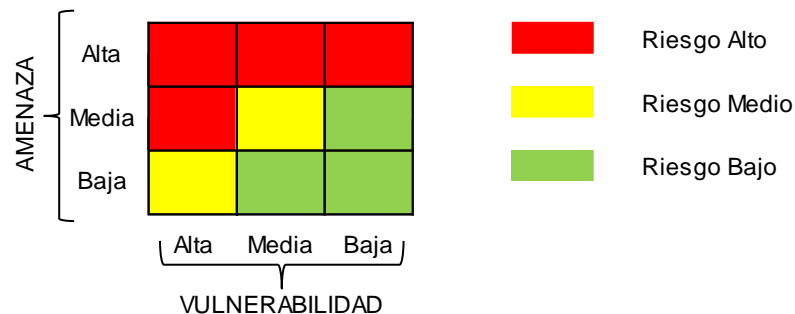


Figura 218. Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad



18.2 RESULTADOS

Luego de aplicar la metodología para la calificación del nivel del riesgo ante fenómenos de Inundación y Avenidas Torrenciales, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Mapa 72 y el Mapa 73, donde se clasifica cada zona del polígono en categorías de riesgo alto, medio y bajo para las condiciones actuales

En estas figuras y planos puede observarse que al interior del Polígono Esfuerzos de Paz existen zonas de riesgo alto tanto por fenómenos de inundaciones como de avenidas torrenciales. Las zonas de riesgo alto están concentradas especialmente en las viviendas y estructuras aledañas a los cauces.

El riesgo alto por inundaciones que se presenta en las zonas aledañas a los cauces de las quebradas Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2 se debe principalmente a la ausencia de cauces bien definidos o a la alteración de sus condiciones naturales.

Se considera como riesgo alto no mitigable aquel bajo el cual se encuentran las estructuras que por su cercanía al cauce su carácter de riesgo alto no puede ser reducido

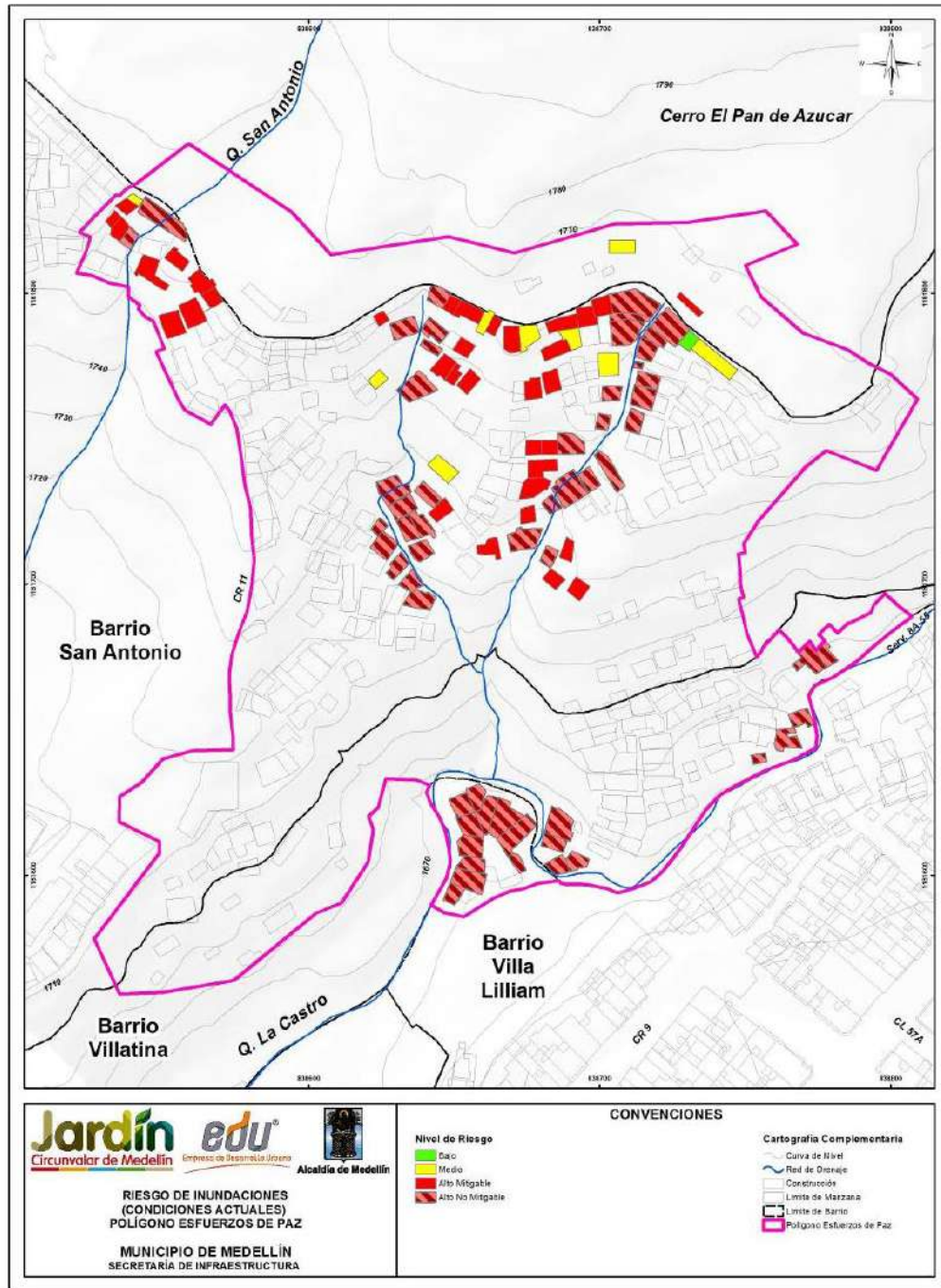
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

sin modificar sustancialmente las condiciones del cauce, de la corriente y de la estructura misma, y porque además se encuentran ubicadas parcial o totalmente al interior de la zona de retiro hidrológico. Por su parte, las estructuras clasificadas como riesgo alto mitigable corresponden a aquellas que bajo condiciones actuales se ven afectadas por insuficiencia hidráulica de obras existentes y cuya condición de riesgo alto puede eliminarse mediante algunas adecuaciones o ampliaciones de la capacidad hidráulica de estas obras.

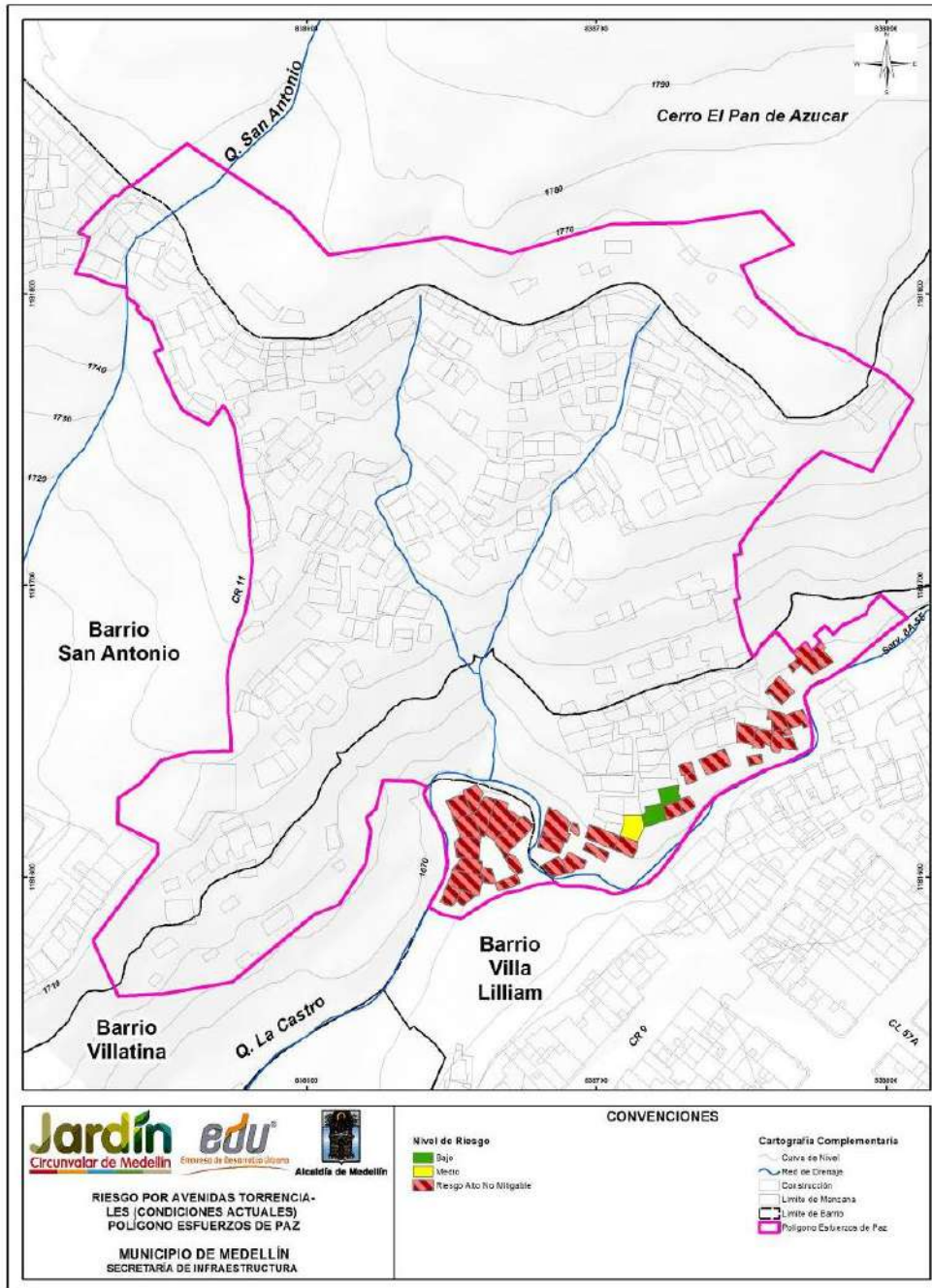
En particular para el Polígono de estudio, los resultados de la evaluación del riesgo indican que diversas viviendas aledañas al cauce de la quebrada La Arenera presentan Riesgo Alto No Mitigable por Inundaciones por estar ubicadas en zona de amenaza alta ante este tipo de fenómenos. Por su parte, la estructura correspondiente a la Iglesia del sector presenta Riesgo Alto Mitigable dado que está ubicada en zona que se ve afectada por vertimientos generados por insuficiencia de una obra hidráulica existente (la estructura “Est. 2”).

De igual manera, en el Mapa 74, se puede observar el nivel de riesgo para las vías de acceso. En aquellos tramos de corredores o vías de acceso donde la mancha de inundación asociada a un periodo de retorno de 100 años, evaluado en las quebradas La Castro y San Antonio y los Afluentes La Castro 1 y La Castro 2, intersecta estos corredores, se generan condiciones de amenaza con diferentes grados de clasificación y de riesgo medio y alto (según la amenaza y vulnerabilidad). Por tanto, corresponde a un riesgo intrínseco a la ubicación del corredor respecto de la corriente hídrica. Las vías de acceso que se encuentran clasificados en medio o alto riesgo por inundaciones al interior del Polígono Esfuerzos de Paz corresponden a corredores peatonales y vías vehiculares. También, se puede observar que para algunas estructuras especiales existe un grado de clasificación por amenaza.

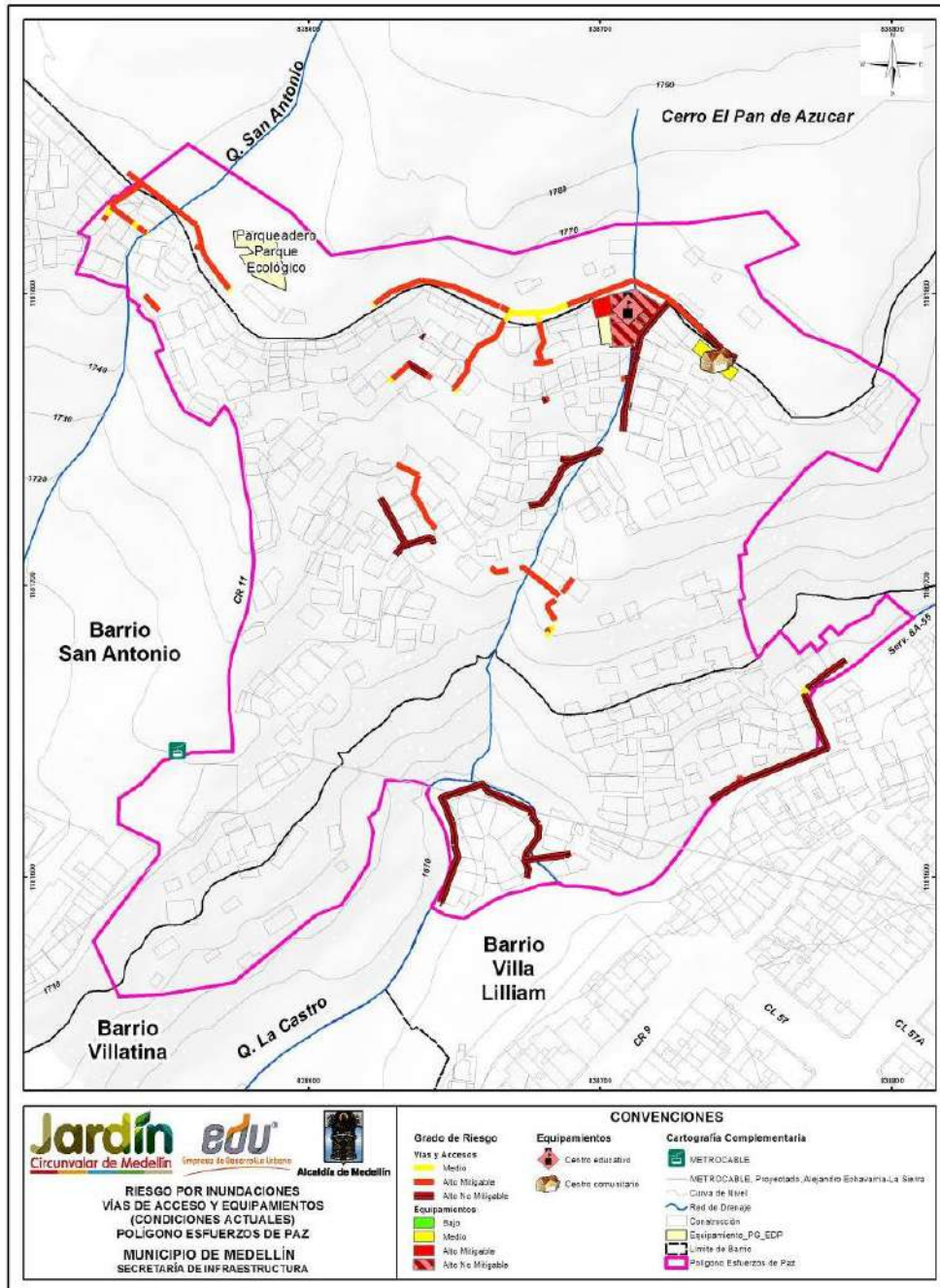
De acuerdo con lo expuesto en el Numeral 15.5, el polígono de estudio presenta riesgo por avenidas torrenciales. Luego, en el Mapa 75 podemos observar el grado de riesgo para las vías de acceso y equipamiento, para un evento de avenidas torrenciales. Este evento solo fue evaluado para la Quebrada La Castro, ya que los otros cuerpos de agua no presentan dicho fenómeno. Observamos en este mapa que los tramos de acceso donde la mancha de avenidas torrenciales interactúa o intersecta a estos, se generan condiciones de riesgo alto (según amenaza y vulnerabilidad), asociado a un riesgo dada la ubicación. En este caso, no hay estructuras especiales dentro de la mancha por avenidas torrenciales por lo que no existe un riesgo para estas.



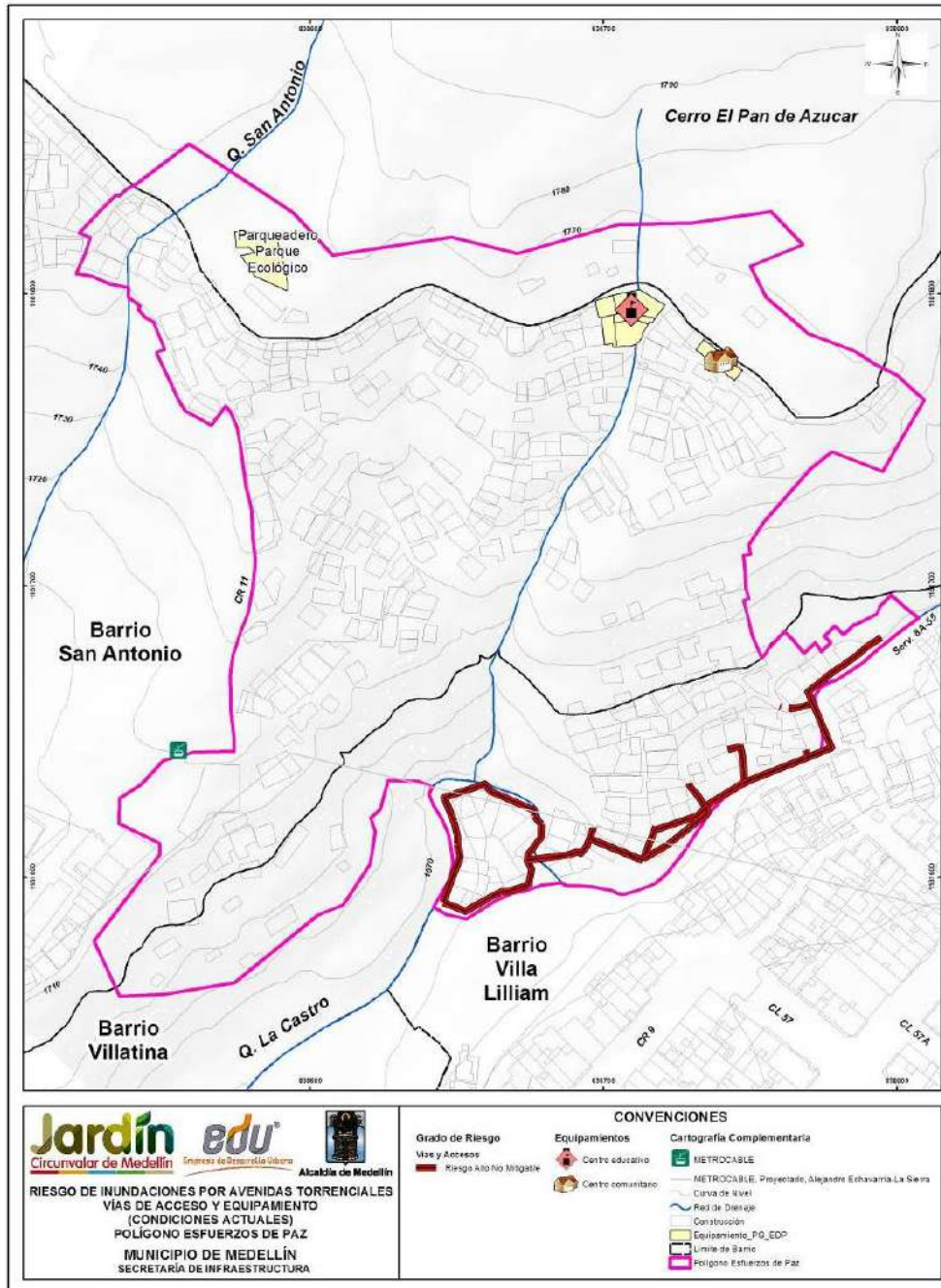
Mapa 72. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para viviendas y construcciones (47_EDPRiesgoInundaciones_Medellin_C y 47_EDPRiesgoInundaciones_Medellin_T)





Mapa 73. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para viviendas y construcciones (49_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 49_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 74. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las vías de acceso y equipamientos (55_EDPRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y 55_EDPRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T)



Mapa 75. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono Esfuerzos de Paz para las vías de acceso y equipamientos (56_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_C y 56_EDPRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

19. ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS

En este capítulo se presenta el análisis complementario efectuado considerando la presencia de redes de servicios públicos al interior del Polígono Esfuerzos de Paz. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según información entregada por La EDU a SIGA, en los mapas de amenaza por movimientos en masa y por inundaciones. Posteriormente se hizo una valoración de la vulnerabilidad de las estructuras correspondientes a las redes y con base en estos dos aspectos se hicieron análisis sobre el riesgo al que finalmente están expuestas las redes.

19.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES

En el Polígono Esfuerzos de Paz se presenta cobertura parcial de redes de acueducto y de alcantarillado de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse en el Mapa 76.



En relación con la red de alcantarillado, las líneas existentes se concentran en los límites occidental (sobre la Carrera 11) y suroriental del polígono (sobre las márgenes de la Quebrada La Castro). Casi la totalidad de las líneas de alcantarillado corresponden al tipo combinado, en concreto, con diámetros entre 200 mm y 400 mm, siendo más común los diámetros de 200 mm.

- ✓ En relación con la red de acueducto, esta presenta una cobertura mínima, solamente en dos zonas pequeñas, una hacia el costado suroccidental (en la parte baja del polígono) y la otra hacia el costado nororiental (en la parte alta del polígono). Las líneas de acueducto son de material policloruro de vinilo (PVC) y de hierro dúctil, con diámetros de 75 mm y 150 mm.
- ✓ En relación con las redes de gas, este polígono no cuenta con cobertura de este tipo de redes por parte de EPM.

Con la finalidad de detectar si existen otras redes de servicios públicos diferentes a las de EPM, se superpuso el levantamiento topográfico realizado por La EDU con la información de las redes de EPM. Este ejercicio permitió concluir que todas las redes que presenta la información de topografía de La EDU al interior del Polígono Esfuerzos de Paz corresponden a las de EPM. Sin embargo, no se descarta la existencia de líneas de tuberías o mangueras instaladas por la comunidad para el suministro y descarga de aguas, las cuales quedan por fuera del alcance general del presente estudio.

19.2 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA

En el Mapa 40, se presenta el mapa de zonificación de la amenaza considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. En el Mapa 76 se presenta este mismo mapa pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.

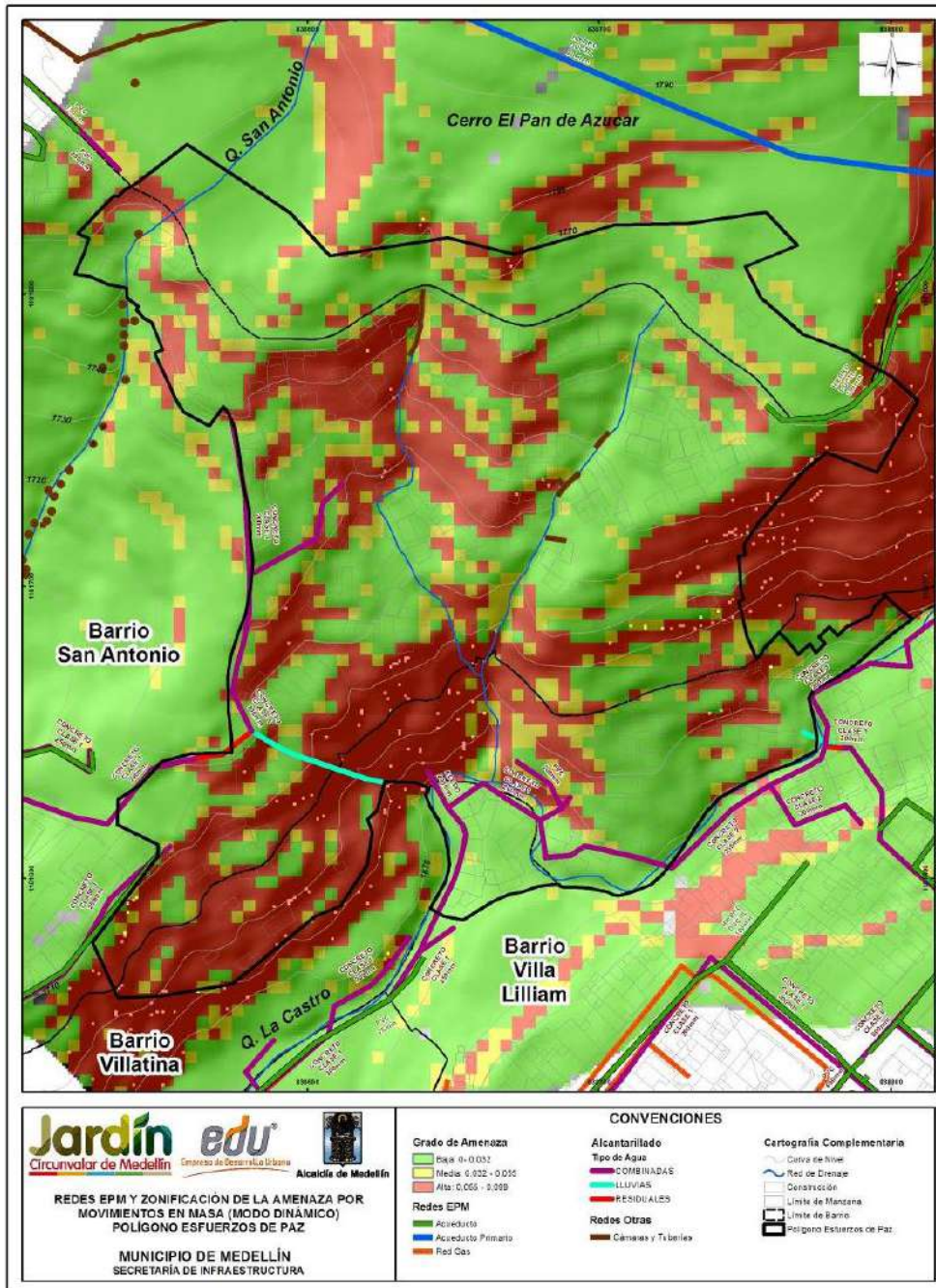
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa, mostrada en el Mapa 76, permite ver diferenciadas las redes de acueducto, alcantarillado y gas sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un sismo de 0.25g. Resultan especialmente importantes de analizar los tramos de redes que se encuentran en zonas de amenaza alta, al interior del polígono como tal. En este sentido, se resaltan dos tramos cortos de las redes de acueducto y alcantarillado de EPM que se localizan en zonas de amenaza alta, incluyendo un tramo también corto de red construida por la comunidad que se localiza en la parte alta del Afluente La Castro 2. Se trata de una red de acueducto construida en hierro dúctil con diámetro de 150 mm y redes de alcantarillado construidas con tuberías de acero con diámetro de 200 mm.

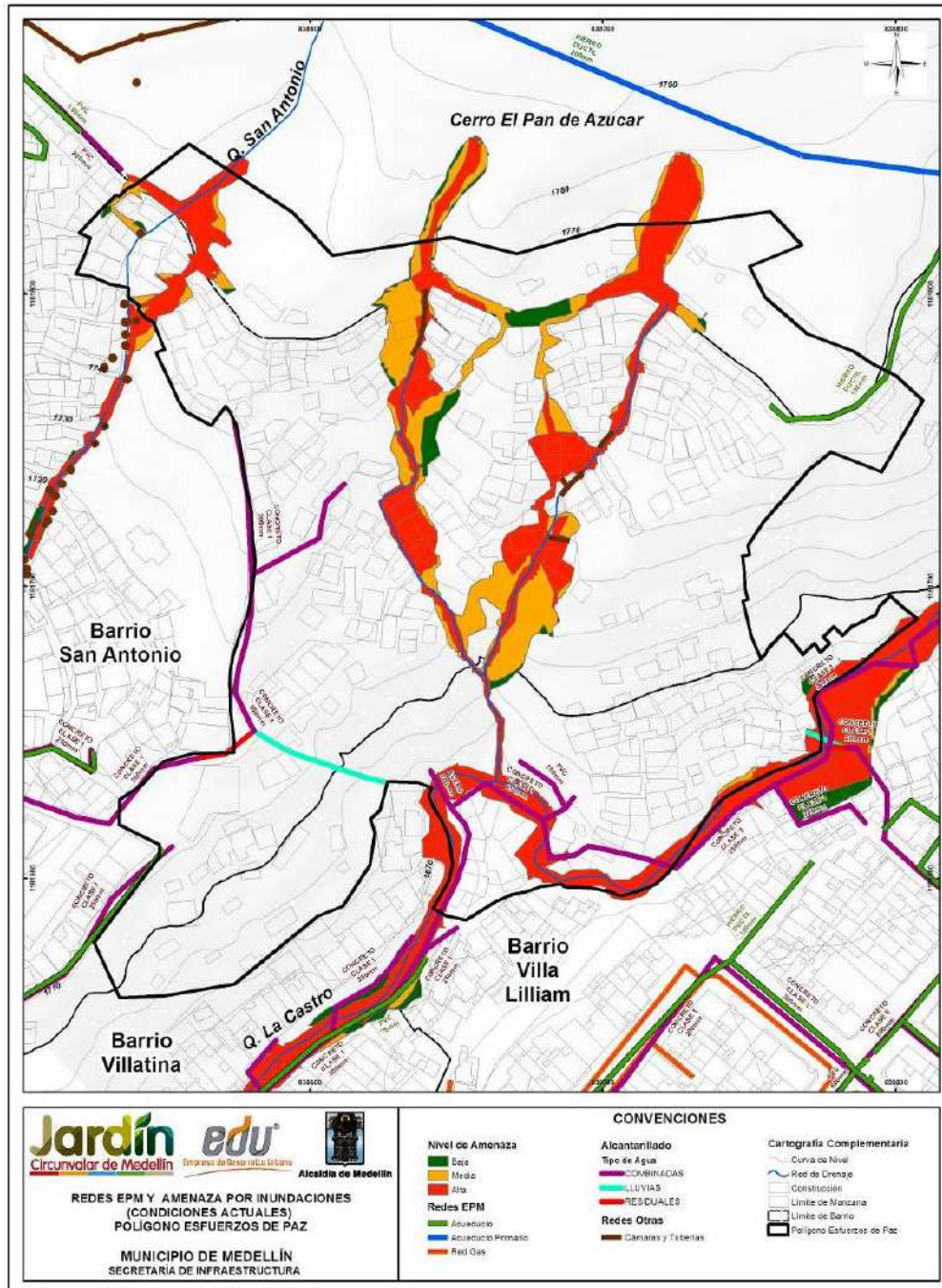
En el Mapa 33 se presenta el mapa de amenaza por inundaciones para el Polígono Esfuerzos de Paz. En el Mapa 77 se presenta este mismo mapa pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.

La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por inundaciones, mostrada en el Mapa 77, permite determinar que casi la totalidad de las redes de alcantarillado existentes en el costado suroriental del Polígono Esfuerzos de Paz se encuentran ubicadas en zonas de amenaza alta por inundaciones, dada su cercanía con la Quebrada La Castro. Las demás redes de alcantarillado existentes al interior del polígono se encuentran fuera de zonas de amenaza por inundaciones. En relación con la red de acueducto, las pocas líneas existentes al interior del polígono se encuentran fuera de las zonas de amenaza por inundaciones.

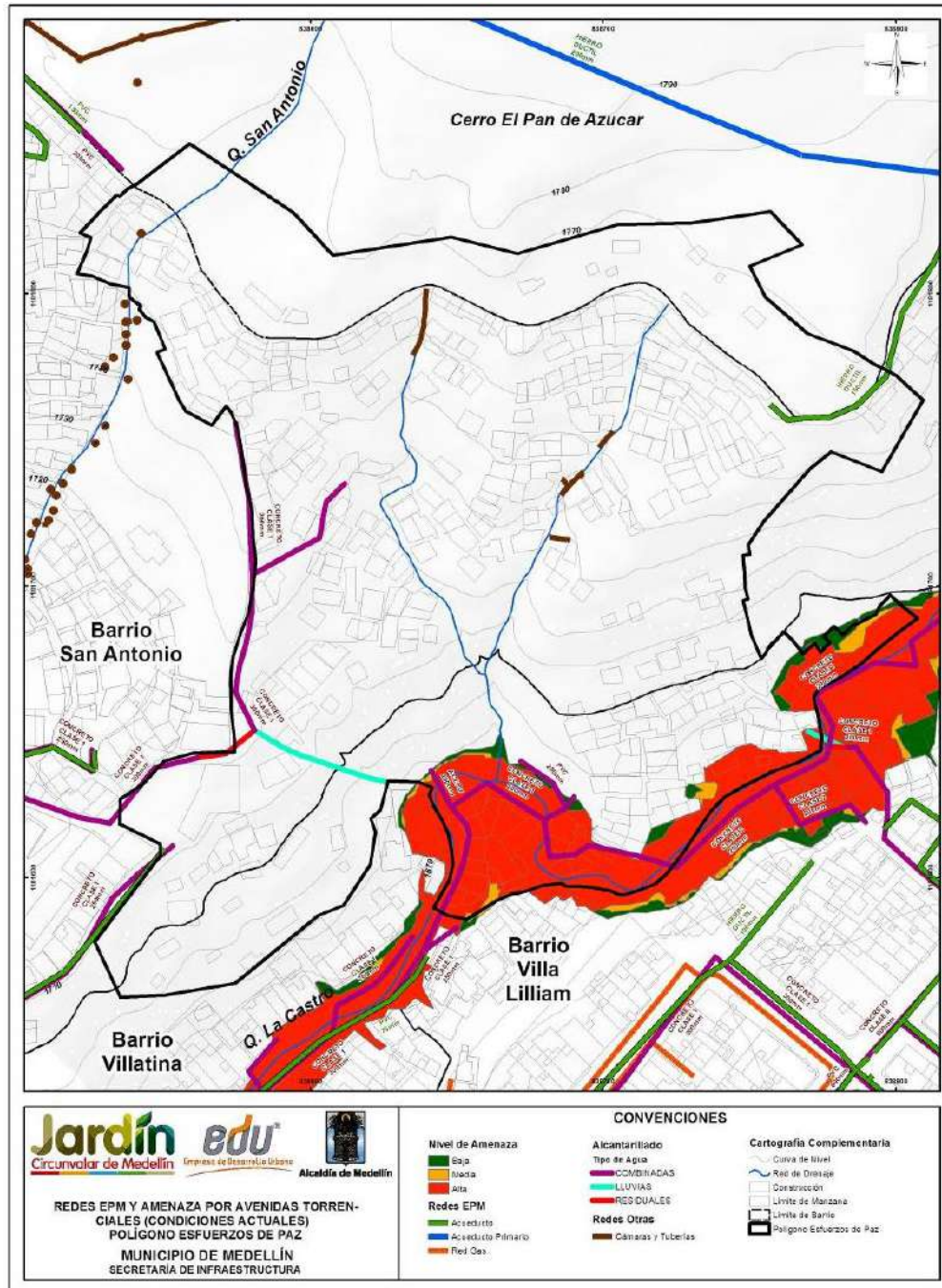
La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por avenidas torrenciales, mostrada en el Mapa 78, permite determinar que la totalidad de las redes de alcantarillado existentes en el costado suroriental del polígono se encuentran ubicadas en zonas de amenaza alta por avenidas torrenciales, dada su cercanía con la Quebrada La Castro. En relación con la red de acueducto, todas las líneas existentes al interior del polígono se encuentran fuera de las zonas de amenaza por avenidas torrenciales.





Mapa 76. Redes de servicios públicos sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (EDPRedesEPMYAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C



Mapa 77. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones. Condiciones actuales. (EDPRedesEPM_Medellin_C)



Mapa 78. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.
(EDPRedesEPMAvenidaTorrencial_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

19.3 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES

La vulnerabilidad de las redes depende del tipo de tubería que se esté usando. Para este sitio en particular, en el alcantarillado se han encontrado tuberías en concreto no reforzado, en hierro dúctil (HD) y en policloruro de vinilo (PVC), y para el acueducto en policloruro de vinilo (PVC) y en hierro dúctil (HD). Algunas características de estas tuberías son mostradas a continuación, en los Numerales 19.3.1 a 19.3.3.

19.3.1 Tubería en concreto no reforzado (Clase 1)

Son tubos de concreto sin refuerzo, de sección circular y son utilizados en la conducción de aguas lluvias, de aguas negras y de residuos líquidos industriales, para drenajes de vías y en general, como conductos no sometidos a presión hidrostática interna. Dependiendo de la resistencia del concreto, la tubería se clasifica en tipo 1 y en tipo 2. Estas tuberías son fabricadas bajo las especificaciones descritas en la Norma Técnica Colombiana NTC 1022 (2014). Las uniones de las tuberías de concreto no reforzado y las de concreto reforzado son uniones de espigo-campana con empaque de caucho. Las tuberías de concreto son tuberías clasificadas como tuberías rígidas, cuya sección transversal no se puede distorsionar, sin causar colapso.

19.3.2 Tubería en Policloruro de Vinilo (PVC)

Los tramos de PVC en las tuberías de acueducto, generalmente presentan un comportamiento bueno, normalmente cuando se presentan daños por fugas, éstas ocurren en las conexiones. Por ésta razón la parte más vulnerable ante los efectos en masa son las conexiones.

19.3.3 Tubería en Hierro Dúctil (HD)



Es una tubería antigua que se instaló hasta finales de la década de 1970 fabricada con acero sin recubrimiento. El ángulo máximo de deflexión de las campanas es de 5°.

19.3.4 Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes

Según la descripción anterior, las conexiones de las tuberías de concreto sin refuerzo, de hierro dúctil y las de PVC tienen una baja capacidad de deformación diferencial horizontal y se concluye entonces que estas son altamente vulnerables ante un movimiento en masa. Este tipo de estructuras también es vulnerable a un lavado del material de fundación debido a una inundación o a una avenida torrencial cerca de los cauces de quebrada.

19.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES



Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad de las redes de servicios públicos, como se explicó en el numeral anterior, se concluye que el riesgo en el cual se encuentran las redes ubicadas justo en las zonas de amenaza alta por deslizamiento es también alto. Se

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

recomienda entonces que se evalúe en conjunto con E.P.M. la situación de riesgo de las redes en este polígono para que se hagan los correctivos del caso.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones y avenidas torrenciales, a partir de lo expresado en los apartados anteriores, es posible concluir que la totalidad de las redes de alcantarillado ubicadas en las márgenes de la Quebrada La Castro se encuentran en riesgo alto por inundaciones o por avenidas torrenciales. Las demás redes dentro del polígono, tanto de alcantarillado como de acueducto, se encuentran fuera de riesgo por estos dos fenómenos. Este nivel de riesgo alto significa que estas redes aledañas al cauce de la Quebrada La Castro podrían eventualmente verse afectadas durante la ocurrencia de eventos de estos tipos y generar algunos derrames hacia el mismo cauce. Este nivel de riesgo sería casi independiente del tipo de cobertura sobre la red, sea en pavimento, cobertura rígida, flexible, natural o vegetal, ya que la alta intensidad de los fenómenos de tipo torrencial podría desencadenar la falla estructural tanto de la cobertura como de las tuberías aledañas al cauce de la Quebrada La Castro.

Estas condiciones implican que se requerirá por parte de las autoridades competentes la redefinición de las redes de esta zona como parte integral del manejo que deberá otorgarse a esta zona que hace parte del retiro del cauce.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

20. ZONAS DE RETIRO HIDROLÓGICO Y GEOLÓGICO

20.2 JUSTIFICACIÓN



De acuerdo con los aspectos que son necesarios incluir en el estudio de los diferentes polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles, se deben realizar los ajustes a las hidrologías e hidráulicas de las Quebradas La Castro (Polígono Esfuerzos de Paz), La Loquita (Polígono Pinares de Oriente) y La Mica (Polígono Villa Turbay) y determinar los respectivos retiros hidrológicos y geológicos. Así las cosas, se presenta y discute en este numeral el respectivo retiro hidrológico y geológico para la Quebrada La Castro del Polígono Esfuerzos de Paz.

20.3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Como se indica en el documento “DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PARA LA FORMULACIÓN DE PLANES INTEGRALES DE ORDENAMIENTO Y MANEJO DE MICROCUENCAS (PIOM)”, elaborado por la Universidad Nacional de Colombia para el instituto Mi Río en el año 2002 (Universidad Nacional de Colombia, 2002), los retiros a las corrientes de agua se refieren a zonas alrededor de los cauces que los contiene, en las que se imponen restricciones sobre el uso del suelo y algunas intervenciones antrópicas. Tradicionalmente se ha relacionado la zona de retiro como una franja definida por líneas paralelas a ambos lados de la corriente y a una distancia predefinida de los bordes del cauce en condiciones de máxima inundación. Se entiende por zona de retiro la faja de terreno paralela a las líneas de máxima inundación o al borde superior del canal natural o artificial. En este documento, se indica que para determinar el retiro hidrológico y geológico, se deben incluir los siguientes aspectos:

- ✓ La zona del cauce, el lecho y las márgenes evidentes de la corriente para el flujo de aguas máximas promedias, conocida en la morfología como bancallena. Como se indica en el documento antes citado, en esta zona, excepto la recreación pasiva, no se puede hacer ninguna intervención antrópica sin la autorización específica de la autoridad ambiental.
- ✓ En el contexto de la prevención de desastres en la zona de retiro se debe incluir toda el área donde la dinámica del cauce y su flujo constituyen factores de riesgo. Así se considera la zona donde en las grandes crecidas de la corriente, los niveles del agua o las velocidades del flujo, determinan la existencia de condiciones de amenaza hidrológica alta. Como se indica en el documento antes citado, en esta zona no se pueden construir edificaciones permanentes o de ocupación permanente, ni se pueden hacer modificaciones en el terreno que puedan obstaculizar o modificar el flujo de las aguas y sus sedimentos durante las crecidas.
- ✓ La zona donde la estabilidad de las márgenes y las riberas constituyen amenaza geotécnica alta.

Por otro lado, se indica en el documento “PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ (POMCA)”, elaborado por la Universidad Nacional de

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Colombia para Cornare, Corantioquia y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el año 2005 (Universidad Nacional de Colombia, 2005), que en el marco del Decreto 1729 de 2002 las autoridades ambientales deben formular los Planes de Ordenación de las Cuencas POMCA y es a través de este instrumento de planificación que se identifican para cada cuenca la franja o zona de retiro a los cuerpos de agua. El ancho de estas debe estar sustentado en los estudios técnicos hidrológicos y con base en los resultados de estos estudios se debe concertar con los propietarios de los predios los usos permitidos, prohibidos y compatibles con la decisión del POMCA. Así las cosas, es necesario establecer desde el POMCA lineamientos y acciones que permitan definir de una manera más clara las zonas de retiro.



A continuación, se presenta de forma resumida la propuesta para la delimitación de las zonas de retiro a corrientes implementada a través del POMCA en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de los municipios con presencia en la Cuenca del río Aburrá.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que deben considerarse, entre otros aspectos, los siguientes:

- ✓ Al interior del cauce no deben ubicarse edificaciones ni construcciones, ya que representan una zona de alto riesgo a la inundación. Los retiros quedan definidos entonces a partir del cauce (Tr=10 años).
- ✓ Los retiros asociados a las consideraciones geológicas y de corredores ribereños se miden a partir del cauce (Tr =10 años).
- ✓ Las franjas de retiro se construyen a partir de criterios hidrológico, geológico, vegetación de ribera y la instalación de redes de servicios. El retiro a corrientes será delimitado por la envolvente de las franjas definidas por cada uno de ellos.

En el caso particular de los polígonos en estudio, se consideran los aspectos mencionados, pero en cuanto a franjas de retiro, se tiene en cuenta las correspondientes a criterios hidrológicos y geológicos, con respecto a los cuales se anota en el documento que se viene citando lo siguiente:

- ✓ El **retiro hidrológico** corresponde a una zona de amenaza alta a la inundación, que se reserva para que la corriente transcurra sin ocasionar problemas tanto en condiciones normales como en crecientes. Su determinación exige que se diferencie la ubicación del sitio en el perfil altitudinal de la corriente, para determinar si se está en cauce de montaña (parte alta), piedemonte (parte media) o llanura aluvial (parte baja).
- ✓ El **retiro asociado a la amenaza geológica** corresponde a una franja de terreno ubicada en ambos lados del cauce (Tr=10 años) en las corrientes naturales. La zona aledaña al cauce, puede tener una inclinación natural que la hace susceptible a movimientos en masa. Se determina entonces, el retiro geológico con base en una superficie teórica en el talud respecto a la horizontal y a los procesos erosivos asociados al cauce. La determinación del ancho de la franja de retiro geológico, se

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

inicia con la zonificación de la amenaza por movimientos en masa. Esta zonificación asigna valores cualitativos (amenaza alta, media o baja) a porciones del terreno diferenciables con base en las características geotécnicas. Adicionalmente, se requiere como insumo un reconocimiento de los procesos erosivos asociados al cauce. El retiro geológico se calcula de una manera diferencial según el tipo de amenaza, como se indica a continuación:

En las zonas en las que la amenaza por movimientos en masa sea baja, no se considerará retiro por estabilidad de las laderas. El retiro en esta zona quedará determinado por los demás retiros considerados, que en este caso en particular se trata del retiro hidrológico.

En las zonas en las que la amenaza por movimientos en masa sea media, se establecerá un retiro dado por una superficie de falla teórica de los taludes aledaños al cauce con una inclinación respecto de la horizontal de 50° a 70° trazada a partir del cauce. Este retiro debe ser ajustado comprobando que el espesor de la franja dada por la superficie de falla teórica, incluya completamente cualquier movimiento en masa presente en las laderas aledañas al cauce, e inclusive, que queden algunos metros más de terreno, de 5 m a 10 m. Si la parte superior de los movimientos en masa sobrepasa la franja, el retiro debe ser llevado hasta que la incluya y tenga 10 m más.

En las zonas en las que la amenaza por movimientos en masa sea alta, se establecerá un retiro de los taludes aledaños al cauce dado por una superficie de falla teórica con una inclinación de 45° respecto a la horizontal trazada a partir del canal dominante. Al igual que en las zonas de amenaza media, todos los procesos morfodinámicos deben quedar inmersos en la franja de retiro y contar con 10 m a 15 m más. De no ser así, dicha franja debe ser ampliada hasta que todos queden incluidos y cuente con 15 m más de terreno.

20.4 RESULTADOS

En el caso de la Quebrada La Castro en el Polígono Esfuerzos de Paz, se trata de cauce de montaña, esto por cuanto es la zona de producción de sedimentos donde la corriente tiene un cauce encajonado y grandes velocidades del flujo durante las crecidas. Según esto último, la totalidad del área cubierta por un caudal con un periodo de retorno de 100 años, $T_r=100$ años se considera zona de amenaza alta y define así el retiro hidrológico. Como se demuestra en el Capítulo 15 y se concluye particularmente en el Numeral 15.5, la Quebrada La Castro en el Polígono Esfuerzos de Paz presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales. De esta manera, los caudales para la modelación hidráulica corresponden a los de aguas claras incrementados en un 40% según lo estipula el Acuerdo 09 de 2012 para cuando existe amenaza de torrencialidad. Es por esta razón que para definir las zonas de retiro por efectos de hidrología, se ha tenido en cuenta la amenaza por avenidas torrenciales.

Posteriormente, se tomó el mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa (Mapa 39 y Mapa 40) Se detectaron las zonas de amenaza media o alta y en ellas se tomó la topografía de detalle para marcar el retiro geológico. Se marcó el retiro dado por una superficie de falla teórica de los taludes aledaños al cauce (Tr=10 años) con una inclinación respecto de la horizontal de 50° cuando la amenaza era media y de 45° cuando la amenaza era alta. El retiro geológico se delimitó entonces considerando las franjas de amenaza media y alta presentes alrededor del cauce (Tr=10 años). A partir de allí se realizó una ampliación de 5 m de dicha franja si la amenaza era media y de 10 m si la amenaza era alta.

En el caso particular del Polígono Esfuerzos de Paz, las pendientes del terreno aledaño al cauce de la Quebrada La Castro son tan críticas como la metodología expone en dos pequeños sectores al interior del polígono, ubicados en la zona norte y central del cauce. Esto implica entonces que el retiro a respetar para la Quebrada Castro dentro del Polígono Esfuerzos de Paz es el retiro hidrológico más el geológico. El mapa con los retiros de la Quebrada La Castro queda entonces definido en la Mapa 79.

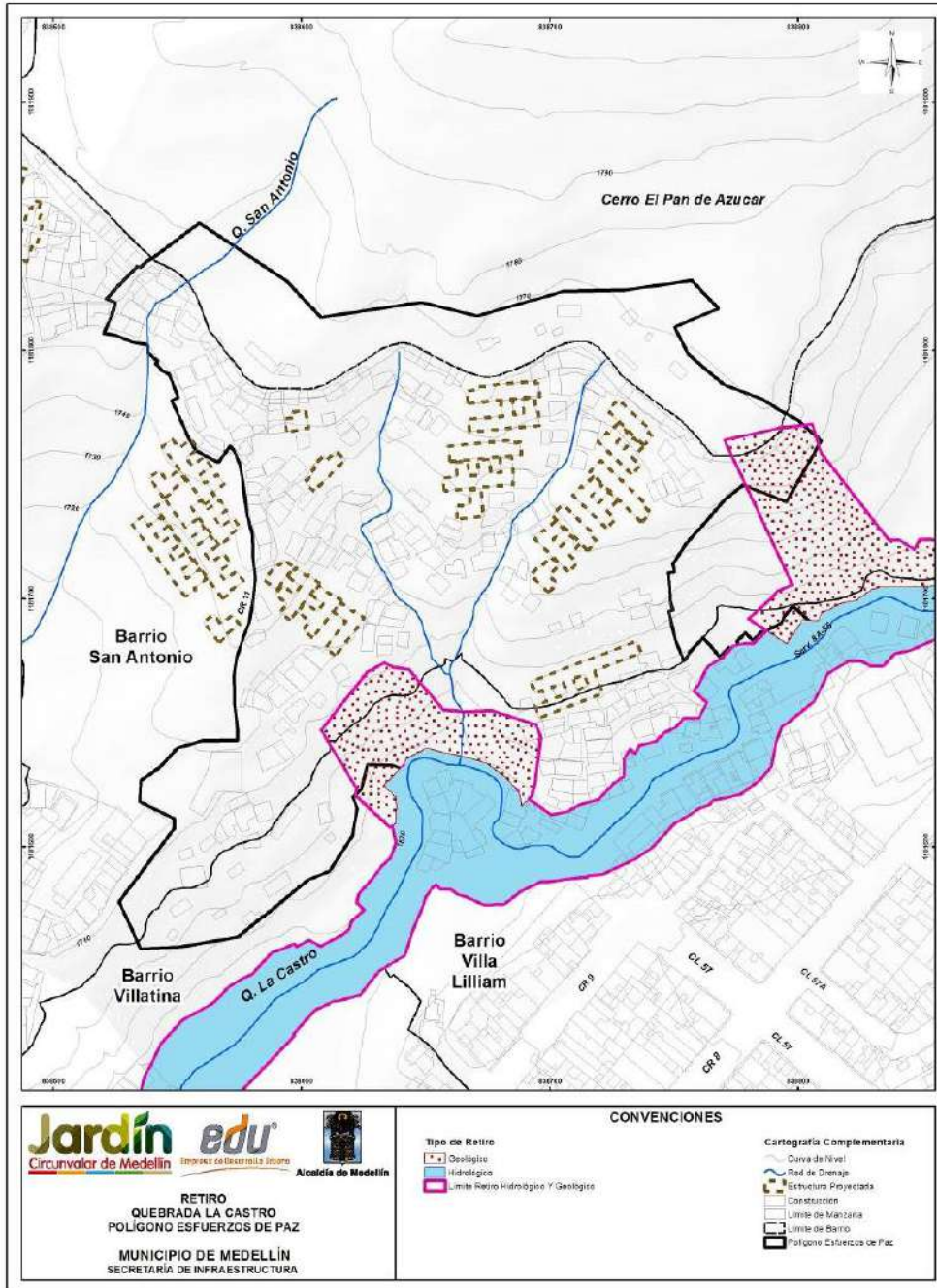
Es importante aclarar que este mapa se analizó en función de los procesos morfodinámicos de la zona. Como se observa en el mapa de procesos morfodinámicos, los mapeados para la Quebrada La Castro en el Polígono Esfuerzos de Paz, corresponden a procesos inactivos incluso en la fecha de las fotografías en las cuales fueron detectados. Se consideró entonces que los retiros no debían ser afectados por la presencia de procesos inactivos desde hace varias décadas.

Se resalta el hecho de que 6 de las 62 estructuras, que se mostraron en el Mapa 71 y en la Tabla 87, con riesgo alto no mitigable por movimientos en masa, presentan alto riesgo no mitigable porque podrán ser impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda y al mismo tiempo porque se encuentran dentro de la zona que representa el retiro geológico dado para la Quebrada La Castro. Las características de dichas estructuras se presentan en la Tabla 88.



Tabla 88. Estructuras en alto riesgo no mitigable por retiro geológico de la Quebrada La Castro

ESTRUCTURA	COBAMA	CBML	DIRECCION
126	0814001	08140010342	Cr 10 N.55-187_ Cr 10 N.55-189 Int.101
159	0814001	08140010048	Cr 10 N.55-248
160	0814001	08140010047	Cr 10 N.55-232_Cr 10 N.55-228
184	0814001	08140010049	Sin dirección
219	0814001	08140010147	Cr 10 N.55-420 Int.144
220	0814001	08140010148	Cr 10 N.55-420 Int.147

Además, se resalta el hecho de que la estructura 160 presenta riesgo estructural medio y riesgo de personas bajo (Numeral 17.3), según el estudio detallado realizado y presentado en este informe. Sin embargo, debido a que se encuentra localizada dentro de la zona demarcada por el retiro geológico de la Quebrada La Castro, el riesgo presentado para la vivienda es alto no mitigable.



Mapa 79. Retiro hidrológico y geológico planteado en la Quebrada La Castro dentro del Polígono Esfuerzos de Paz (51_EDPRetiroHidrologicoyGeologico_Medellin_C y 51_EDPRetiroHidrologicoyGeologico_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

21. PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

En los Capítulos 17 y 18 de este informe se presentaron los resultados de las evaluaciones del riesgo por movimientos en masa y por inundaciones y avenidas torrenciales. En este capítulo se presenta lo relacionado con el planteamiento de las obras de mitigación dirigidas a control de los factores de riesgo detectados y presentados en los capítulos mencionados.

Para lograr lo anterior, se diseñaron fichas de análisis de alternativas de solución, las cuales se presentan como anexo a este informe. Se trata de dos fichas, una en la cual se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por movimientos en masa y otra en la que se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

Cada una de las fichas contiene una descripción general de la problemática, incluyendo esta descripción un registro gráfico, el riesgo, la vulnerabilidad y la amenaza, además de una directriz general sobre las soluciones analizadas. Luego se presentan las alternativas evaluadas, mostrándose de cada una de ellas las características, el esquema, las ventajas, las desventajas y el costo aproximado. Después se muestra la valoración de cada una de las soluciones considerando los aspectos técnico, económico, socio ambiental y mantenimiento. A estos aspectos se les dio una importancia de 40%, 20%, 30% y 10%, en su orden, de manera que juntos constituyen el 100%. Cada aspecto fue subdividido y puntuado, de manera que se da una valoración final de cada solución que es el resultado de sumar los productos del porcentaje asignado a cada subdivisión efectuada por la puntuación otorgada. La mejor solución para mitigación del riesgo es la que mayor valor obtenga luego de hacerse la operación descrita.

Las fichas para el análisis de las respectivas obras de mitigación por movimientos en masa se presentan en el Anexo 07.

21.1 OBRAS PARA MOVIMIENTOS EN MASA

El análisis de riesgo efectuado por movimientos en masa, dio lugar a un número importante de viviendas del polígono con riesgo alto. Así las cosas, se procedió a la ejecución de análisis de estabilidad localizados por medio de secciones transversales que consideraran la localización de los focos de inestabilidad y en el sentido de la trayectoria principal de estos. La localización en planta de los Perfiles 1 a 5, que fueron los analizados se muestra en la Figura 219. La Figura 220 muestra la zonificación del Polígono Esfuerzos de Paz de acuerdo con estos cinco perfiles, indicándose el foco de inestabilidad potencial asociado a cada uno de ellos.

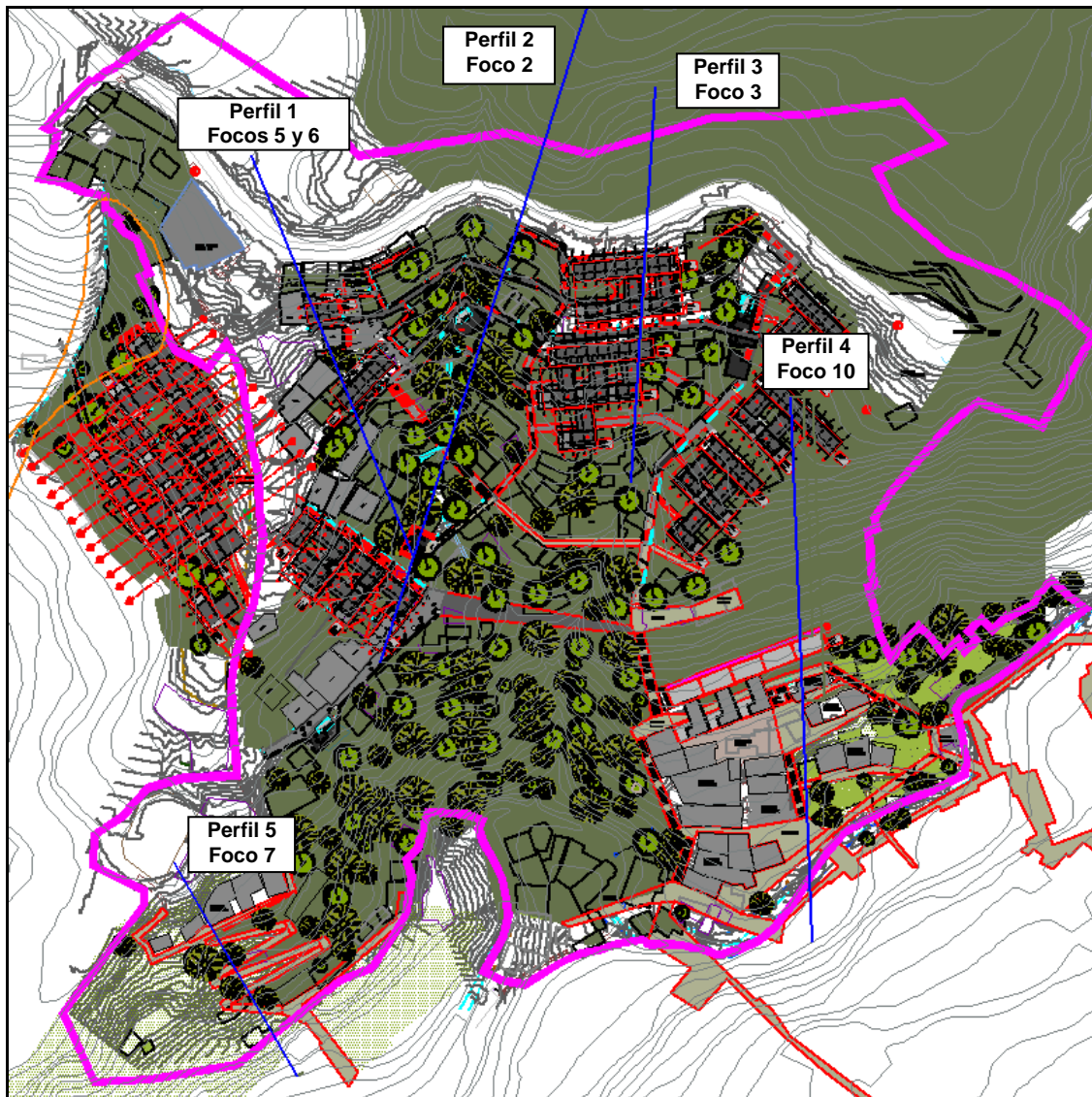


Figura 219. Localización en planta de los Perfiles 1 a 5 cercanos a los Focos 2, 3, 5, 7 y 10 incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles



Figura 220. Zonificación Polígono Esfuerzos de Paz

Los cinco perfiles mencionados, se investigaron en condiciones actuales y teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y sismo, obteniéndose los resultados de la Figura 221 a la Figura 225. El valor de probabilidad de falla incluido en cada figura hace referencia al obtenido con el software de análisis, pero normalizado para un periodo de 50 años. Se observa que los resultados obtenidos, efectivamente, ratifican a los focos como puntos probables de inestabilidad, pudiéndose hacer los comentarios que se presentan más adelante en este mismo numeral.

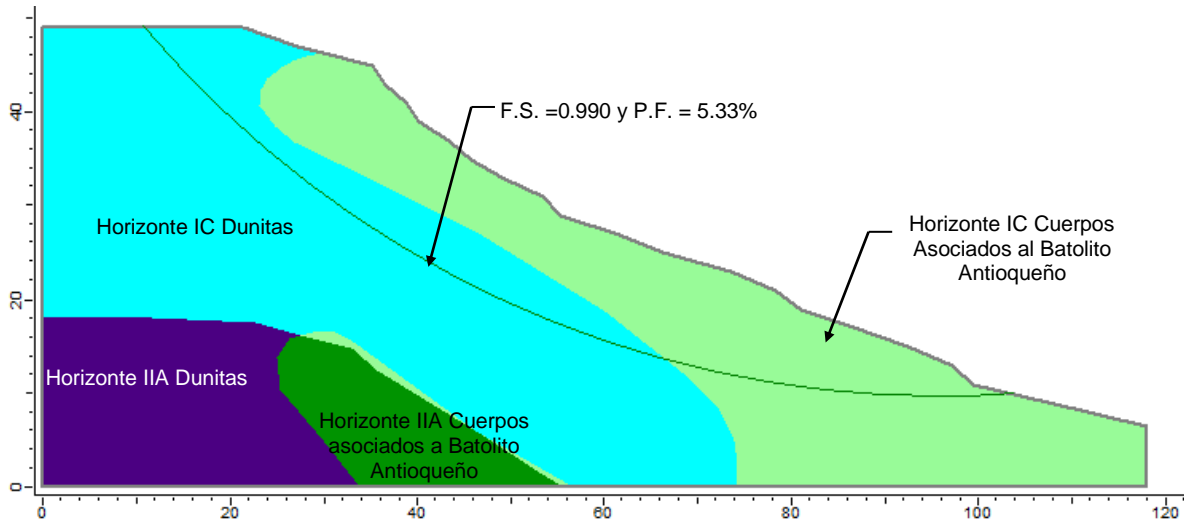


Figura 221. Análisis de estabilidad seudoestáticos del Perfil 1 en condiciones naturales

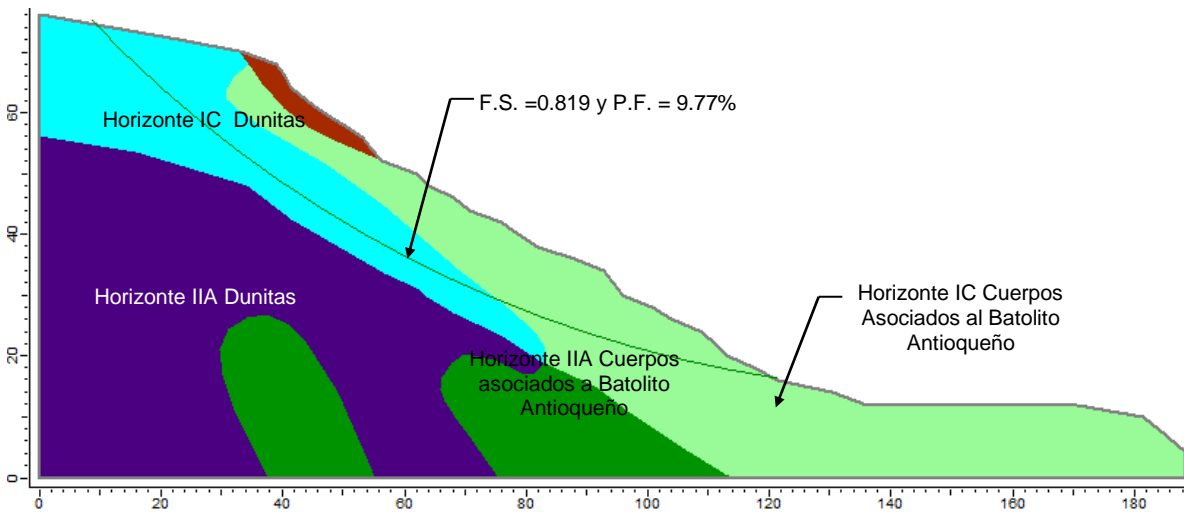


Figura 222. Análisis de estabilidad seudoestáticos del Perfil 2 en condiciones naturales

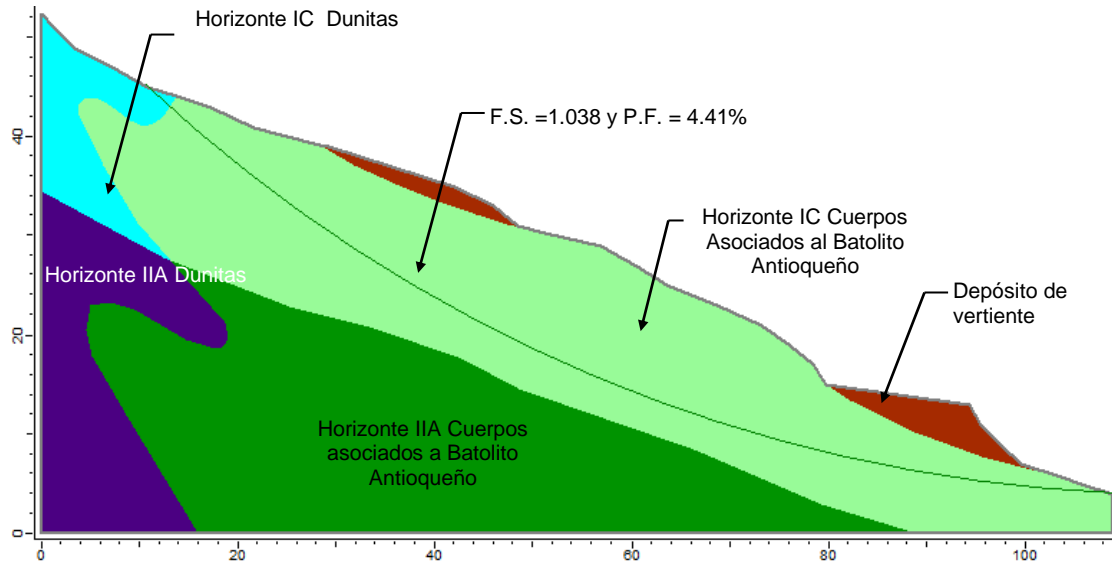


Figura 223. Análisis de estabilidad seudoestáticos del Perfil 3 en condiciones naturales

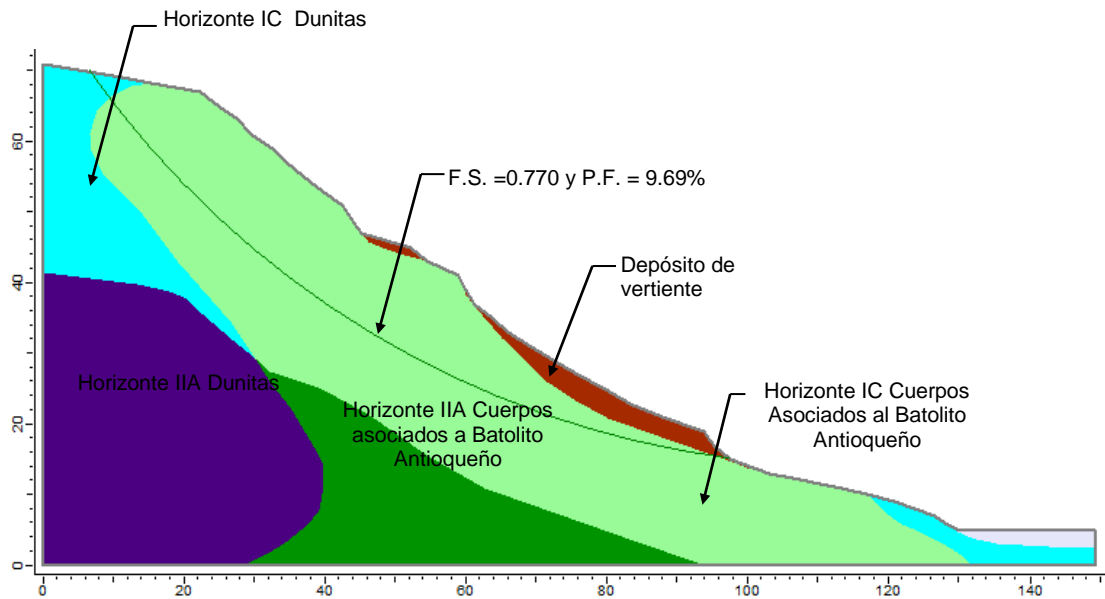


Figura 224. Análisis de estabilidad seudoestáticos del Perfil 4 en condiciones naturales

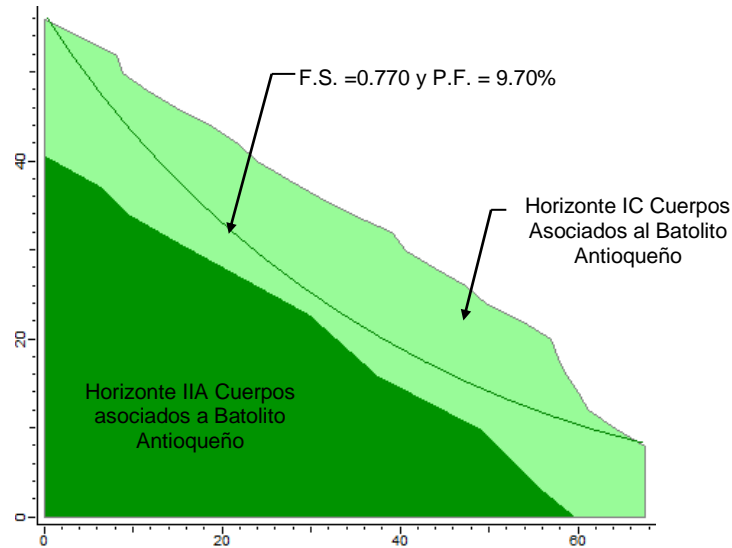


Figura 225. Análisis de estabilidad seudoestáticos del Perfil 5 en condiciones naturales

El Perfil 1, representativo de las condiciones de estabilidad asociados a los Focos 5 y 6, efectivamente da lugar a superficies de falla con factores de seguridad límites en caso de sismo. No obstante, la probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados presentados en la Figura 221 es ligeramente menor que aquella tenida en cuenta como más crítica en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo es aceptable, pero para las estructuras que hagan parte del Proyecto Barrios Sostenibles se deben considerar cimentaciones profundas, basadas en análisis de estabilidad muy detallados.

En la Figura 226 se observa como en la parte alta de la zona asociada al Foco 5 se tienen banqueros realizados por la comunidad con el objeto de construir viviendas y que tales zonas han sido afectadas por fenómenos de erosión. De esta forma, adicionalmente se recomienda capacitación a la población para evitar que se construya sobre esta zona de ladera, considerando no sólo el riesgo, sino también que de acuerdo con el POT (Acuerdo 48 de 2014) esta zona debe guardarse para protección forestal. Se recomienda, así mismo, revegetalizar o ubicar trinchos donde sea necesario para evitar que continúe desarrollándose la erosión en la zona.



Figura 226. Imagen asociada al Perfil 1 (Foco 5) mostrando erosión

El Perfil 2, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 2, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad límites en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados presentados en la Figura 222 está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector ni para las que se proyecten como parte del Proyecto Barrios Sostenibles. Un aspecto sobre el cual se llama la atención es el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. Estos resultados se deben, por un lado, a la geomorfología dentro de la cual se ubica el depósito de vertiente (una especie de batea). Por otro lado, se relacionan con el hecho de que los saprolitos de las Dunitas y de los Cuerpos Asociados al Batolito Antioqueño son muy espesos y de resistencia relativamente baja.

Considerando esto que acaba de anotarse para el Perfil 2, se hicieron los análisis de estabilidad que se presentan en la Figura 227. Se puede observar que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se deben implementar como mínimo las tres pantallas de contención que se muestran en esta figura. Estos resultados indican entonces que, si se aceptan como críticos los niveles de riesgo de este estudio, es necesario reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto debido a la inestabilidad del terreno.

La dirección de este perfil, implica una afectación de viviendas existentes actualmente en el Polígono Esfuerzos de Paz. No implica afectación sobre estructuras proyectadas para el proyecto Barrios Sostenibles, las cuales serían consideradas dentro del Perfil 3 del que se habla a continuación.

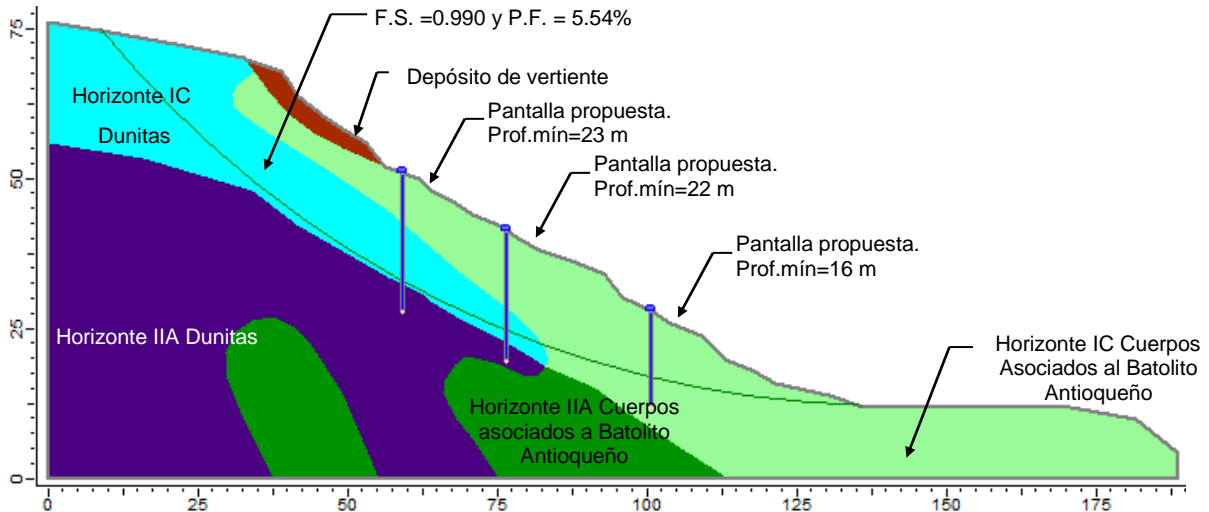


Figura 227. Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución en pantalla de pilas

El Perfil 3, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 3, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad muy cerca del límite inferior aceptable en caso de sismo. Igual que en el caso del Perfil 2, se llama la atención sobre el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. Estos resultados se deben, por un lado, a la geomorfología dentro de la cual se ubica el depósito de vertiente (una especie de batea). Por otro lado, se asocian al hecho de que los saprolitos de las Dunitas y de los Cuerpos Asociados al Batolito Antioqueño son muy espesos y de resistencia relativamente baja. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados presentados en la Figura 223 es menor que aquella considerada como más crítica en este estudio, lo que podría implicar que este nivel de riesgo es aceptable.

Aunque lo anterior es cierto, por las obras proyectadas como parte del Proyecto Barrios Sostenibles, se hicieron adicionalmente los análisis de estabilidad que se presentan en la Figura 228. Se puede observar que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se podrían aprovechar las obras del Proyecto Barrios Sostenibles para implementar una pantalla de contención como la mostrada en la figura que acaba de citarse. Se reduce adecuadamente la probabilidad de falla, lo cual resulta bastante beneficioso para el Proyecto Barrios Sostenibles. Se recomienda que las viviendas con alta vulnerabilidad debida a deficiencias de las estructuras sean repotenciadas para controlar el factor de riesgo.

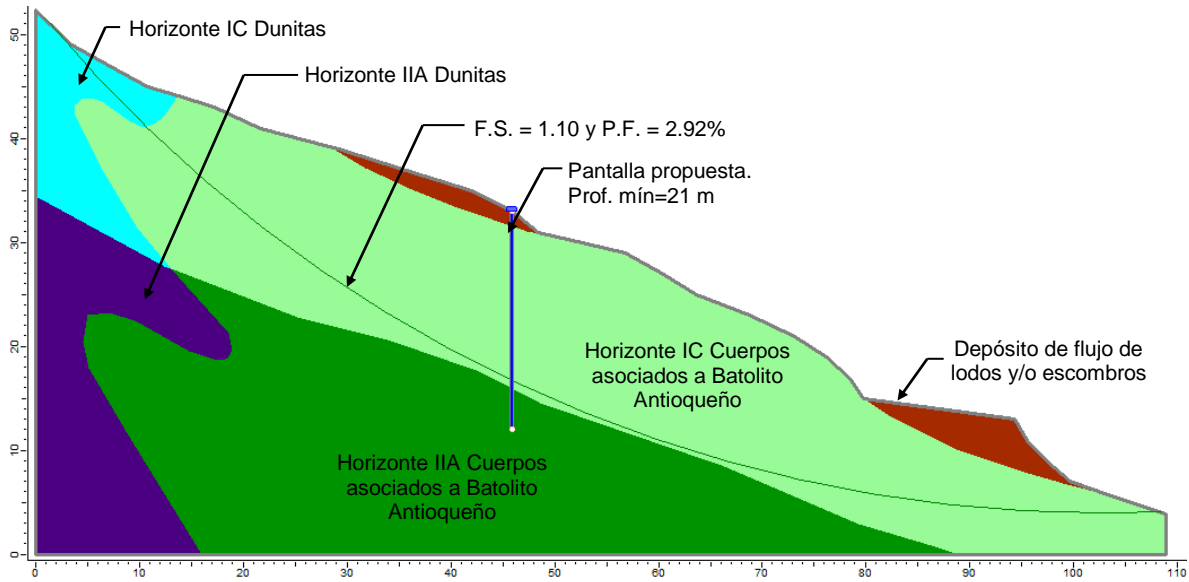


Figura 228. Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución en pantalla de pilas

En la Figura 229 se observan evidencias que permiten verificar la presencia de los denominados Focos 2 y 3. Se muestra como en la zona asociada a los mismos se presenta una alta pendiente, en conjunción con fenómenos de erosión e incluso presencia de procesos morfodinámicos.





a) Desgarre con evidencias de erosión



b) Alta pendiente

Figura 229. Imágenes asociadas a Perfiles 2 y 3 (Focos 2 y 3) mostrando erosión y alta pendiente

En lo que tiene que con la parte más alta de los Perfiles 2 y 3 se ratifica lo anotado para el Perfil 1. Se recomienda capacitación a la población para evitar que se construya sobre esta zona de ladera, considerando no sólo el riesgo, sino también que de acuerdo con el POT (Acuerdo 48 de 2014) esta zona debe guardarse para protección forestal. Se

	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

recomienda, así mismo, revegetalizar o ubicar trinchos donde sea necesario para evitar que continúe desarrollándose la erosión en la zona.

El Perfil 4, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 10, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad cerca del que pudiera considerarse límite inferior aceptable en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados presentados en la Figura 224 está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector ni para las que se proyecten como parte del Proyecto Barrios Sostenibles. Un aspecto sobre el cual se llama la atención es el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. Estos resultados se deben, por un lado, a la geomorfología dentro de la cual se ubica el depósito de vertiente (una especie de batea). Por otro lado, se asocian al hecho de que los saprolitos de las Dunitas y de los Cuerpos Asociados al Batolito Antioqueño son muy espesos y de resistencia relativamente baja.

Considerando esto que acaba de anotarse, se hicieron los análisis de estabilidad que se presentan en la Figura 230. Se puede observar que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se deben implementar como mínimo las cuatro pantallas de contención que se muestran en esta figura.

Adicionalmente, teniendo en cuenta que se trata de un número muy significativo de estructuras de contención, se hicieron los análisis que se muestran en la Figura 231, considerando una sola pantalla en la zona correspondiente a intervenciones del Proyecto Barrios Sostenibles. Se observa que se beneficia a las viviendas en la parte baja, esto debido a que no se tendrían allí superficies de falla críticas, que correspondan a factores de seguridad o probabilidades de falla inaceptables. No obstante, en la parte alta se tienen superficies críticas, con probabilidades de falla dentro del rango considerado como más crítico en este estudio.

Estos resultados indican entonces que, si se aceptan como críticos los niveles de riesgo de este estudio, es necesario construir por lo menos una pantalla ubicada según se muestra en la Figura 231. Si no se construye, sería necesario reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto.

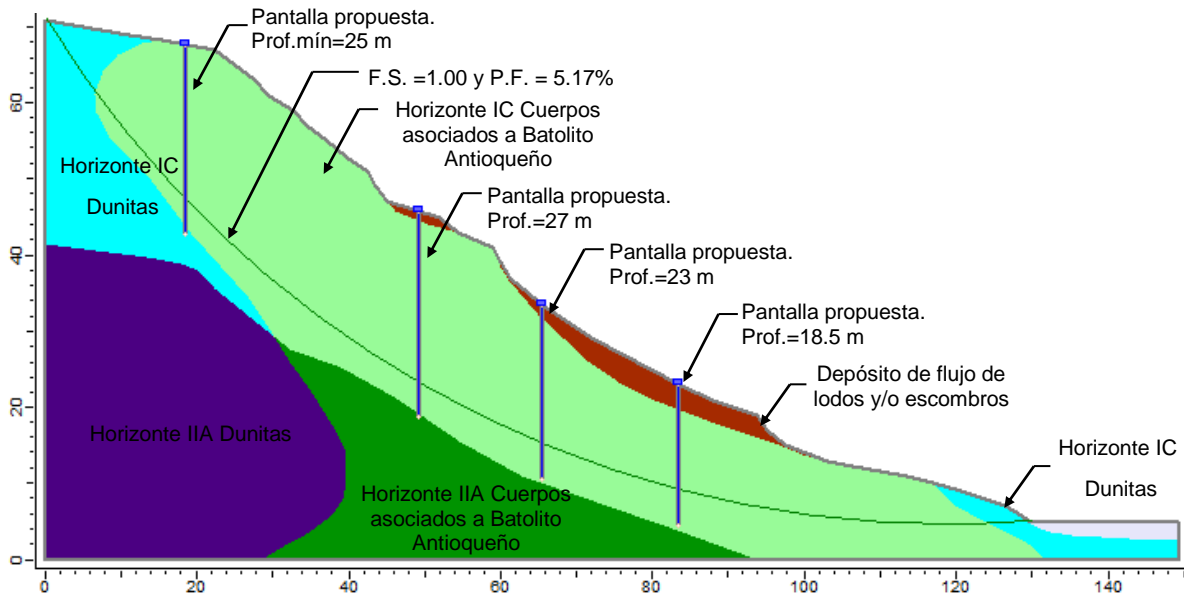


Figura 230. Análisis de estabilidad del Perfil 4 implementando solución en pantalla de pilas

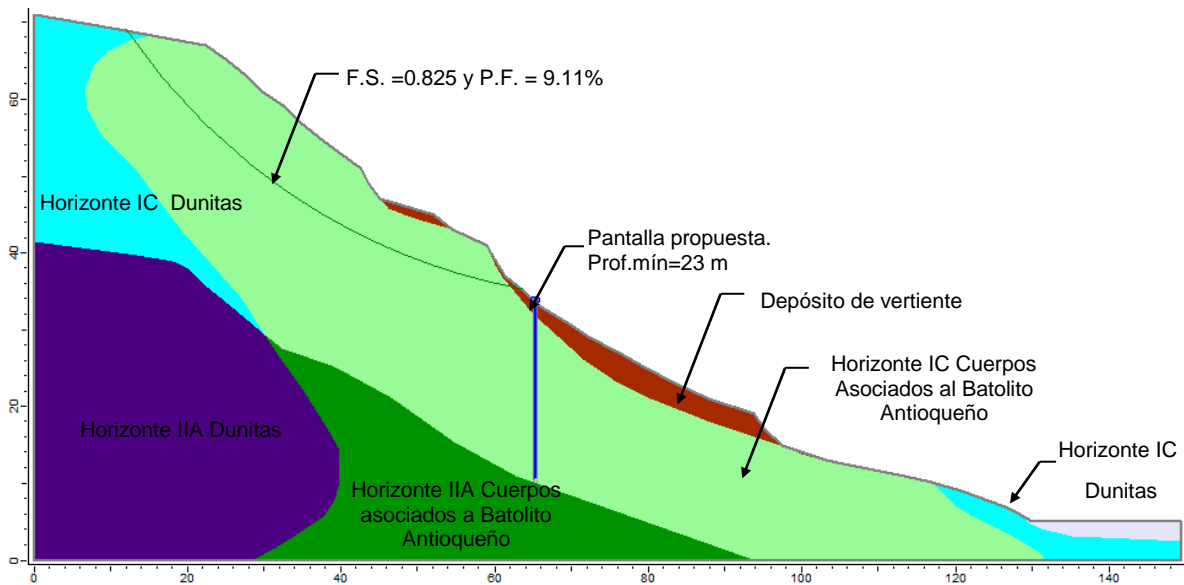


Figura 231. Análisis de estabilidad del Perfil 4, implementando solución con una sola pantalla de pilas

Adicionalmente, para lograr disminuir más la probabilidad de falla se deberán implementar obras de mitigación del área no urbanizada, de manera que se eviten fenómenos de erosión. Se recomiendan trinchos y reforestación con especies adecuadas para fines de estabilidad.

En cuanto a las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles, será necesario que su diseño tenga en cuenta estas condiciones de estabilidad, analizando superficies de falla profundas como las presentadas en este estudio.

En la Figura 232 se presentan imágenes asociadas con el Perfil 4 cercano al Foco 10. Se observa la alta pendiente en la cual se origina tal foco, así como las viviendas que podrían verse afectadas de producirse un movimiento en masa en el sector.



a) Viviendas afectadas por Foco 10

b) Alta pendiente.

Figura 232. Imágenes asociadas a Perfil 4 (Foco 10)

El Perfil 5, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 7, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad bajos en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados presentados en la Figura 225 está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector.

Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de estabilidad del Perfil 5, se hicieron los análisis que se presentan en la Figura 233. Se observa que con dos pantallas como las mostradas en esta figura se logra reducir la probabilidad de falla a valores aceptables. No obstante, la relación beneficio costo indica que lo mejor sería reubicar las viviendas. Esto por cuanto el costo de las pantallas de contención vs. el de reubicación de las viviendas es más alto. Además, hay que tener en cuenta que no se proyecta en el área de influencia de este foco construcciones del Proyecto Barrios Sostenibles.

En la Figura 234 se presentan imágenes asociadas al Perfil 5, cercano al Foco 7. En la parte alta se tiene la estructura del metrocable y desde ese punto hacia la parte baja se observa una pendiente alta donde se genera el foco mencionado.

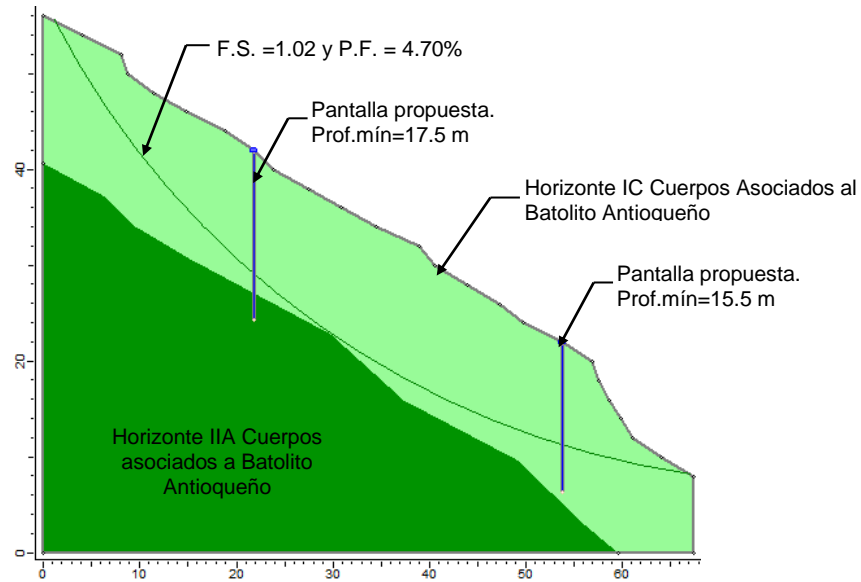


Figura 233. Análisis de estabilidad del Perfil 5 implementando solución con pantalla de pilas



Figura 234. Imágenes asociadas a Perfil 5 (Foco 7)

En la Figura 235 se presentan imágenes asociadas al Foco 11, donde se muestra no sólo la alta pendiente que caracteriza al polígono, sino también como las viviendas se encuentran en la zona de influencia de la Quebrada La Castro.



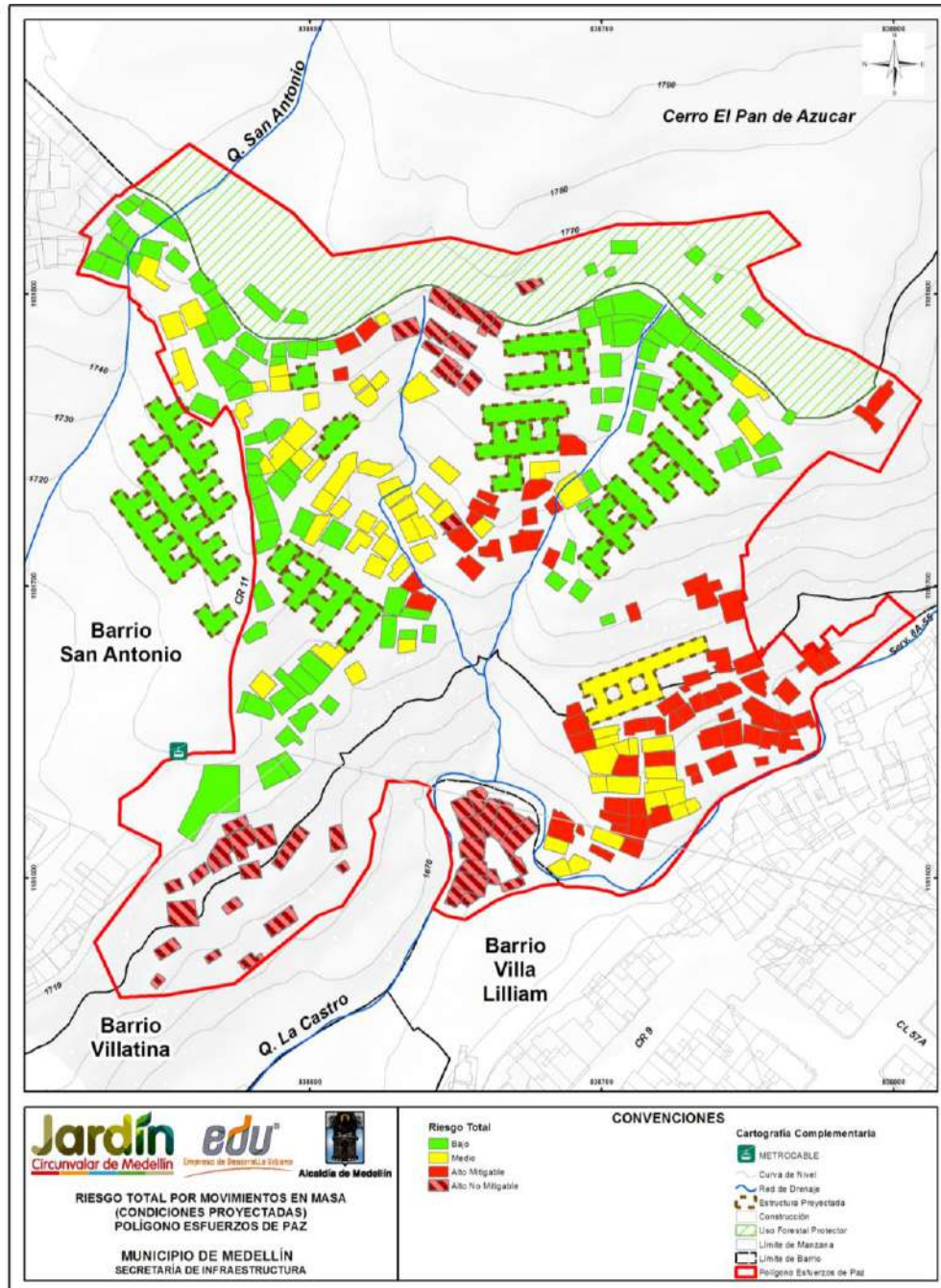
a) Zona de desvío de Quebrada



b) Alta pendiente

Figura 235. Imágenes asociadas a Foco 11

Considerando las observaciones hechas en cuanto a intervenciones recomendadas para el Polígono Esfuerzos de Paz, el mapa de riesgo total final quedaría como se muestra en el Mapa 80. Las viviendas que presentan alto riesgo no mitigable se debe principalmente a la inestabilidad del terreno y para ellas esto implica que deban ser reubicadas, es decir, no procede su mejoramiento. Las estructuras que presentan alto riesgo mitigable deben atender las recomendaciones indicadas en cada zona del polígono.



Mapa 80. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono Esfuerzos de Paz (46_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_C y 46_EDPRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T)

Finalmente, luego de efectuado el análisis de riesgo por movimientos en masa para el Polígono Esfuerzos de Paz y con el fin de monitorear los desplazamientos en la zona a largo plazo y poder establecer mecanismos de alarma, se propone un sistema de instrumentación compuesto por tres inclinómetros de 25 m de profundidad cada uno, localizados en las Zonas 1, 4 y 5 del polígono, como se muestra en la Figura 238. Se recomienda que esta instrumentación se instale próxima a los nuevos edificios de Barrios Sostenibles y que sean monitoreados con una frecuencia mínimo de una lectura mensual durante el primer año después de construidos los edificios, y dependiendo de los resultados de dicho monitoreo, sí no se detectan desplazamientos considerables en la zona, se recomienda un monitoreo preventivo de tres lecturas al año. A seguir se presentan algunos aspectos generales sobre los inclinómetros:

Las deformaciones laterales del terreno, en lo que tiene que ver con magnitud, dirección y profundidad de los movimientos, se monitorean con ayuda de los inclinómetros. Estos equipos, se deberán instalar en las zonas donde se proyectan la construcción de las pilas de los muros pantallas recomendados. De esta forma se podrá evaluar el comportamiento de las pantallas después de efectuado las labores correspondientes.

Estos elementos consisten de una tubería ranurada diametralmente, la cual se instala dentro de una perforación efectuada en un terreno en el que se sospecha que están ocurriendo o pueden ocurrir movimientos (Figura 236). Adicionalmente, se debe contar con un torpedo, el cual se usa primero para medir la posición inicial de la tubería cuando acaba de ser instalada y luego para medir las posiciones sucesivas de la tubería cuando esta se va moviendo.



**Figura 236. Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente
(Tomada de Roctest y Telemac)**

La función de la tubería es entonces proveer el acceso para el torpedo de lecturas. Las ranuras longitudinales marcadas en el interior de la tubería, controlan la orientación del torpedo y proveen una superficie desde la cual se pueden hacer lecturas repetibles.

Al instalar el inclinómetro se debe buscar que una de las ranuras quede en el mismo sentido en que se espera ocurra el movimiento, el cual se denomina convencionalmente Sentido A. Las ranuras ubicadas a 90° del Sentido A constituyen el denominado Sentido B y normalmente permiten controlar una orientación en la que no se esperan mayores movimientos.

Como se muestra en la Figura 237, se habla tanto del Sentido A+ como del Sentido A- y tanto del Sentido B+ como del Sentido B-. El Sentido A+ queda orientado hacia la dirección donde se espera que se den los mayores movimientos (pendiente abajo) y el Sentido A- en dirección contraria (pendiente arriba). Según esto, los Sentidos A-, B+ y B- se encuentran orientados hacia donde no se espera que se den mayores movimientos.

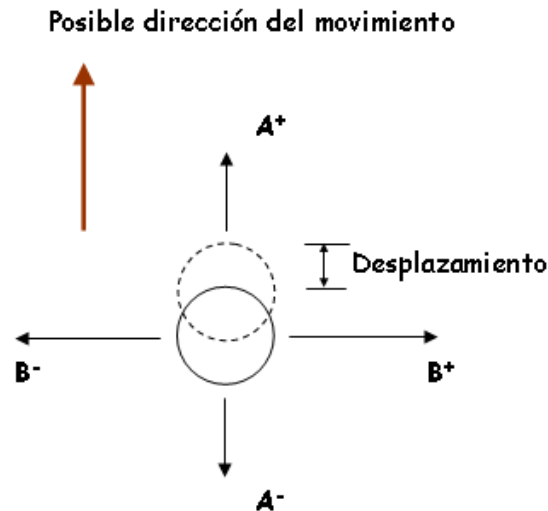


Figura 237. Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros

Esta información se presenta, entre otras razones, para que se tenga en cuenta en los procesos de contratación de sistemas de instrumentación correspondientes. Especialmente lo indicado en cuanto a la tubería mostrada en la Figura 236 se considera de especial relevancia. El Plástico ABS del cual están hechas las tuberías de esta figura junto con el tipo de ensamble que es interno, hacen que sean precisas, de alta durabilidad y permiten además que se puedan instalar en perforaciones de diámetro apenas ligeramente mayor que 70 mm.

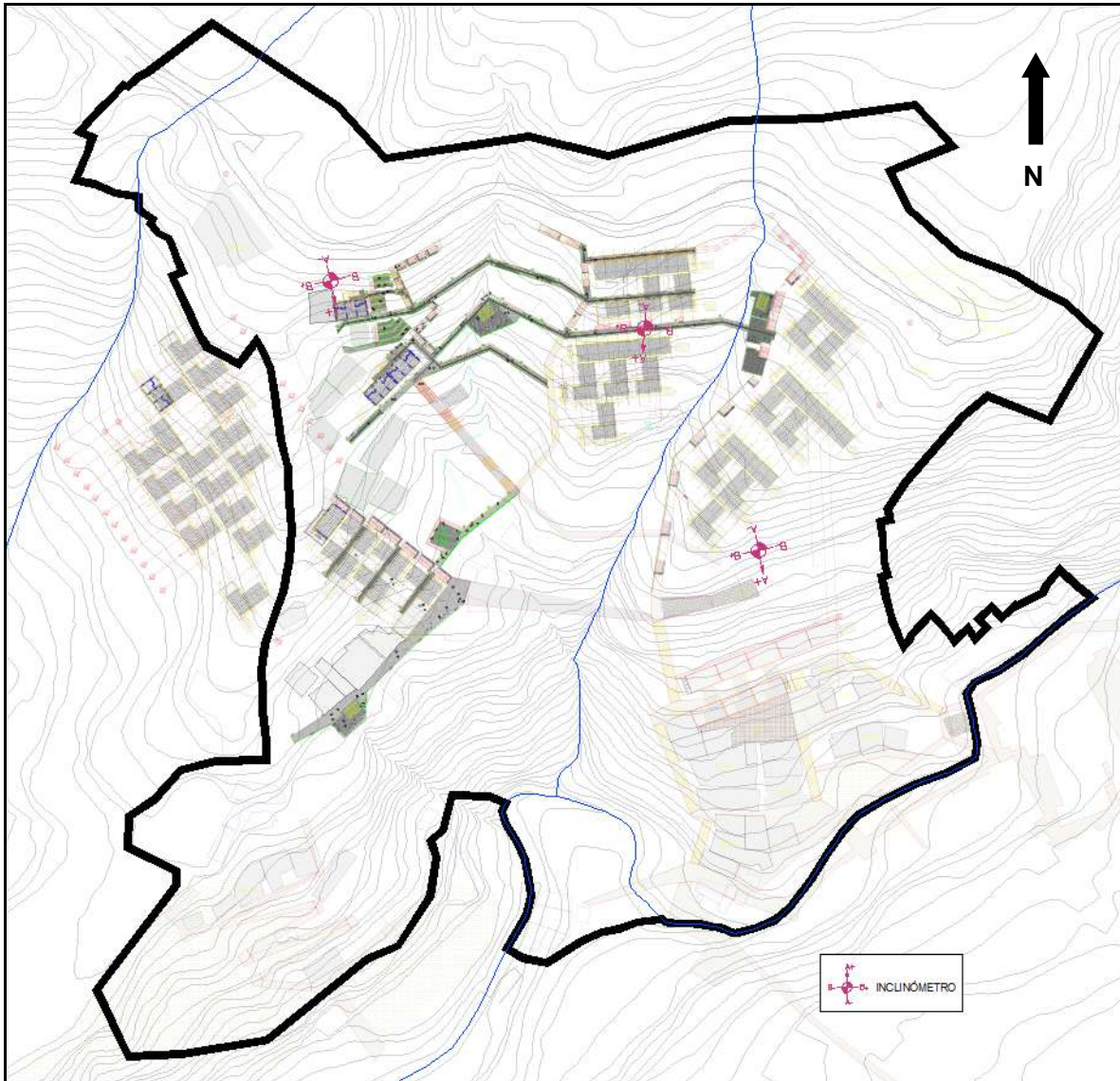




Figura 238. Localización de inclinómetros propuestos para monitoreo de Polígono Esfuerzos de Paz incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles

21.2 OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

21.2.1 Análisis de resultados en condiciones actuales

En este polígono de estudio se presenta un número importante de viviendas con riesgo alto por inundaciones, debido a la insuficiencia hidráulica en la sección de los drenajes y a la invasión e intervención de los cauces por parte de las viviendas. Por ello se plantean

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

diversas obras que buscan incrementar o recuperar la capacidad del sistema de drenaje al interior del polígono.



Para el drenaje Afluente La Castro 1, no existe una sección de cauce definida que permita un adecuado transporte de flujo, por lo que se determinó que la capacidad del sistema es inferior a 2.33 años periodo de retorno. Para solucionar la problemática se plantean diversas obras, a saber: un canal con fondo uniforme a borde de vía (Carrera 11) de 1.0 m de ancho y 1.0 m de alto, hasta descargar en una poceta de la cual se deriva un box culvert de 1.20 m x 1.20 m hasta descargar en el canal natural cuyo cauce se proyecta reconfigurar con una sección trapezoidal de 1.2 m de ancho y taludes 1 H:1 V, y acompañado también de un sistema de llaves en concreto ciclópeo para protección del lecho.

En el caso del drenaje Afluente La Castro 2, la deficiencia hidráulica se debe a que no existe una sección definida del cauce por lo que se presenta un desbordamiento sin control generando amplias manchas de inundación, mostrando una capacidad inferior a 2.33 años periodo de retorno. A partir de esta situación se plantea la reconfiguración del cauce con una sección trapezoidal de 1.0 m de ancho y taludes 1.0H:1.0V con una altura aproximada de 1.0 m, acompañado de un sistemas de llaves de fondo en concreto ciclópeo y de revegetalización del canal proyectado, hasta empalmar con el canal natural existente aguas abajo. Adicionalmente, se plantea la construcción de un box culvert bajo la vía principal de acceso (Carrera 11) de dimensiones 1.0 m de ancho por 1.0 m de alto.

Para la Quebrada San Antonio, al igual que lo descrito en los afluentes, el tramo dentro de la zona del polígono, no se observa una sección natural definida que permita un adecuado transporte, por lo que se determinó que la capacidad del sistema es inferior a 2.33 años periodo de retorno. Se plantean diferentes obras para solucionar la problemática, donde se proyecta dos canales de fondo uniforme a borde de vía de 1.0m de ancho y alto, que descargan a una poceta para luego transportar el flujo por medio de un box culvert que presenta una sección cuadrada de 1.5 m, esta obra se conecta a un canal trapezoidal natural de 1.0 m de ancho y taludes 1.0H:1.0V acompañado de un grupo de llaves en concreto ciclópeo transversales a este como medida de mejoramiento y protección del lecho. El canal natural de sección trapezoidal descarga sus aguas, por medio de una transición, en un canal de concreto de dimensiones aproximadas de 1.0 m de ancho por 1.5m de alto que varía a lo largo del tramo, parte de este canal será retirado para la reconfiguración y adecuación del canal natural con la debida transición.

Con las obras proyectadas en la Quebrada San Antonio, Afluente La Castro 1 y Afluente La Castro 2, se elimina el riesgo alto por inundaciones existente actualmente para diversas estructuras y viviendas dentro del polígono de estudio. Sin embargo, quedarán otras viviendas con carácter de riesgo alto no mitigable por inundaciones por estar ubicadas en cercanías de los cauces, de las obras o reconfiguraciones proyectadas.

Por su parte, La Quebrada La Castro, principal corriente hídrica de la zona de estudio, es generadora de amenaza y riesgo alto tanto por inundaciones como por avenidas torrenciales para el polígono en estudio. La problemática se origina por diversos factores:

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

en primer lugar, desde el punto de vista de la amenaza, el tamaño de la cuenca que genera una importante cantidad de escorrentía superficial, las condiciones inestables de sus laderas, las características de su cauce principal, entre otros; y desde otro punto de vista, la intervención antrópica del cauce como el asentamiento de viviendas y habitantes en las franjas de inundación y dentro de los retiros hidrológicos. Estas condiciones generan el carácter de riesgo alto no mitigable a una importante cantidad de viviendas y estructuras ubicadas en cercanías del cauce de la quebrada La Castro y por tanto se plantea el retiro de las construcciones contenidas o afectadas por estos fenómenos de inundación y torrencialidad y dejando los márgenes como llanuras de inundación naturales. Se recomienda que luego de recuperar las zonas de retiro de la Quebrada La Castro se apliquen medidas de protección como revegetalización, y se controle el uso del territorio según como lo indica el Plan de Ordenamiento Territorial para estas zonas de retiro.

Finalmente, en los Planos P-2445-EP-OM-01 y P-2445-EP-OM-03, se presentan los diseños de estas estructuras mencionadas que dan solución a la problemática de riesgo alto para un importante número de viviendas del polígono.

En la geodatabase que corresponde al Anexo 12 se presentan los mapas tipo raster de velocidades y profundidades de flujo para estas condiciones existentes.



21.2.2 Análisis de resultados en condiciones proyectadas

Los análisis en condiciones existentes se encuentran descritos en la evaluación hidráulica presentada en el Numeral 12.3, donde se especifican los resultados de las diferentes variables hidráulicas y se muestran las manchas de inundación, a partir de las cuales se plantearon las diferentes obras de mitigación.

Las manchas de inundación, así como la zonificación de la amenaza y del riesgo por inundaciones en condiciones proyectadas se presentan respectivamente en el Mapa 81, el Mapa 82 y el Mapa 83.

Las manchas de avenidas torrenciales, así como la zonificación de la amenaza y del riesgo por avenidas torrenciales en condiciones proyectadas se presentan respectivamente en el Mapa 84, el Mapa 85 y el Mapa 86. En el Mapa 87 se muestra el retiro a la quebrada planteado por el POT (2014) y el retiro hidrológico en condición proyectada obtenido del presente estudio para el caso más desfavorable, es decir, para un evento de avenidas torrenciales.

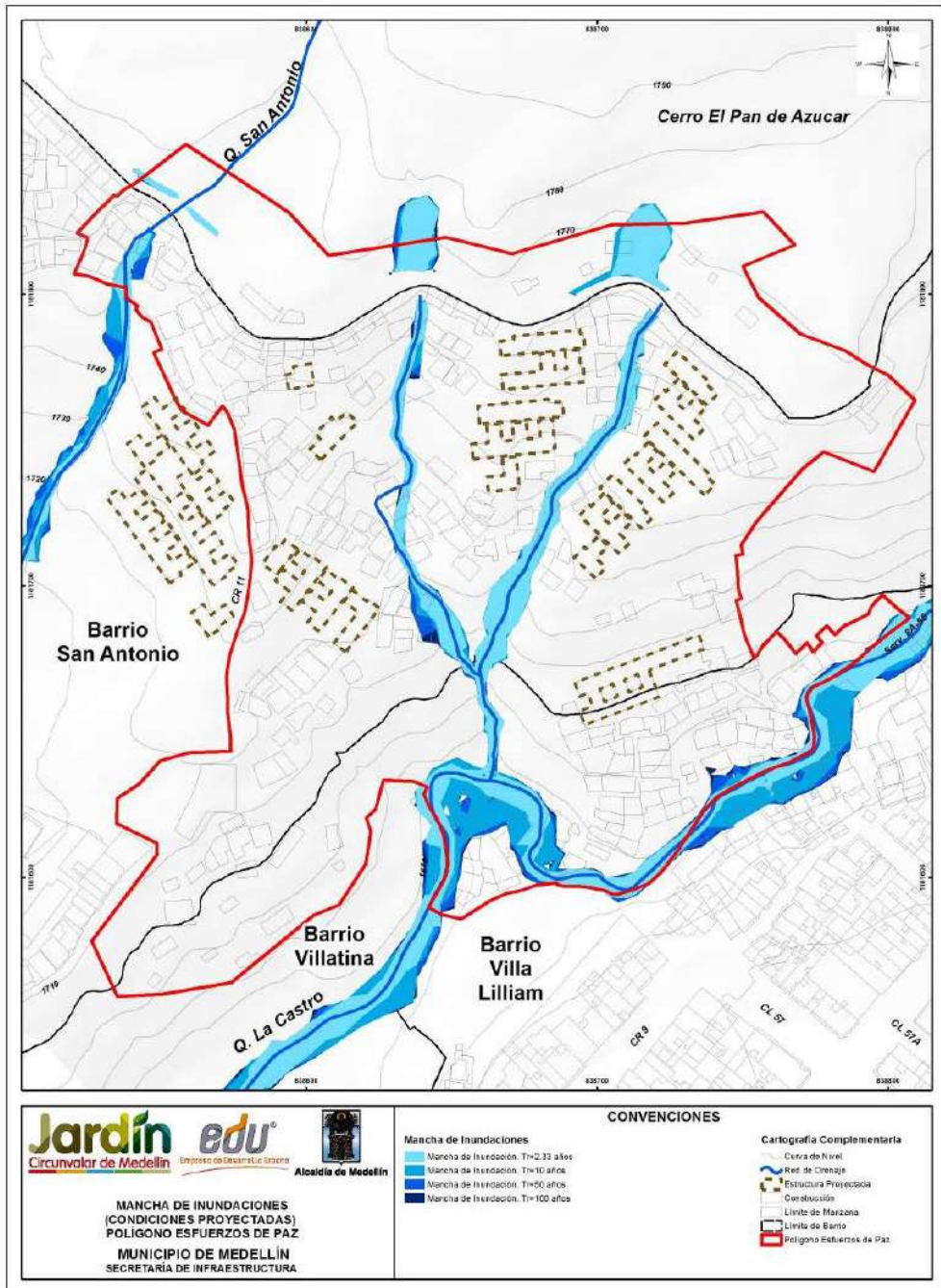
Los resultados obtenidos para estas condiciones proyectadas indican que las obras propuestas permiten la mitigación del riesgo alto por inundaciones existente en diversas viviendas ubicadas al interior del Polígono Esfuerzos de Paz, específicamente al generado por las quebradas Afluente La Castro 1, Afluente La Castro 2 y la quebrada San Antonio. En relación con las condiciones existentes, se presentarán cambios apreciables en las variables de profundidades y velocidades, tal como se presenta en las memorias del Anexo 05, significando siempre una mejoría en el comportamiento hidráulico de la

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

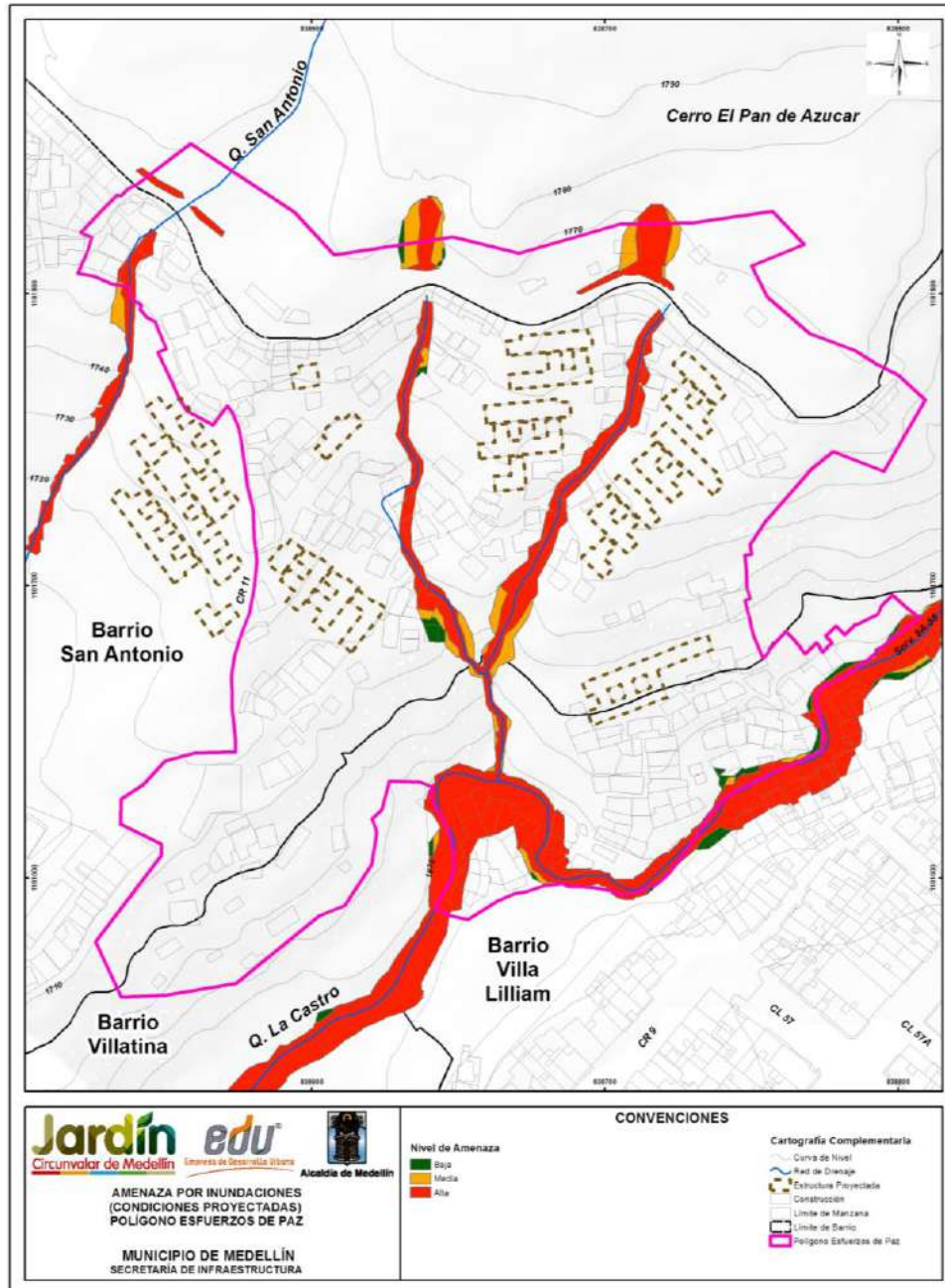
corriente, toda vez que las obras permitirán captar y conducir adecuadamente la escorrentía que confluye a cada uno de los cauces y obras.

Las condiciones proyectadas de la Quebrada La Castro, que consisten en la recuperación de sus zonas de retiro hidrológico afectadas por inundaciones y avenidas torrenciales, permiten concluir que el retiro de las viviendas permite mejorar el comportamiento hidráulico de la corriente, reduciendo profundidades de flujo en diversas zonas y por ende la intensidad del fenómeno.

En la geodatabase que corresponde al Anexo 12 se presentan los mapas tipo raster de velocidades y profundidades de flujo para estas condiciones proyectadas.

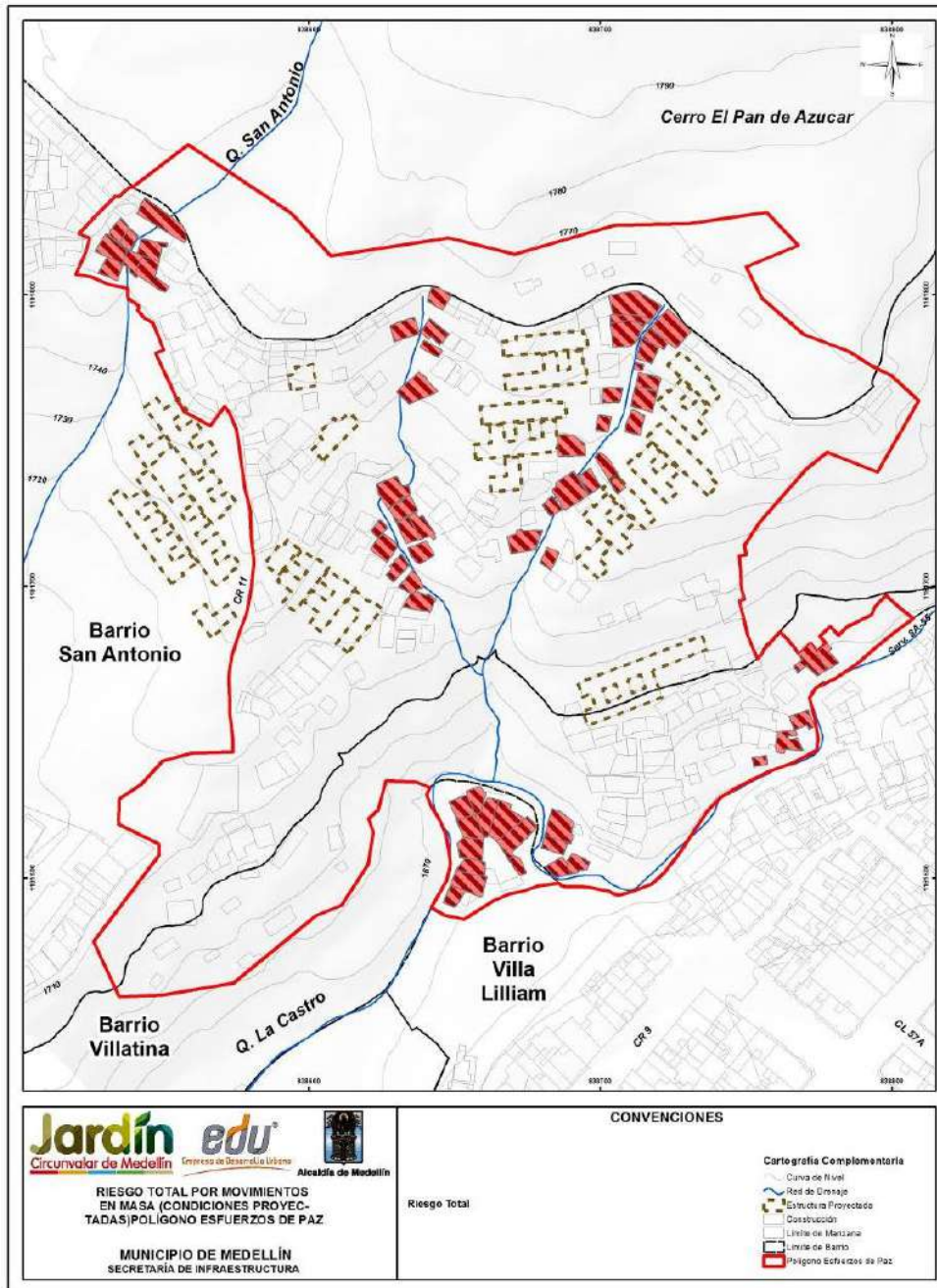


Mapa 81. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno. Polígono Esfuerzos de Paz. Condiciones Projectadas (22_EDPManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_C y 22_EDPManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_T)

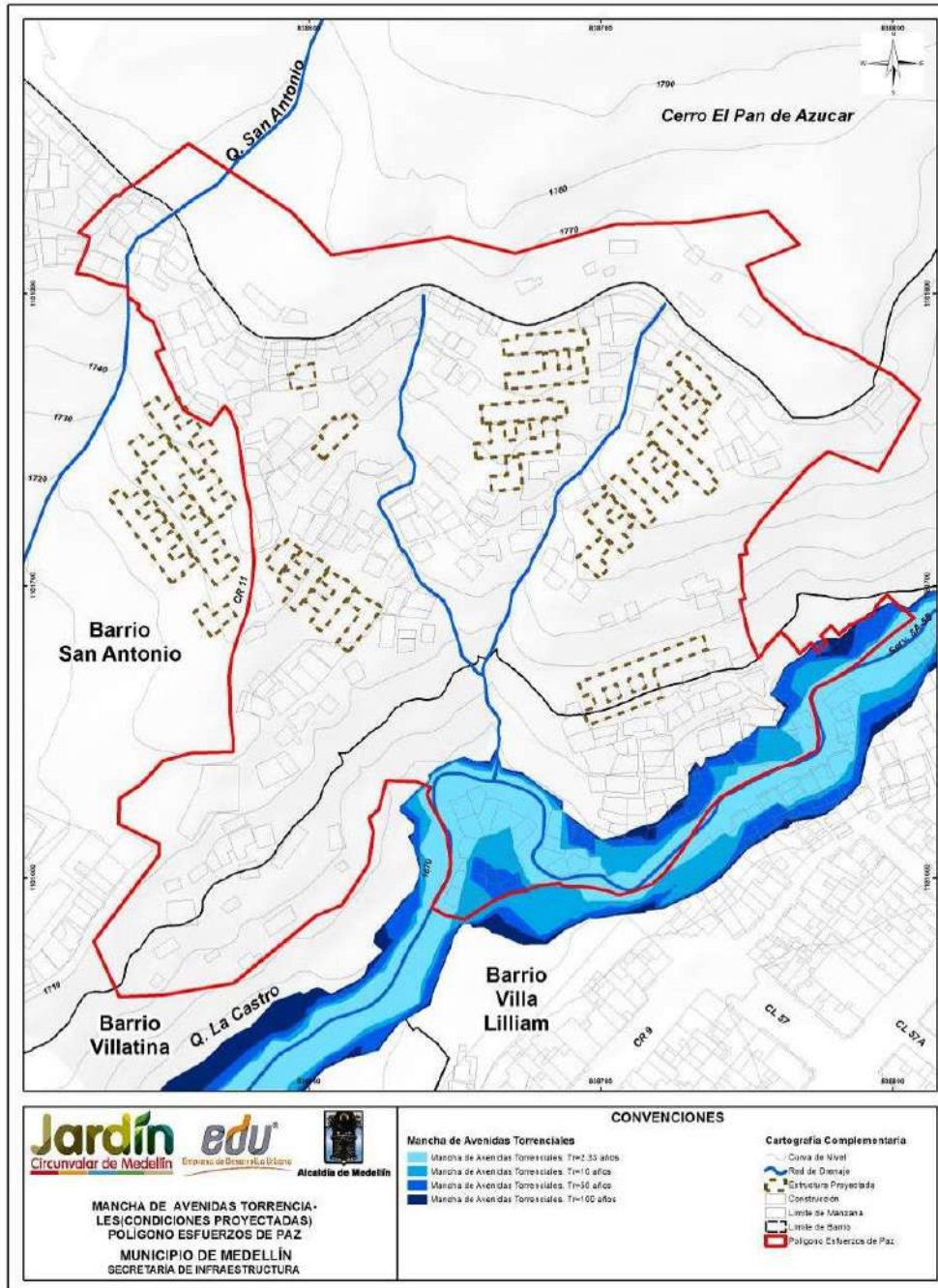


Mapa 82. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas la Castro y San Antonio y los Afluentes La Castro 1 y La Castro 2. Polígono Esfuerzos de Paz

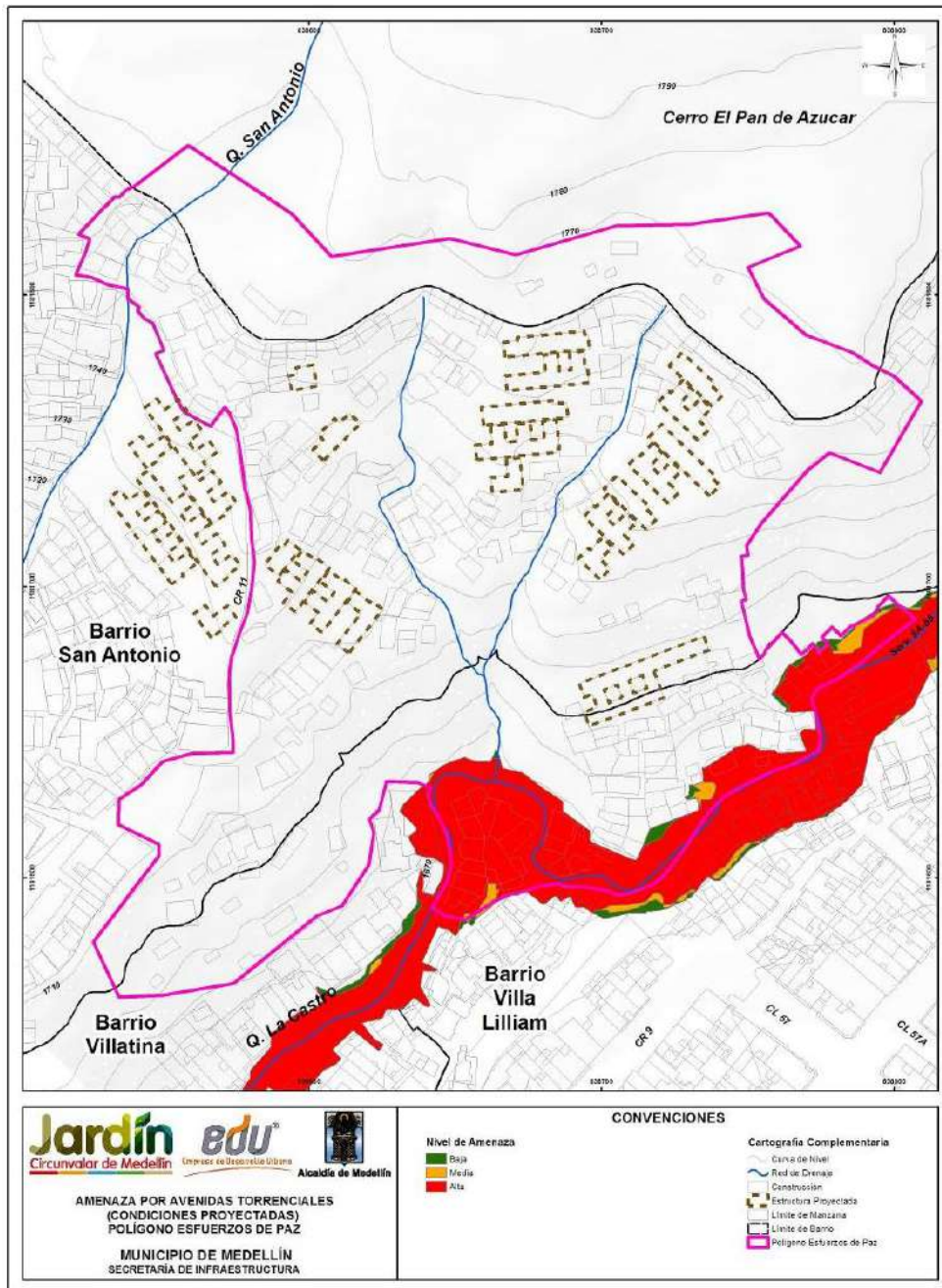
(26_EDPAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_C y
26_EDPAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



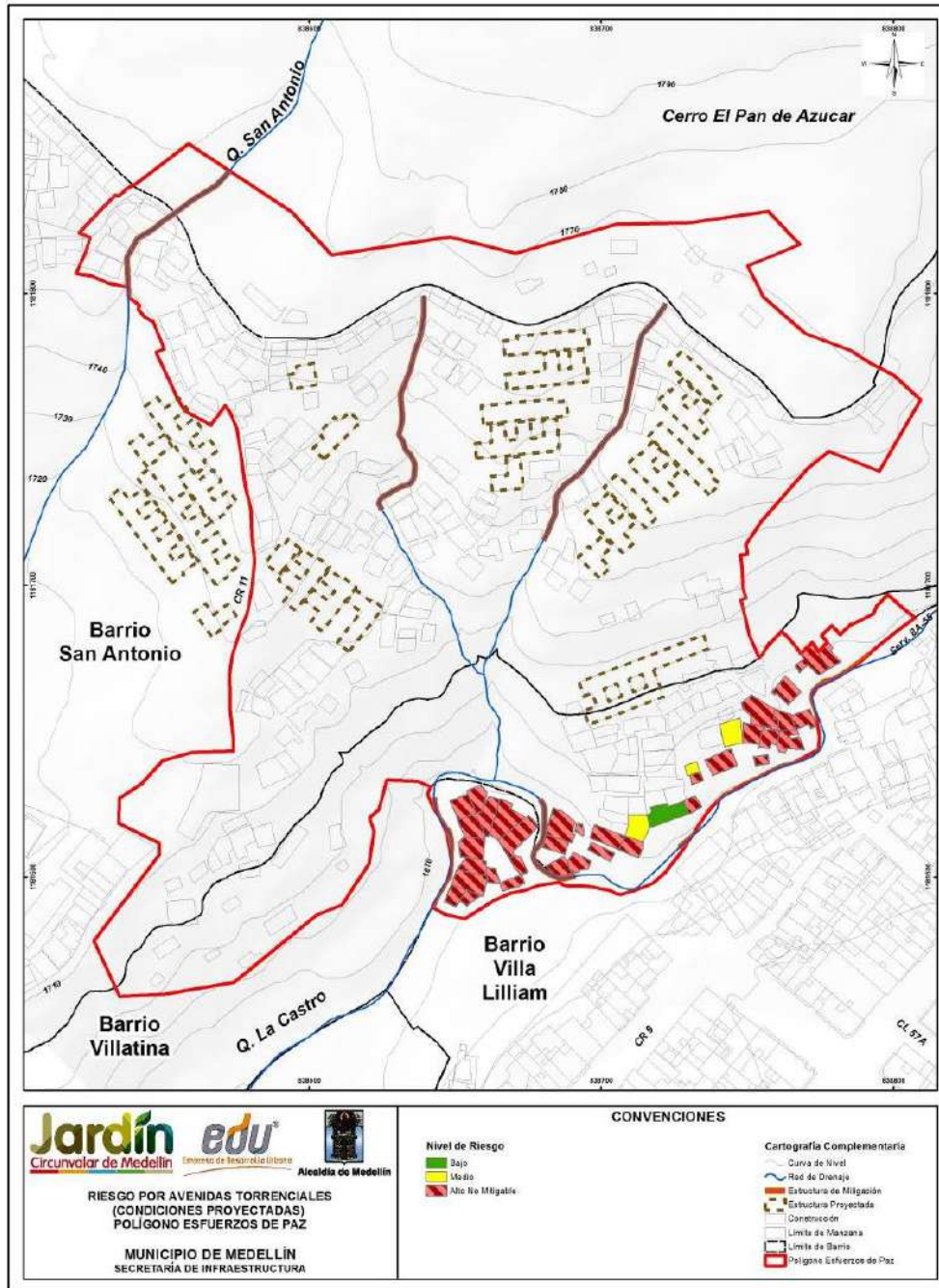
Mapa 83. Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas (48_EDPRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_C y 48_EDPRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



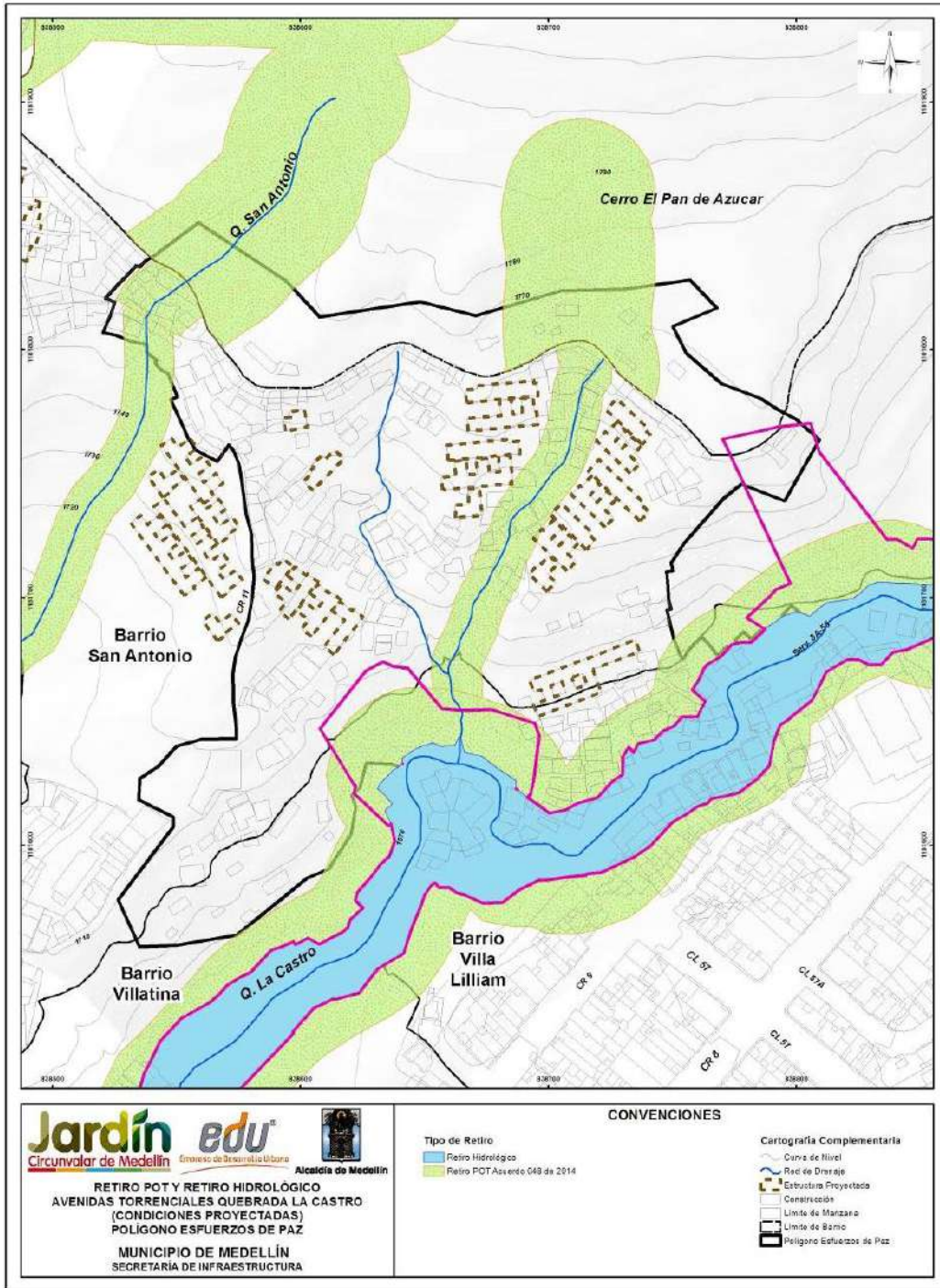
Mapa 84. Mancha de avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz (Cv=0.3).
Condiciones Proyectadas
(24_EDPManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y
24_EDPManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)





Mapa 85. Amenaza por avenidas torrenciales en el Polígono Esfuerzos de Paz ($C_v=0.3$).
Condiciones Proyectadas
(28_EDPAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y
28_EDPAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 86. Análisis de riesgo por torrencialidad para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono Esfuerzos de Paz (50_EDPRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y 50_EDPRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 87. Retiro POT y retiro hidrológico para la quebrada La Arenera (EDPretiroPOT-RetiroHidrologico_Torrencialidad_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

22. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La zona de estudio se localiza en la parte alta de la ladera centro oriental, entre los límites rurales y urbanos de la ciudad de Medellín. Los polígonos correspondientes al “Proyecto Barrios Sostenibles”, se encuentran ubicados al interior de diferentes barrios en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique). Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los ubicados dentro de los Barrios Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. El polígono localizado al interior de la Comuna 3 corresponde al ubicado dentro del Barrio La Cruz.

Específicamente el polígono objeto de este informe es el correspondiente al Barrio Esfuerzos de Paz, el cual está delimitado por el norte por la calle 56D, al occidente por la carrera 13 limitando con el barrio San Antonio, al oriente por la carrera 10 y al sur por la Quebrada La Castro.

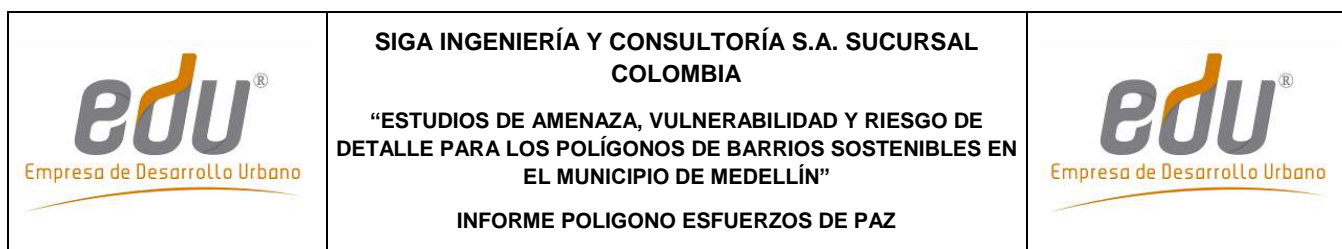
De este polígono, se ha efectuado el estudio de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del mismo. Se tuvieron en cuenta tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan el Polígono El Faro, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

La UMI del Polígono Esfuerzos de Paz tiene un área aproximada de 448 hectáreas y se localiza hacia el extremo sur oriental de la Comuna 8 y se posiciona hacia el costado sur de la UMI San Antonio. En resumen, la UMI está enmarcada principalmente por la cuenca de la Quebrada La Castro siendo este el afluente principal y eje de la UMI objeto de estudio. La UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay limita con todas las UMI del Proyecto Barrios Sostenibles de la comuna 8, desde la parte baja con la UMI San Antonio y la UMI Pinares de Oriente, en la parte media con la UMI Trece de Noviembre involucrando el flanco sur del cerro Pan de Azúcar y finalmente en su parte alta con la UMI El Faro Golondrinas.

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:

Las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), de los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA) y de las Anfibolitas de Medellín (TRaM). Todas estas unidades son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos aluviotorrenciales (Qalt), depósito de talus (Qt) y depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se



presentan llenos antrópicos (QII) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

Las unidades geomorfológicas predominantes de la UMI Esfuerzos de Paz – Villa Turbay son las unidades de lomos tales como Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF, Peldaño Bajo-PÑB, Lomeríos Amplios-LRA y Superficies moderadas en depósitos y materiales antrópicos.



Los procesos morfodinámicos encontrados son predominantemente activos y consisten de deslizamientos y caída de rocas, cárcavas, surcos, zonas de empozamiento de agua y bloques en superficie por erosión.

En cuanto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI Esfuerzos de Paz-Villa Turbay, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, principalmente en las márgenes de la Quebrada San Antonio y de la Quebrada La Castro (incluidos sus afluentes). En menor proporción se encontraron procesos en las márgenes de las Quebradas La Mica y La Mica 1. Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas.

El mapa de aptitud geológica-geotécnica fue generado a partir de las formaciones geológicas superficiales, unidades geomorfológicas y procesos morfodinámicos. Finalmente el mapa de aptitud geológica-geotécnica indica que la proporción de las zonas no aptas y no aptas por normatividad representan la mayor parte de la UMI. Al interior del Polígono Esfuerzos de Paz más de la mitad del polígono clasifica como zona no apta y el área restante clasifica como zona no apta por normatividad y apta con restricciones altas.

En lo relacionado con los **Aspectos Geotécnicos** tanto de la UMI como del polígono, refiriéndose estos principalmente a la caracterización de los materiales determinados por medio de la exploración del subsuelo:

Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron pruebas de laboratorio sobre las muestras alteradas e inalteradas recuperadas por medio de los sondeos exploratorios. El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son humedad natural, límites de consistencia, granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 y gravedad específica. Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo para condiciones consolidadas drenadas. La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Todos los ensayos recopilados sugieren, como era de esperarse, una variabilidad considerable de las propiedades geotécnicas de los materiales. Por esto, se realizó un análisis estadístico de las propiedades de los materiales que conformando el perfil geotécnico típico, representan mayor amenaza para el proyecto. Estos análisis son necesarios para la aplicación de cualquier método probabilístico que permita encontrar la probabilidad de falla de una ladera, objetivo primordial de este estudio. Por tal razón, se requiere una gran cantidad de información en términos de parámetros de resistencia, por lo que se consideró conveniente unir todos aquellos ensayos de las diferentes UMI o polígonos que caracterizarán los diferentes estratos u horizontes del proyecto.



Se identificaron primero las variables que generan incertidumbre siendo estas la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo. Fue asumida una función de distribución de probabilidad normal para cada uno de estos parámetros. Luego se determinaron los momentos estadísticos de bajo orden, es decir, la media y la desviación estándar. Adicionalmente, fue calculado la covarianza o coeficiente de variación (COV) de cada uno de los parámetros.

En lo relacionado con los **Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural** específicamente para el polígono:

Las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio de mantenimiento. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta calificación debido a que estaban mejor estructuradas e incorporaban en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además, se encontraron estructuras en madera en un estado con notable deterioro. Las fundaciones de las estructuras son superficiales no convencionales dado que existe una gran cantidad de construcciones en las que sus cimentaciones son troncos de madera, terreno natural, delgadas losas en mampostería y/o concreto o simplemente estructuras con una esbeltez no proporcional entre altura y ancho.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza total por movimientos en masa para 50 años, teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g, se identifican los Focos 1, 2, 3, 5, y 6 localizados dentro del polígono, en la parte alta y otro conjunto localizado en la parte baja del polígono que se identifican como Focos 7, 8 y 10. Estos son sitios potencialmente inestables, ubicados en una ladera urbanizada, de alta pendiente y desarrollada superficialmente en el Horizonte IC de cuerpos asociados al Batolito Antioqueño y en zonas de depósitos de flujo de lodos y/o



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

escombros, en el caso de los Focos 2 y 3. En la zona se mapearon vaguadas y procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas. Se comprobó incluso que la socavación proyectada es irrelevante desde el punto de vista de su influencia en la estabilidad de las laderas, pues prevalecen con ella o sin ellas los factores de seguridad y las probabilidades de falla que se obtienen por efecto de la pendiente de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada.

Desde el punto de vista del riesgo por movimientos en masa, se pudo determinar que es más crítico el resultado en términos de porcentaje de pérdidas económicas, el cual y da lugar a un número importante de viviendas del sector noroccidental y suroccidental del polígono con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad dentro del polígono, la responsable de los resultados obtenidos.



Debido a que hay un número importante de viviendas del polígono con riesgo alto, se procedió a la ejecución de análisis de estabilidad localizados por medio de cinco secciones transversales que consideraran la localización de los focos de inestabilidad y en el sentido de la trayectoria principal de estos. Los cinco perfiles se investigaron en condiciones actuales y teniendo en cuenta la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. Los resultados obtenidos efectivamente ratifican a los focos como puntos probables de inestabilidad, pudiéndose hacer los siguientes comentarios:

- ✓ El Perfil 1, representativo de las condiciones de estabilidad asociados a los Focos 5 y 6, efectivamente da lugar a superficies de falla con factores de seguridad límites en caso de sismo. No obstante, la probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados es ligeramente menor que aquella considerada como más crítica en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo es aceptable, pero para las estructuras que hagan parte del Proyecto Barrios Sostenibles se deben considerar cimentaciones profundas, basadas en análisis de estabilidad muy detallados. En la parte alta de la zona asociada al Foco 5 se tienen banqueros realizados por la comunidad con el objeto de construir viviendas y que tales zonas han sido afectadas por fenómenos de erosión. De esta forma, adicionalmente se recomienda capacitación a la población para evitar que se construya sobre esta zona de ladera, considerando no sólo el riesgo, sino también que de acuerdo con el POT (Acuerdo 48 de 2014) esta zona debe guardarse para protección forestal. Se recomienda, así mismo, revegetalizar o ubicar trinchos donde sea necesario para evitar que continúe desarrollándose la erosión en la zona.
- ✓ El Perfil 2, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 2, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad límites en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector ni

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

para las que se proyecten como parte del Proyecto Barrios Sostenibles. Un aspecto sobre el cual se llama la atención es el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. Considerando esto, se hicieron análisis de estabilidad que demuestran que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se deben implementar como mínimo tres pantallas de contención. Estos resultados indican entonces que, si se aceptan como críticos los niveles de riesgo de este estudio, es necesario reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto debido a la inestabilidad del terreno. La dirección de este perfil, implica una afectación de viviendas existentes actualmente en el Polígono Esfuerzos de Paz. No implica afectación sobre estructuras proyectadas para el proyecto Barrios Sostenibles, las cuales serían consideradas dentro del Perfil 3.

- ✓ El Perfil 3, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 3, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad muy cerca del límite inferior aceptable en caso de sismo. Igual que en el caso del Perfil 2, se llama la atención sobre el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados es ligeramente menor que aquella considerada como más crítica en este estudio, lo que podría implicar que este nivel de riesgo es aceptable. No obstante, por las obras proyectadas como parte del Proyecto Barrios Sostenibles, se hicieron análisis de estabilidad adicionales que muestran que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se podrían aprovechar las obras del Proyecto Barrios Sostenibles para implementar una pantalla de contención. Se reduce adecuadamente la probabilidad de falla, lo cual resulta bastante beneficioso para el Proyecto Barrios Sostenibles. En lo que tiene que con la parte más alta de los Perfiles 2 y 3 se ratifica lo anotado para el Perfil 1. Se recomienda capacitación a la población para evitar que se construya sobre esta zona de ladera, considerando no sólo el riesgo, sino también que de acuerdo con el POT (Acuerdo 48 de 2014) esta zona debe guardarse para protección forestal. Se recomienda, así mismo, revegetalizar o ubicar trinchos donde sea necesario para evitar que continúe desarrollándose la erosión en la zona.
- ✓ El Perfil 4, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 10, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad cerca del que pudiera considerarse límite inferior aceptable en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector ni para las que se proyecten como parte del Proyecto Barrios Sostenibles. Un aspecto sobre el cual se llama la atención es el hecho de que resultan más críticas las superficies profundas, a través del saprolito, que las que pudieran desarrollarse dentro del depósito de vertiente. Considerando esto, se hicieron nuevos análisis de estabilidad que indican que para llevar la probabilidad de falla a un valor más bajo, se deben implementar

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---



como mínimo cuatro pantallas de contención. Adicionalmente, teniendo en cuenta que se trata de un número muy significativo de estructuras de contención, se hicieron análisis considerando una sola pantalla en la zona correspondiente a intervenciones del Proyecto Barrios Sostenibles. Se encontró que se beneficia a las viviendas en la parte baja, esto debido a que no se tendrían allí superficies de falla críticas, que correspondan a factores de seguridad o probabilidades de falla inaceptables. No obstante, en la parte alta se tienen superficies críticas, con probabilidades de falla dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Estos resultados indican entonces que, si se aceptan como críticos los niveles de riesgo de este estudio, es necesario construir por lo menos una pantalla. Si no se construye, sería necesario reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto. Adicionalmente, para lograr disminuir más la probabilidad de falla se deberán implementar obras de mitigación del área no urbanizada, de manera que se eviten fenómenos de erosión. Se recomiendan trinchos y reforestación con especies adecuadas para fines de estabilidad. En cuanto a las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles, será necesario que su diseño tenga en cuenta estas condiciones de estabilidad, analizando superficies de falla profundas como las presentadas en este estudio.

- ✓ El Perfil 5, representativo de las condiciones de estabilidad asociados al Foco 7, también da lugar a superficies de falla con factores de seguridad bajos en caso de sismo. La probabilidad de falla que se obtiene por medio de los análisis detallados está dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Se considera entonces que este nivel de riesgo no es aceptable para las viviendas del sector. Teniendo en cuenta los resultados de los análisis de estabilidad del Perfil 5, se hicieron análisis con dos pantallas indicando que se logra reducir la probabilidad de falla a valores aceptables. No obstante, la relación beneficio costo indica que lo mejor sería reubicar las viviendas. Esto por cuanto el costo de las pantallas de contención vs. el de reubicación de las viviendas es más alto. Además, hay que tener en cuenta que no se proyecta en el área de influencia de este foco construcciones del Proyecto Barrios Sostenibles.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Inundación y Avenidas Torrenciales** específicamente para el polígono:

En este polígono de estudio se presenta un número importante de viviendas con riesgo alto por inundaciones, debido a la insuficiencia hidráulica en la sección de los drenajes y a la invasión de los cauces por parte de las viviendas. Por ello, se plantean diversas obras que buscan incrementar la capacidad del sistema de drenaje al interior del polígono.

Con las obras proyectadas en el Afluente La Castro 1 y en el Afluente La Castro 2, se elimina el riesgo alto por inundaciones existente actualmente para diversas estructuras y viviendas. Sin embargo, quedarán otras viviendas que por estar ubicadas en cercanías

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---



del cauce e invadiéndolo permanecerán con carácter de riesgo alto no mitigable por inundaciones.

Por su parte, La Quebrada La Castro, principal corriente hídrica de la zona de estudio, es generadora de amenaza y riesgo alto tanto por inundaciones como por avenidas torrenciales para el polígono en estudio. La problemática se origina por diversos factores: en primer lugar, desde el punto de vista de la amenaza, el tamaño de la cuenca que genera una importante cantidad de escorrentía superficial, las condiciones inestables de sus laderas, las características de su cauce principal, entre otros; y desde otro punto de vista, la intervención antrópica del cauce como el asentamiento de viviendas y habitantes en las franjas de inundación y dentro de los retiros hidrológicos. Estas condiciones generan el carácter de riesgo alto no mitigable a una cantidad importante de viviendas asentadas en cercanías del cauce de la Quebrada La Castro y por tanto se plantea el retiro de las construcciones contenidas o afectadas por estos fenómenos de inundación y torrencialidad, conservando la estructura del canal existente y dejando las márgenes como llanuras de inundación naturales.

Según la superposición realizada a la capa de edificaciones proyectadas por la EDU, y la capa de retiros a corrientes hídricas establecidos por el POT (2014), se observó que las edificaciones están fuera de los límites de la franja de retiro. A partir de los resultados del presente estudio de detalle puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha por avenidas torrenciales, es decir, se encuentra fuera de lo que sería la franja de retiro hidrológico que se delimitaría a partir de estos resultados. Es importante mencionar que la delimitación de la envolvente de retiro total a la corriente hídrica se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

Así las cosas, finalmente se puede concluir que se logró el alcance definido desde el principio para el Polígono Esfuerzos de Paz. Se llegó hasta definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable, por medio de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al interior de las zonas con riesgo mitigable se llegó hasta el establecimiento de las medidas de estabilización que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo, incluyéndose medidas estructurales y no estructurales. Dentro de estas últimas se incluye capacitación a la población para evitar que se construya sobre zonas de ladera, considerando no sólo el riesgo, sino también que de acuerdo con el POT (Acuerdo 48 de 2014) dichas zonas deben guardarse para protección forestal.

En el Anexo 08 se presentan las memorias de diseño de las obras de mitigación recomendadas. En los Planos P-2445-EP-OM-01 a P-2445-EP-OM-05 del Anexo 09 se presentan los diseños de estas estructuras mencionadas que dan solución a la problemática de riesgo del polígono. En el Anexo 11 se presentan las cantidades de obra, presupuesto y especificaciones. Se considera que todas ellas son igualmente importantes, de manera que se recomienda construirlas de forma simultánea.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Finalmente, el Anexo 12 contiene la información correspondiente a la metodología del trabajo en SIG con el manual de usuario y con las rutinas que se implementaron para generar los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, además de las bases de datos, los archivos de mapa, los archivos raster y complementarios. La información se localiza en una carpeta (directorio) llamada `Proy_Riesgos_EDU`, y al interior de ésta, 14 subdirectorios que contienen la información requerida por los usuarios del proyecto y que son los necesarios para el entendimiento de la información, y a su vez al interior de algunos de estos subdirectorios, se ubicaron otras carpetas que dan cuenta de diversos aspectos de la información geográfica (Figura 239).

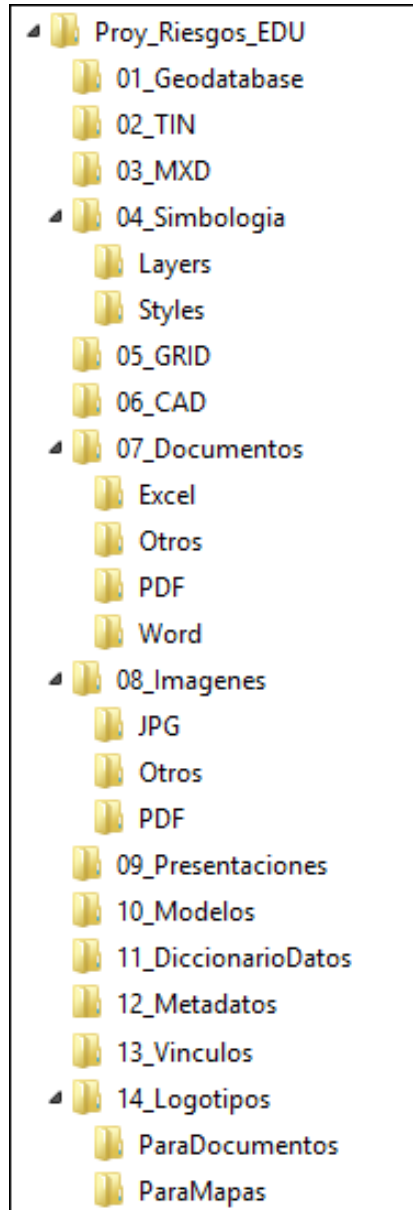




Figura 239. Estructura general de la información entregada

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

23. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMVA, (2012). Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2009). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión (Vol. Libro II). (C. y. Proyecto en conjunto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con los municipios de Medellín y Envigado, Ed.) Medellín: Área metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2007). Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Publicación Institucional No. 29 ed.). Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, CORNARE, CORANTIOQUIA, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2005). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá. Convenio de Cooperación No. 652 de 2005.

Aleotti P., Chowdhury R., (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review And New Perspectives[J]. Bull. Eng. Env., 58:21-44.

Amatruda G., Bonnard C., Castelli M., Forlati F., Giacomelli M., Morelli M., Paro L., Piana F., Pirulli M., Polino R., Prat P., Ramasco M., Scavia C., Bellardone G., Campus S., Durville J.L., Poisel R., Preh A., Roth W., Tentschert E.H., (2004). A key approach: the IMIRILAND project method. In: Bonnard C, Forlati F, Scavia C (eds) Identification and mitigation of large landslide risks in Europe—advances in risk assessment. European Commission Fifth Framework Program. Balkema, Rotterdam, pp 13–44.



Anbalagan, D., (1992). Landslide Hazard Evaluation And Zonation Mapping In Mountainous Terrain [J]. Engineering Geology, 32; 269 - 277.

Ariztizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007.

Barton, N., R. Lien, and J. Lunde (1974). “Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.” Rock Mechanics. Vol 6, No. 4, Vienna, Austria, Dec., pp. 417-440.

Brass. A., Wadge, G. and Reading, A. J., (1989). ‘Designing a Geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies’, Proc. Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions, University College, London, 3-7 April 1989, 13pp.

Carrara A., (1995). GIS Technology In Mapping Landside Hazard [A]. In: CARRARA A, GUZZETTI F (eds.). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards[C]. Dordrecht: Kluwer Acad. Pub1., 135 - 176.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Case, J.E., Duran, L.G., López, A., Moore, W.R., (1971). Tectonic investigations in western Colombia and Eastern Panamá. Geological Society of America Bulletin 82, 2685-2712.

Chow, Ven Te; Maidment, David R.; Mays & Larry W., (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill.

Chow, Ven Te.(1994). Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill.

Consortio Microzonificación, (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 745 P.

Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S. & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 209-263.

Coupé F., Arboleda E. & García C., (2007). Villatina: Algunas reflexiones 20 años después de la tragedia. Gestión y Ambiente. Volumen 10 – No. 2. Medellín, agosto de 2007.

Cruden, D.M. & Varnes, D.J., (1996). Landslide types and processes. Landslide investigation and mitigation, TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington, DC, pp. 36–75.

Daí, F. C. & Lee, C. F., (2001). Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study[J]. Can. Geotech. J., 38:911-923.

DEACIVIL (2014) “Estudios de Microzonificación Geológico – Geotecnia, de Suelos, E Hidrológicos y Análisis de Estabilidad de Laderas para la Recuperación de Zonas de Riesgo en Sectores del Cerro Pan De Azúcar Influenciadas por los Proyectos del Cinturón Verde Metropolitano en la Ciudad De Medellín”.

Deere, D. U. & Patton, F. D., (1971). Slope stability in residual soils. En Proc. Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Puerto Rico. Vol. 1. Pág. 87-170. 1971.



Duncan, J. M. (2000) Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130(10), 985–1003.

Empresas Públicas de Medellín, (2005). Revista Hidrometeorológica. Volumen 1. Número 1.

El-Ramly, H., N.R. Morgenstern, e Cruden, D.M. (2006) Local slide: a probabilistic assessment. Canadian Geotechnical Journal, 43: 956–968.

Figueras, S., Macau, A., Goula, X., Gonzalez, M.(2005) “Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra”. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24.

FLO-2D, (2010). Reference Guide and GDS Manual.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

FHWA, (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts. Third Edition.

García, R.; Rodríguez, J.J.; O'Brian, J.S., (2004). Hazard Zone Delineation for Urbanized Alluvial Fans.

González H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín Geológico Volumen 23, No. 1. Ingeominas.

Graham, J. (1984). Methods Stability Analysis. Slope Instability. Ed. D. Brunsten & D.B. Prior. 6:171-215, John Wiley & Sons Ltd, London.

Grosse, E., (1926). Mapa geológico de la parte occidental de la cordillera central entre el río Arma y Sacaoyal. Escala 1:50000. El Terciario Carbonífero de Antioquia. Berlín.

Guimaraes, M.T. (2015), Avaliação Quantitativa da Vulnerabilidade Física Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas. Departamento De Engenharia Civil E Ambiental. Teses Doctoral. Universidad de Brasilia, Brasilia

Hidalgo, C. & Hoyos, F., (1998). Recarga de acuíferos y corrientes superficiales en la ladera occidental del Valle de Aburrá, trabajo dirigido de grado, 54 p, Facultad de Minas, Medellín.

Hoyos, F., (1985). Régimen de aguas subterráneas en suelos residuales profundos derivados de rocas cristalinas en la Cordillera Central, II Simposio Colombiano de Hidrogeología, Memorias, p. 107-125, Bogotá.

Hoyos, F., (1990). Efecto de infiltraciones distantes en la inestabilidad de laderas. I Curso Internacional de Zonificación Geológica y Geotécnica de Laderas de Alta Pendiente. Facultad de Minas. Medellín, 1990. Boletín de Vías, v XVII, n 71, pp 97-128. Universidad Nacional. Manizales.

Hoyos, F., (1992). Variación regional en la composición isotópica del agua lluvia en Colombia, Memorias del XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena.



Hoyos, F., (1994). The Moses Rod: groundwater in generation of deep seated landslides. Bulletin of the Association of Engineering Geologists v XXXI, n 1. pp 133-149.

Hoyos, F., (1998). Recarga de acuíferos en la Cordillera Central de Colombia determinada mediante isótopos ambientales. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Memorias. Montevideo.

Hoyos, F., (2000). Evaluación hidrogeológica del Corredor del Túnel Aburra-Oriente, Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente, 47 p., Medellín.

Hoyos, F., (2001). Precipitaciones y deslizamientos, elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas, III Seminario Panamericano de deslizamientos, Memorias, 327-336, Cartagena.

Hoyos, F., (2007). Elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas. www.academia.edu.co Hoyos, F., 2009, Mina Conasfaltos. Bello -

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Copacabana. Hidrogeología de los depósitos aluviales del río Medellín en su zona de influencia. Informe. 65 p. Medellín.

Hoyos, F., (2012). Discriminación de flujos subterráneos hacia el Valle de Aburrá desde el Planalto de Santa Elena y los Valles de San Nicolás. Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente. 26 p. Medellín

Hoyos, F. & Arnason, B., (1994). Claves isotópicas en la hidrogeología de alta montaña, Boletín de Vías, XXI, 90, 51-64.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1995). Stable isotopes for high mountain hydrogeology in Colombia. IAEA Symposium on Water Resources Management. Viena.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá.

Hoyos P., F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá 1996

Hoyos P., F., Arnason, B. & Salazar, B., (1996). Del altiplano al valle: una conexión hidráulica inferida a partir de información isotópica. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Memorias pp 379-389. Guayaquil 1996.

Huggett R. J., (2007). Fundamentals of geomorphology, second edition, New York. pp 184-219.

Hungr, O., (1997). Some Methods of Landslide Intensity Mapping. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), Landslide risk assessment — Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19–21 February 1997. Balkema, Rotterdam, pp. 215–226.



INGEOCILCÓN LTDA (2014). “Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano”.

INGEOMINAS (2005). Mapa Geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:50.000, Memoria explicativa. Ingeominas 314p.

INTEGRAL (2010). Estudio hidrogeológico del Túnel de Oriente. Informe a la Concesión Túnel Aburrá Oriente, 49 p. Medellín.

INTEINSA (2013). Estudio geológico geotécnico para la reubicación del tanque de almacenamiento Llanaditas. Preparado para EPM. I-2300-011-ELL-03, Informe Final.

INTEINSA (2011). Estudio geológico - geotécnico para la ubicación de un tanque de impulsión en el municipio Medellín en el sector Llanaditas. Preparado para EPM. I-2189-ELL-02, Informe Final.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

Lantada, M. N, (2007) Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona – España. 2007.

Li. Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S., (2010). Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. Springer Verlag. Landslides 7:125-134.

Louie, J. N. (2001). Faster. Better: shear-wave velocity to 100 meter depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am. 91, 347-364.

López, Jose L. Courtel Francois, (2008). An Integrated Approach for Debris-Flow Risk Mitigation in the North Coastal Range of Venezuela.

Newmark N (1965). “Effects of earthquakes on dams and embankments”. Géotechnique, 15.2. pp 139-159.

NTC 1022 (2014). Norma Técnica Colombiana – Tubos de Concreto Sin Refuerzo para Alcantarillado. Sexta actualización. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) 2009-03-27.

Posada, P. Blanca Olivia (2000). Sensores remotos y SIG en la cartografía de cenizas volcánicas. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT.

POT (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín. Acuerdo 48 de 2014.

Ragozin, A.L., Tikhvinsky, I.O. (2000). Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslides. In: Research, Theory and Practice. Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, 26–30 June 2000, pp. 1257–1262.



Restrepo, J.J. y Toussaint, J.F., (1974). Obducción cretácea en el Occidente Colombiano. Anales Fac. Minas, Univ. Nacional, Medellín, N. 58, pp 73-105

Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., (1984). Unidades Litológicas de Los Alrededores de Medellín en: Memorias de la I Conferencia Sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. pp 1-26

Rodríguez, C., (1990). Hidrología isotópica en Colombia, Universidad Nacional, 45 p. Bogotá.

Rosgen, Dave (1994). Applied River Morphology. Second Edition.

San Buenaventura (2014). “Estudios y diagnóstico físico para la formulación de los proyectos barrios sostenibles en los sectores Golondrinas, Versalles, Rancho de lata al interior de los macroproyectos Llanaditas, La Cruz y El Picacho, dentro del marco del proyecto cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín”. Polígono de Intervención Altos de la Torre. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Contrato de Asociación 63 de 2014. Universidad San Buenaventura, Mayo 2014.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	--	---

SGC, (2015). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.

Skempton, W., (1964). Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, 14, 75-101.

Takahashi, Tamotsu (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group, London, UK.

Taylor, D.W., (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York.

Thouret, J.C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., Arguedas, A., and Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru.

Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *Journal of Geophysical Research*, 67, 4375^o-4387.

Universidad Nacional de Colombia (1997). Evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia (2000). Investigación de aguas subterráneas en la región Valles de San Nicolás, Medellín.

Uzielli, M. (2006). Risk and Vulnerability for Geohazards – Probabilistic Estimation of Regional Vulnerability to Landslides. ICG report 2006-2-7, Oslo.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacase, S., Kaynia, A.M. (2008). A conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. *Engineering Geology* 102. 251-256

Van Westen C J, Terlien M T J, (1996). An Approach Towards Deterministic Landslide Hazard Analysis in GIS: A Case Study From Manizales (Colombia) [J]. *Earth SuqCace Processes and Landforms*, 21: 853 - 868.

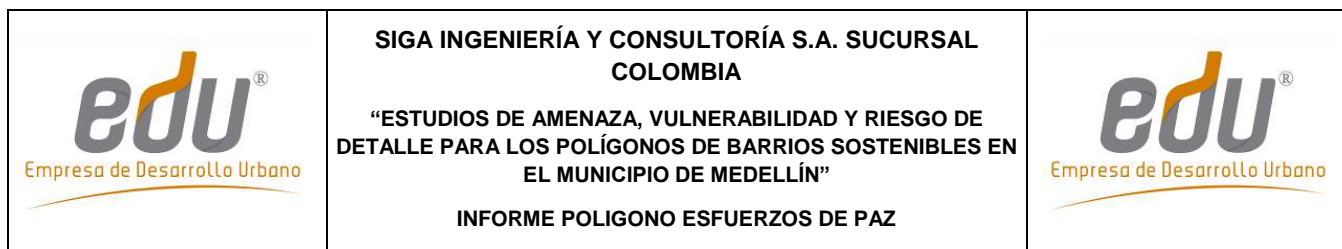
Varnes, D.J. (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazard*. Vol. 3: 63, UNESCO Press.

Vega, J. A. (2013). Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas. La Plata - Argentina. 2012. pp51.

Vélez, M.V.; Smith, R. (1997). *Hidrología de Antioquia*.



Ward, T. J., Ruh-Ming, L. and Simons, D. B. 1982. 'Mapping landslide hazards in forest watershed', *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108(GT2), 3 19-324.

Whitman, R. V. (1984). Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (2): 144-188



XIE MO-wen, ZHOU G, ESAKI T, (2003).GIS Component Based 3D Landslide Hazard Assessment System: 3DSLOPEGIS. Chinese Geographical Science, Volume 13, Number 1. Science Press, Bijing China. pp 66-72.

Yamín, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D. & Ordaz, M. G. (2013). Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia. Banco Mundial, Universidad de los Andes.

	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO ESFUERZOS DE PAZ</p>	
---	---	---

24. LIMITACIONES

El presente informe se fundamenta en las condiciones del terreno encontradas durante los trabajos de exploración en campo, la información básica recopilada, y posteriormente, en los análisis efectuados.

Lo anterior implica entonces que el estudio efectuado tiene como limitante la aplicabilidad para el número de viviendas al momento de las evaluaciones efectuadas. Si el número de estructuras en la zona de estudio se aumenta, se requerirían evaluaciones puntuales de las mismas.

Lo estimado son proyecciones aplicando la “buena práctica profesional”, haciendo un esfuerzo razonable en términos de recursos y de la aplicación del conocimiento para proponer soluciones a los problemas planteados. Sin embargo, la naturaleza es aleatoria en cuanto a la intensidad y frecuencia en la ocurrencia de los fenómenos, por lo que el ingeniero puede estimar más no predecir la ocurrencia de los eventos naturales que pueden afectar una obra de ingeniería.