
	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 SAN ANTONIO**

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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
---	--	---

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	30/06/2015	No aplica	Documento Inicial
1	15/07/2015	Todos	Revisión general y correcciones
2	21/08/2015	Todos	Documento Final
3	30/10/2015	Todos	Correcciones al documento Final
4	20/11/2015	Fue incluido un nuevo capítulo con análisis de redes de servicios públicos y fueron modificados los de vulnerabilidad y conclusiones y recomendaciones	Revisión del documento Final
5	04/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
6	18/05/2016	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de La EDU. Se modificaron especialmente Introducción y Conclusiones	Revisión del documento Final
7	21/11/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA	Revisión del documento Final
8	23/05/2018	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de La Interventoría con base en requerimientos del DAP, DAGRD y SMA	Revisión del documento Final

	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
---	--	---

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 INTERVENTORIA	Ing. Rafael Tobías Álvarez Supervisor EDU
Fecha: 23/05/2018	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 MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE		7
3.1 GENERALIDADES		7
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN		9
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS		18
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL		18
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)		18
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)		20
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)		20
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)		20
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)		20
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)		21
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)		21
4.2 GEOLOGÍA LOCAL		22
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)		27
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ		29
4.2.3 Depósito de deslizamiento (Qd)		30

4.2.4	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)	31
4.2.5	Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	34
4.2.6	Dunitas de Medellín (JKuM)	35
5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	40
5.1	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	40
5.1.1	Macrounidades geomorfológicas	40
5.1.2	Unidades Geomorfológicas.....	41
5.2	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	45
5.2.1	Unidad Peldaño Tectónico PÑT	49
5.2.2	Unidad Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF	49
5.2.3	Unidad Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF	50
5.2.4	Unidad Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM.....	50
5.2.5	Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	51
5.2.6	Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS	51
5.2.7	Unidad Lomeríos Amplios LRA	51
5.2.8	Unidad Escarpe Corto Semicircular ECSC	52
5.2.9	Unidad Escarpe Largo Semicircular ELSC.....	52
5.2.10	Unidad Escarpe	53
5.2.11	Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	54
5.2.12	Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI	55
5.2.13	Unidad Superficies con Baja Incisión SBI	55
5.2.14	Unidad Superficie Antrópica SA.....	55
5.2.15	Unidad Vertiente Moderada VM.....	56
5.2.16	Unidad Vertiente Suave VS	56
5.3	MORFODINÁMICA REGIONAL	57
5.4	MORFODINÁMICA LOCAL	62

6.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	69
6.1	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	69
6.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	69
6.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	73
7.	EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA.....	77
7.1	ASPECTOS GENERALES	77
7.2	MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS.....	78
7.3	MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA	82
7.4	MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA.....	84
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	89
8.1	ASPECTOS GENERALES	89
8.2	LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG	91
8.3	EL GRADIENTE OROGRÁFICO	95
8.4	EL GRADIENTE NULO	98
8.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	103
8.5.1	Zonas de recarga.....	103
8.5.2	Caracterización del acuífero	104
8.5.3	Flujo regional y flujo local.....	104
8.5.4	Zonas de descarga	105

8.6	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	105
8.6.1	Piezómetros P-SA-PZ-14AD	108
8.6.2	Piezómetros P-SA-PZ-15D	109
8.6.3	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	110
8.7	AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	111
9.	ASPECTOS SÍSMICOS.....	116
10.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	120
10.1	SONDEOS EXPLORATORIOS	120
10.1.1	Perforaciones.....	120
10.1.2	Líneas geofísicas	134
10.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	147
10.2.1	Ensayos de clasificación	148
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	154
10.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES.....	158
10.3.1	Aspectos generales	158
10.3.2	Lleno antrópico	159
10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros	160
10.3.4	Depósitos de deslizamiento	161
10.3.5	Depósitos coluviales	162
10.3.6	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)	164
10.3.7	Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	165
10.3.8	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte	166
11.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	167

	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
--	--	--

11.1	GENERALIDADES.....	167
11.2	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA.....	167
11.3	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN.....	170
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa.....	172
11.3.2	Estación Mazo.....	172
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga.....	173
11.4	DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS.....	174
11.4.1	Parámetros morfométricos de las cuencas.....	178
11.4.2	Usos del suelo.....	179
11.4.3	Tiempos de concentración.....	181
11.5	CAUDALES MÁXIMOS.....	182
11.5.1	Intensidades de Diseño.....	182
11.5.2	Método Racional.....	183
11.5.3	Hidrogramas sintéticos.....	184
11.5.4	Regionalización de caudales.....	188
11.5.5	Resumen de caudales.....	191
12.	ASPECTOS HIDRÁULICOS.....	194
12.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA.....	194
12.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES.....	194
12.2.1	Quebrada La Gallinaza.....	196
12.2.2	Quebrada La Gallinaza 1.....	201
12.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES.....	206
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D.....	206

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

12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	207
12.3.3	Información topográfica	207
12.3.4	Tamaño de la malla	207
12.3.5	Condiciones de Frontera.....	207
12.3.6	Condiciones Iniciales	208
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica.....	208
12.3.8	Coeficiente de rugosidad	208
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	208
12.3.10	Resultados en la Quebrada La Gallinaza (Condiciones Actuales).....	209
12.3.11	Resultados en la Quebrada La Gallinaza 1 (Condiciones Actuales).....	211
13.	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	217
13.1	METODOLOGÍA.....	217
13.1.1	Objetivo y aspectos generales	217
13.1.2	Escenarios de análisis	217
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad	219
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla	222
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)	224
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza	228
13.2	RESULTADOS	228
14.	AMENAZA POR INUNDACIONES.....	239
14.1	ASPECTOS GENERALES	239
14.2	METODOLOGÍA.....	239
14.3	RESULTADOS	242
15.	AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	245

	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
--	--	--

15.1	ASPECTOS GENERALES	245
15.2	AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA	245
15.3	AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN Y TRANSPORTE DEL MATERIAL DEL LECHO.....	246
15.4	RESULTADOS	248
16.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	249
16.1	ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL.....	249
16.2	VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....	251
16.2.1	Metodología de análisis	251
16.2.2	Calibración de la metodología.....	257
16.2.3	Levantamientos de campo y análisis de la información.....	264
16.2.4	Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas.....	278
16.3	VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES	288
16.4	SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS.....	301
17.	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	305
17.1	ASPECTOS GENERALES	305
17.2	CÁLCULO DEL RIESGO	305
17.3	RESULTADOS	306
18.	RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	316

	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
--	--	--

18.1	METODOLOGÍA.....	316
18.2	RESULTADOS	316
19.	ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....	320
19.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES.....	320
19.2	SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA	320
19.3	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES	324
19.3.1	Tubería en concreto no reforzado (Clase 1).....	324
19.3.2	Tubería en Policloruro de Vinilo (PVC)	324
19.3.3	Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes	324
19.4	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES	324
20.	PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO.....	326
20.1	OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	326
20.2	OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES	330
20.2.1	Análisis de resultados en condiciones actuales	330
20.2.2	Análisis de resultados en condiciones proyectadas	330
21.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	336
22.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	344
23.	LIMITACIONES	351

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de la UMI del polígono al interior del Barrio San Antonio (Sin Escala)	10
Figura 2.	Panorama general de la zona alta de la UMI San Antonio desde el Parque Las Tinajas	12
Figura 3.	Condiciones de pendientes de la zona alta de la UMI San Antonio	12
Figura 4.	Proceso de inestabilidad de Villatina (1987) ocurrido en la parte alta de la UMI San Antonio	13
Figura 5.	Panorama de contraste entre la zona alta y la zona baja	15
Figura 6.	Zona del Campo Santo Villatina (1987)	15
Figura 7.	Panorama general del urbanismo zona baja de la UMI San Antonio	15
Figura 8.	Condiciones de densidad de estructuras a lo largo de los drenajes San Antonio (izquierda) y La Gallinaza (derecha).....	16
Figura 9.	Condiciones actuales de los drenajes La Gallinaza (izquierda) y San Antonio (derecha).....	17
Figura 10.	Zona del lleno de Perforación P-SA-PR-14 en cartografía del año 1998	27
Figura 11.	Llenos antrópicos en las Estaciones SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA	28
Figura 12.	Capa de cenizas volcánica removilizadas	30
Figura 13.	Depósito de deslizamiento en la parte central de la UMI	31
Figura 14.	Esquema del depósito de la parte superior e inferior generado por el deslizamiento de Villatina (Sin escala)	33
Figura 15.	Depósito de flujo de lodos y/o escombros en Perforación P-SA-PR-15 (izquierda) y Estación de Campo KGL05-U-SA (derecha).....	33
Figura 16.	Horizonte IC de meteorización del granito	35
Figura 17.	Horizonte IC de meteorización del cuerpo granítico	35
Figura 18.	Evidencias de dunita cizallada y brechada en la zona de estudio.....	36
Figura 19.	Horizonte IB de meteorización localizado en la parte alta de la UMI	37
Figura 20.	Horizonte IC de meteorización que exhibe estructura esquistosa.....	38
Figura 21.	Horizonte IIA de meteorización con estructuras de esquistosidad en la Dunita	38

Figura 22.	Horizonte IIA de meteorización de la Dunita	39
Figura 23.	Bloques de dunita esquistosa en horizonte IIA de meteorización	39
Figura 24.	Perfil A-A' de unidades geomorfológicas	48
Figura 25.	Perfil B-B' de unidades geomorfológicas	48
Figura 26.	Perfil C-C' de unidades geomorfológicas.....	48
Figura 27.	Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF y Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes-LEVF	49
Figura 28.	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes-LAVF, al fondo campo Santo Villatina (Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados-SSDMI) y en la parte superior la unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC	50
Figura 29.	Lomo Amplio con Vertientes Moderadas-LAVM.	51
Figura 30.	Unidad de Lomeríos Amplios-LRA	52
Figura 31.	Unidad de Escarpe Corto Semicircular-ECSC; Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados-SSDPI y Lomo Estrecho con Vertientes Suaves-LEVS.....	53
Figura 32.	Unidad de Escarpes Largos Semicirculares-ELSC.....	53
Figura 33.	Unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC sobre parte de la cicatriz del deslizamiento de Villatina y la unidad de Vertiente Moderada-VM.....	54
Figura 34.	Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados-SSDMI sobre Campo Santo Villatina	55
Figura 35.	Unidad de Superficie Antrópica SA en la Quebrada San Antonio	56
Figura 36.	Unidad de Superficie Antrópica-SA, Superficies con Baja Incisión-SBI, Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF, Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM.....	57
Figura 37.	Unidad de Vertiente Suave VS	57
Figura 38.	Distribución de los fenómenos.....	59
Figura 39.	Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos.....	60
Figura 40.	Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987	62
Figura 41.	Cicatriz del deslizamiento de Villatina identificado en campo. (A) Vista superior y (B) vista inferior.....	66
Figura 42.	Escarpes de roca en la media de la UMI con alto grado de fracturamiento .	67

Figura 43.	Erosión superficial (A) Surcos y (B) erosión en montículos	67
Figura 44.	Desgarre cerca de la vía principal de San Antonio	68
Figura 45.	Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	72
Figura 46.	Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	72
Figura 47.	Tramo de talud analizado localizado en la parte alta del polígono San Antonio	74
Figura 48.	Análisis cinemático del tramo analizado. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo.....	75
Figura 49.	Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica.....	77
Figura 50.	Localización esquemática de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)	90
Figura 51.	Recta Meteórica para Colombia	91
Figura 52.	Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio	93
Figura 53.	Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental	95
Figura 54.	Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	97
Figura 55.	Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	97
Figura 56.	Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	98
Figura 57.	Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	98
Figura 58.	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).....	101
Figura 59.	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.....	104
Figura 60.	Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil	107

Figura 61.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-SA-PZ-14AD.....	109
Figura 62.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-SA-PZ-15D.....	110
Figura 63.	Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono San Antonio.....	111
Figura 64.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica (Skempton, 1964)	114
Figura 65.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica (Skempton, 1964)	115
Figura 66.	Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)	116
Figura 67.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio	124
Figura 68.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	125
Figura 69.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	126
Figura 70.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	127
Figura 71.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	128
Figura 72.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	129
Figura 73.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	130
Figura 74.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	131
Figura 75.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	132
Figura 76.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)	133
Figura 77.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-01	137
Figura 78.	Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-01	137
Figura 79.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-01	137

Figura 80.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-01	138
Figura 81.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-02	139
Figura 82.	Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-02	139
Figura 83.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-02	139
Figura 84.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-02	140
Figura 85.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-03	141
Figura 86.	Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-03	141
Figura 87.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-03	141
Figura 88.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-03	142
Figura 89.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-04	143
Figura 90.	Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-04	143
Figura 91.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-04	143
Figura 92.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-04	144
Figura 93.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-SA-LG-13.....	145
Figura 94.	Dispersión y ajuste para la Línea U-SA-LG-13	145
Figura 95.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-SA-LG-13	145
Figura 96.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-SA-LG-13	146
Figura 97.	Curva de resistividad vs profundidad (AB/2), P-SA-SEV-02.	147
Figura 98.	Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande.....	151
Figura 99.	Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad	152
Figura 100.	Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.	152

Figura 101.	Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad	153
Figura 102.	Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-16-M1a 1.45 m de profundidad	156
Figura 103.	Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-13-M8 a 8.80 m de profundidad	156
Figura 104.	Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-18-M2 a 3.30 m de profundidad	156
Figura 105.	Resultados corte directo Muestra U-SA-02-M1 a 0.80 m de profundidad ..	157
Figura 106.	Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-15-M6 a 6.00 m de profundidad	157
Figura 107.	Resultados corte directo Muestra U-SA-PP-05-M6 a 2.70 m de profundidad	157
Figura 108.	Resultados corte directo Muestra U-SA-01-M1 a 1.00 m de profundidad ..	158
Figura 109.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico	159
Figura 110.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente	161
Figura 111.	Análisis de estabilidad de talud estable	162
Figura 112.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos	163
Figura 113.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas	164
Figura 114.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados del Batolito Antioqueño	165
Figura 115.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa.....	172
Figura 116.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo	173
Figura 117.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga	174
Figura 118.	Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)	174
Figura 119.	Red de canales(Trasvase Quebrada La Gallinaza) (Fuente Google Earth)	178

Figura 120.	Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILÓN (2014).....	193
Figura 121.	Encole, descoley canal escalonado (Estructura 1) en la salida de la cobertura de la calle 56EE (Estructura 2)	196
Figura 122.	Subtramo 1 Márgenes y canal escalonado.....	197
Figura 123.	Subtramo 2 Presencia de vegetación en las márgenes del cauce.....	198
Figura 124.	Paso peatonal o Puente No 1. Quebrada La Gallinaza	199
Figura 125.	Paso peatonal o Puente No 2. Quebrada La Gallinaza	199
Figura 126.	Pasos Peatonales o Puentes No 3 (arriba), 4,5 y 6 (abajo) Quebrada La Gallinaza	200
Figura 127.	Canal escalonado de la Quebrada La Gallinaza 1 (Estructura 4)	202
Figura 128.	Configuración a la entrada y la salida Puente No 1	203
Figura 129.	Configuración a la entrada y la salida del cruce Puente No 2.....	203
Figura 130.	Estructuras de entrada y salida del Manhole (Estructura 5).....	204
Figura 131.	Entrega de aguas residuales al canal trapezoidal (Estructura 6)	205
Figura 132.	Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar.....	220
Figura 133.	Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa	227
Figura 134.	Esquema de localización en planta de la sección analizada.....	237
Figura 135.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera	238
Figura 136.	Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003).....	240
Figura 137.	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)	241
Figura 138.	Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Gallinaza.	248
Figura 139.	Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa	252

Figura 140.	Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables.....	256
Figura 141.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa	257
Figura 142.	Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo...	258
Figura 143.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías	259
Figura 144.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973.....	260
Figura 145.	Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	263
Figura 146.	Esquema de la zonificación del Polígono San Antonio (Sin escala)	266
Figura 147.	Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras....	282
Figura 148.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones	290
Figura 149.	Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	316
Figura 150.	Comparación esquemática entre los mapas de riesgo del POT (2014) y el realizado por este estudio (Sin escala).....	327
Figura 151.	Estructura general de la información entregada	343

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local	45
Tabla 2.	Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles	59
Tabla 3.	Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio	61
Tabla 4.	Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor	62
Tabla 5.	Colores definidos para los procesos según año	65
Tabla 6.	Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006.....	69
Tabla 7.	Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas	70
Tabla 8.	Familia de discontinuidad considerando todos los datos	73
Tabla 9.	Resumen resultados análisis cinemático.....	76
Tabla 10.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas.....	78
Tabla 11.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas	79
Tabla 12.	Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica.....	82
Tabla 13.	Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio.....	93
Tabla 14.	Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá.....	94
Tabla 15.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	96
Tabla 16.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás.....	99
Tabla 17.	Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10	118
Tabla 18.	Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños....	119
Tabla 19.	Exploración geotécnica utilizada en la UMI San Antonio	122
Tabla 20.	Tabla de Valores de Resistividad eléctrica (Arias, 2011).....	135

Tabla 21.	Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI San Antonio.....	135
Tabla 22.	Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio	148
Tabla 23.	VARIABLES DE ESTADO DE ALGUNAS DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.....	150
Tabla 24.	Resultados ensayos de corte directo modalidad CD	155
Tabla 25.	Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales	166
Tabla 26.	Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual	170
Tabla 27.	Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca.....	178
Tabla 28.	Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en San Antonio..	179
Tabla 29.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en San Antonio	181
Tabla 30.	Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración.....	181
Tabla 31.	Tiempos de concentración calculados para las cuencas	182
Tabla 32.	Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)	183
Tabla 33.	Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca	183
Tabla 34.	Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca	184
Tabla 35.	Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización	189
Tabla 36.	Resultados de regionalización de caudales máximos.....	191
Tabla 37.	Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años	191
Tabla 38.	Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años	191
Tabla 39.	Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años	192
Tabla 40.	Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años	192
Tabla 41.	Coordenadas puentes y obras y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Gallinaza	200
Tabla 42.	Resumen de estructuras hidráulicas en la Quebrada La Gallinaza.....	201
Tabla 43.	Coordenadas puentes y obras y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Gallinaza 1.....	205
Tabla 44.	Resumen de estructuras hidráulicas en la Quebrada La Gallinaza 1	205

Tabla 45.	Qda. La Gallinaza: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 1 Canal Escalonado (Est.1)	210
Tabla 46.	Qda. La Gallinaza: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 2 Canal natural	210
Tabla 47.	Evaluación hidráulica de los pasos peatonales o puentes ubicados en la Qda. La Gallinaza	211
Tabla 48.	Qda. La Gallinaza 1: velocidades y profundidades de flujo en el subtramo 1 (Canal escalonado)	212
Tabla 49.	Qda. La Gallinaza 1: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 2 Manhole (Estructura 5)	214
Tabla 50.	Evaluación hidráulica de los pasos peatonales o puentes ubicados en la Qda. La Gallinaza 1	215
Tabla 51.	Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad	228
Tabla 52.	Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años	228
Tabla 53.	Asignación de la calificación de la Probabilidad de Inundaciones.....	240
Tabla 54.	Asignación de la calificación de la Intensidad de Inundaciones	241
Tabla 55.	Propiedades de los materiales de los caucescon influencia en el Polígono San Antonio.....	247
Tabla 56.	Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996).....	253
Tabla 57.	Factor por tipo de estructura.....	254
Tabla 58.	Factor por altura de la estructura.....	254
Tabla 59.	Factor de estado de la estructura	255
Tabla 60.	Tipo de ocupación – Movimiento en Masa.....	269
Tabla 61.	Tipo de estructura – Movimiento en Masa	269
Tabla 62.	Estado de la estructura – Movimiento en Masa	269
Tabla 63.	Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa	270
Tabla 64.	Tipo de cubierta – Movimiento en Masa	270
Tabla 65.	Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa	278
Tabla 66.	Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa	283

Tabla 67.	Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del San Antonio.....	285
Tabla 68.	Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales.....	288
Tabla 69.	Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV	289
Tabla 70.	Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	291
Tabla 71.	Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	291
Tabla 72.	Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	292
Tabla 73.	Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales.....	292
Tabla 74.	Registro fotográfico en el San Antonio	301
Tabla 75.	Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación).....	302
Tabla 76.	Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación).....	303
Tabla 77.	Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación).....	304
Tabla 78.	Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total.....	310
Tabla 79.	Categorización del riesgo total	310
Tabla 80.	Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono San Antonio	312

LISTA DE MAPAS

Mapa 1.	Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles	6
Mapa 2.	UMI asociada al Polígono San Antonio	8
Mapa 3.	Usos generales del suelo rural San Antonio (POT, 2014).....	11
Mapa 4.	Usos generales del suelo urbano San Antonio (POT, 2014).....	14
Mapa 5.	Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006).....	19
Mapa 6.	Geología local de UMI San Antonio.....	24
Mapa 7.	Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'	25
Mapa 8.	Perfiles estratigráficos C-C' y D-D'	26
Mapa 9.	Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	43
Mapa 10.	Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	44
Mapa 11.	Análisis de pendientes en la UMI San Antonio	46
Mapa 12.	Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio.....	47
Mapa 13.	Procesos morfodinámicos UMI San Antonio.....	64
Mapa 14.	Estructuras encontradas en la UMI San Antonio	71
Mapa 15.	Criticidad geomorfológica UMI San Antonio	80
Mapa 16.	Criticidad de zonas homogéneas UMI San Antonio.....	81
Mapa 17.	Criticidad morfodinámica UMI San Antonio	83
Mapa 18.	Aptitud Geológica UMI San Antonio	86
Mapa 19.	Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014) ..	87
Mapa 20.	Clasificación del suelo (POT, 2014).....	88
Mapa 21.	Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	106
Mapa 22.	Localización de la exploración directa e indirecta	121
Mapa 23.	Información cartográfica empleada en el estudio.....	169
Mapa 24.	Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	171
Mapa 25.	Red hídrica de la UMI San Antonio.....	176
Mapa 26.	Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI San Antonio	177



Mapa 27.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI San Antonio	180
Mapa 28.	Cuencas consideradas en el método de regionalización	190
Mapa 29.	Localización obras hidráulicas y puentes. Condiciones Actuales. Polígono San Antonio.....	195
Mapa 30.	Manchas de inundación para las Quebradas La Gallinaza o Cañería y Gallinaza 1 en condiciones actuales.....	213
Mapa 31.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales.Polígono San Antonio.....	216
Mapa 32.	Análisis del factor de seguridad de la UMI San Antonio en condiciones estáticas.....	231
Mapa 33.	Análisis del factor de seguridad de la UMI San Antonio en condiciones pseudoestáticas con sismo de 0.25g.....	232
Mapa 34.	Análisis de probabilidad de falla de la UMI San Antonio en condiciones actuales y naturales	233
Mapa 35.	Análisis probabilidad de falla de la UMI San Antonio en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años	234
Mapa 36.	Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI San Antonio en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g.....	235
Mapa 37.	Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g	236
Mapa 38.	Amenaza por Inundaciones Quebradas La Gallinaza y Gallinaza 1 del Polígono San Antonio en condiciones actuales.	243
Mapa 39.	Amenaza por Inundaciones, Vías de Acceso y Equipamientos del Polígono San Antonio en condiciones actuales.....	244
Mapa 40.	Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono San Antonio	267
Mapa 41.	Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono San Antonio.....	271
Mapa 42.	Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono San Antonio	272
Mapa 43.	Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono San Antonio	273

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
--	--	--

Mapa 44.	Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono San Antonio.....	274
Mapa 45.	Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono San Antonio	275
Mapa 46.	Parámetro de resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa	277
Mapa 47.	Factor de intensidad de deslizamientos que afectan el Polígono San Antonio	279
Mapa 48.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono San Antonio.....	280
Mapa 49.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono San Antonio	281
Mapa 50.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono San Antonio.....	284
Mapa 51.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono San Antonio por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	286
Mapa 52.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono San Antonio por Movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	287
Mapa 53.	Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono San Antonio.....	293
Mapa 54.	Localización espacial del estado de la estructura por inundación en el Polígono San Antonio.....	294
Mapa 55.	Localización espacial de la altura de las estructura por inundación en el Polígono San Antonio.....	295
Mapa 56.	Localización espacial de la densidad de población en el Polígono San Antonio.....	296
Mapa 57.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio.....	298
Mapa 58.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	299
Mapa 59.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio para las Vías de Acceso y Equipamientos.....	300
Mapa 60.	Análisis de riesgo estructural por movimientos en masa	307

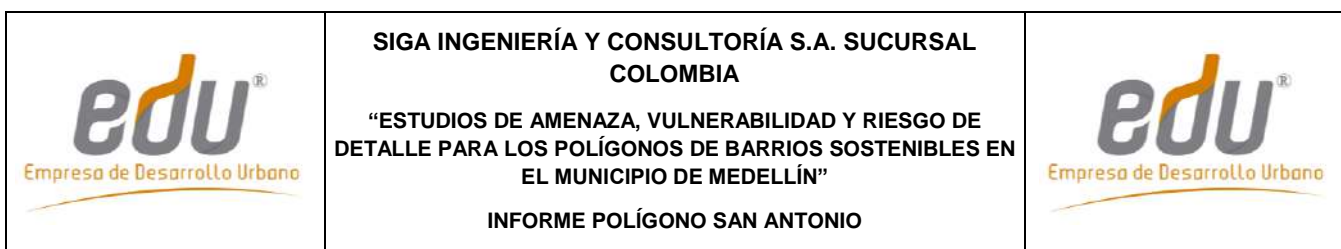
	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO	
--	--	--

Mapa 61.	Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono San Antonio.....	308
Mapa 62.	Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa en el Polígono San Antonio.....	309
Mapa 63.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones actuales.....	311
Mapa 64.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono San Antonio	318
Mapa 65.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono San Antonio para las vías de acceso y equipamientos	319
Mapa 66.	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	322
Mapa 67.	Redes de servicios públicos analizadas desde el mapa de amenaza por inundaciones para condiciones actuales. Polígono San Antonio.	323
Mapa 68.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones proyectadas.....	329
Mapa 69.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno. Polígono San Antonio. Condiciones Proyectadas.....	332
Mapa 70.	Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1. Polígono San Antonio	333
Mapa 71.	Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas	334
Mapa 72.	Retiro POT y retiro hidrológico para las quebradas La Gallizana y La Gallinaza 1	335

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

LISTA DE MAPAS ATLAS

- 01_SATLocalizacionGeneral_Medellin_T
- 02_SATLocalizacionUMI_Medellin_T
- 03_SATGeomorfologiaRegional_Medellin_T
- 04_SATGeologiaLocalUMI_Medellin_T
- 05_SATPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 06_SATPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 07_SATMacroUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 08_SATUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 09_SATPendientes_Medellin_T
- 10_SATGeomorfologiaLocal_Medellin_T
- 11_SATProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 12_SATGeologiaEstructural_Medellin_T
- 13_SATExploracion_Medellin_T
- 14_SATClasificaciondelSuelo_Medellin_T
- 15_SATCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T
- 16_SATUsosdelSueloUrbano_Medellin_T
- 17_SATUsosdelSueloRural_Medellin_T
- 18_SATAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T
- 19_SATAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T
- 20_SATRedHidricaUMI_Medellin_T
- 21_SATManchaInundaciones_Medellin_T



22_SATManchalInundacionesCondProyecto_Medellin_T

23_SATAmenazasInundaciones_Medellin_T

24_SATAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T

25_SATTipodeEstructura_Medellin_T

26_SATDesplantedeFundaciones_Medellin_T

27_SATEstadodelaEstructura_Medellin_T

28_SATTipodeCubierta_Medellin_T

29_SATAAlturadelaConstruccion_Medellin_T

30_SATMapadeResistencia_Medellin_T

31_SATTipodeEstructura_Medellin_T

32_SATEstadodelaEstructura_Medellin_T

33_SATAAlturadelaConstruccion_Medellin_T

34_SATDensidaddePoblacion_Medellin_T

35_SATViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T

36_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T

37_SATVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T

38_SATVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T

39_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T



40_SATRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T

41_SATRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T

42_SATRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T

43_SATRiesgoInundaciones_Medellin_T

44_SATRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T

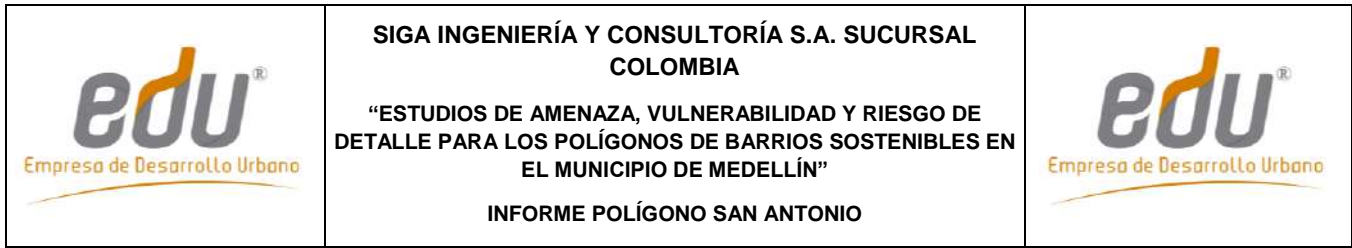
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

45_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T

46_SATVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T

47_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T

48_SATRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C



LISTA DE PLANOS

P-2445-SA-OM-01	Paso peatonal-Qda La Gallinaza
P-2445-SA-OM-02	Obras Hidráulicas-Qda La Gallinaza
P-2445-SA-OM-03	Detalles estructurales-Confluencia Gallinaza
P-2445-SA-OM-03A	Detalles estructurales-Confluencia Gallinaza
P-2445-SA-OM-04	Obras Hidráulicas-Qda La Gallinaza 1

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 style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p style="text-align: center;">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p style="text-align: center;">INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</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 San Antonio. 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 San Antonio, 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 8 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 8 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 nuevas 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 San Antonio:

- ✓ 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 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 23 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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.
- ✓ Los Capítulos 20 y 21 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 22 y 23 contienen las referencias bibliográficas y las limitaciones del estudio.

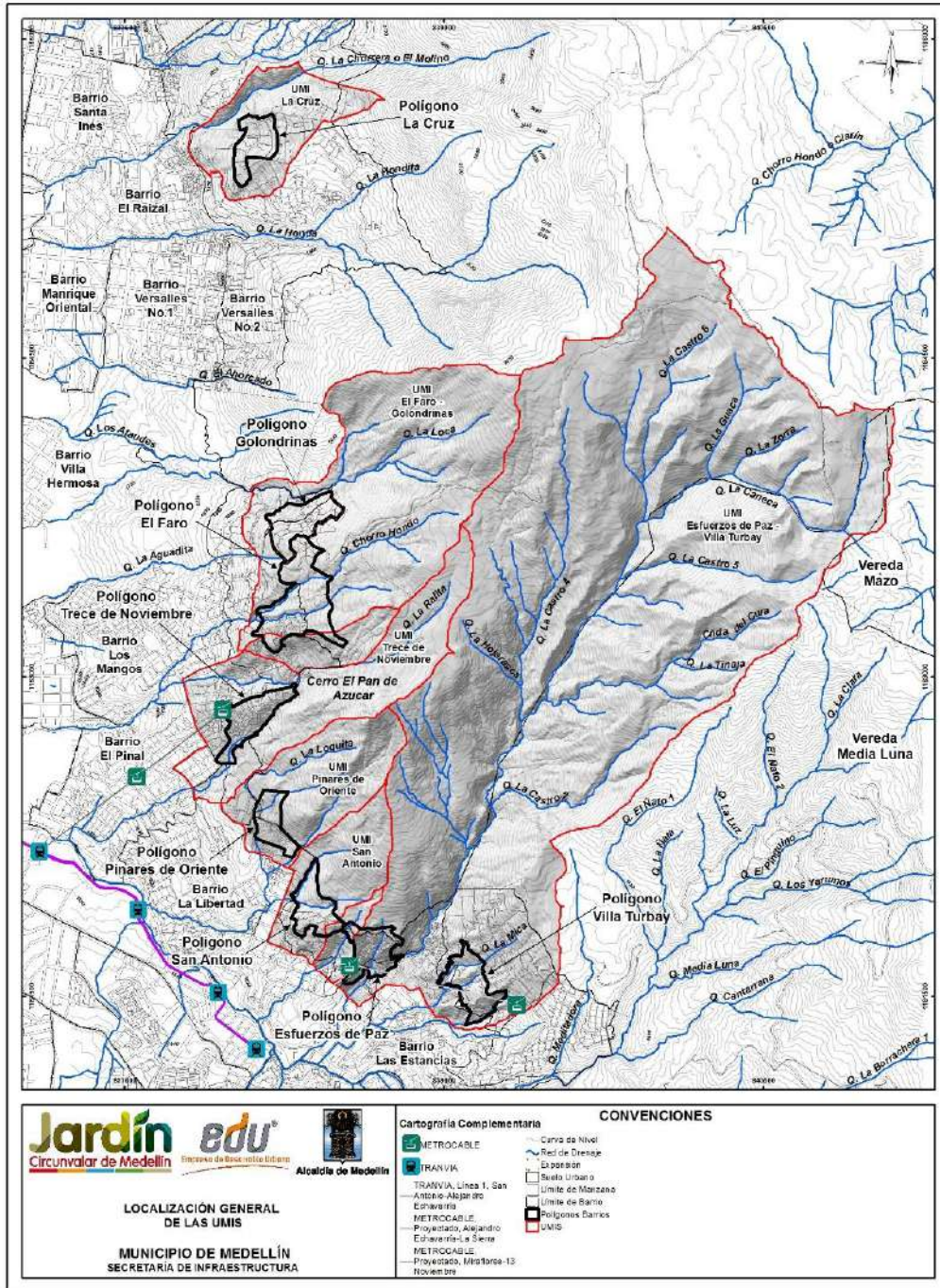
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

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 de todas las UMI definidas para cada uno de los polígonos de estudio.

El Polígono San Antonio, objeto principal de este estudio, se encuentra localizado en la zona centro sur, bordeado al Norte con el Polígono Pinares de Oriente y al Sur con el Polígono Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. Este polígono, el cual tiene un área aproximada de 4.54 hectáreas, limita por el norte con el Eco parque Campo Santo Villatina, el Barrio Pinares de Oriente y la Quebrada La Gallinaza 1, por el sur con el Barrio Esfuerzos de Paz y la Quebrada San Antonio, por el oriente con el Cerro Pan de Azúcar y al Occidente con el Barrio Villatina.



Mapa 1. Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles (01_SATLocalizacionGeneral_Medellin_C y 01_SATLocalizacionGeneral_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE

3.1 GENERALIDADES

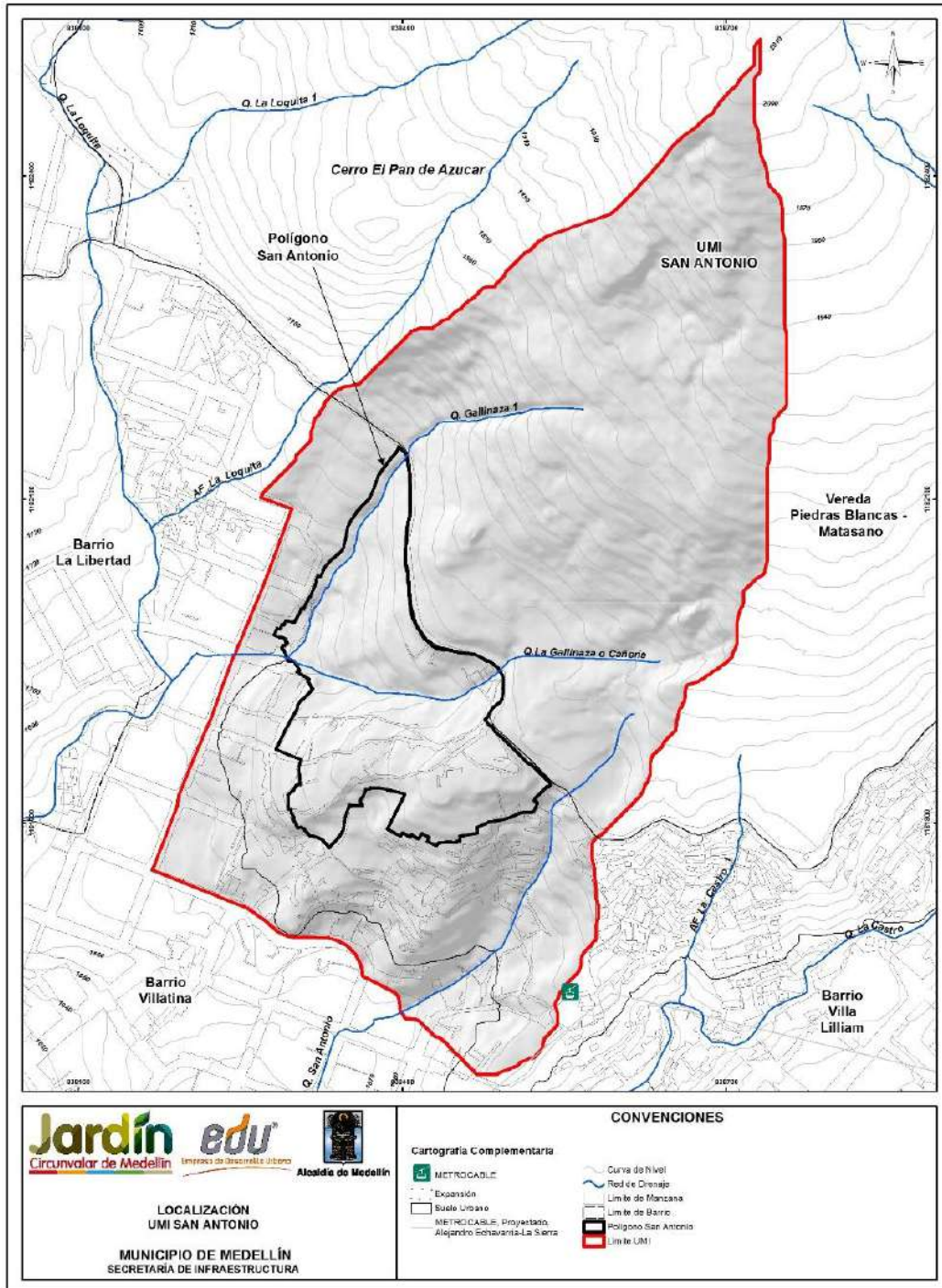
Como punto de partida para la ejecución del estudio que se presenta en este informe, se requiere la delimitación de la conocida como Unidad Morfodinámica Independiente (UMI), entendiéndola a ésta como la unidad del territorio que enmarca el predio de interés o que presenta un comportamiento independiente 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 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es tratado de forma detallada en el conocido como Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012). Según dicho 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 cada polígono de estudio dentro del Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente la del Polígono Trece de Noviembre localizado en la Comuna 8. Siguiendo los lineamientos del que se denominará en este informe como Código de Laderas del Valle de Aburrá (AMVA, 2012), se consideraron aspectos de tipo geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico. 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 suma de todas las UMI de la Comuna 8 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 presenta la UMI asociada al Polígono San Antonio, el cual tiene un área aproximada de 29 hectáreas.



Mapa 2. UMI asociada al Polígono San Antonio
(02_SATLocalizacionUMI_Medellin_C y 02_SATLocalizacionUMI_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

En el numeral que sigue de este capítulo, se hace referencia a la UMI correspondiente al polígono ubicado dentro del Barrio San Antonio, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI San Antonio o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono San Antonio, correspondiente al polígono objeto de estudio localizado en el barrio con el mismo nombre.

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

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

La UMI se localiza en el centro de la Comuna 8 y se posiciona entre las UMI Pinares de Oriente y Esfuerzos de Paz - Villa Turbay. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI abarca las divisorias de los afluentes de la Quebrada Gallinaza 1 y San Antonio. No obstante, la elección de los límites de la UMI está más orientada en la actividad y afectación por procesos de inestabilidad, ya que por su direccionamiento pueden afectar el Polígono San Antonio.

Así las cosas, hacia el costado norte este polígono incluye las zonas de afectación del Movimiento Villatina (1987) lo que actualmente se identifica como el Campo Santo y desciende en medio de este lote y la Carrera 16 hasta la Calle 56A donde gira para definir el límite inferior de la UMI, estas dos vías del sector no presentan ninguna afectación morfodinámica. El límite inferior coincide con la zona de cambio de pendiente del sector, en el cual, por fuera del límite, se conservan pendientes menores que al interior de la UMI.

La Figura 1 muestra la UMI San Antonio, destacándose la división de la misma en dos zonas diferentes, 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). Se trata de la zona alta y baja, de las cuales se hablará con mayor detalle a continuación.

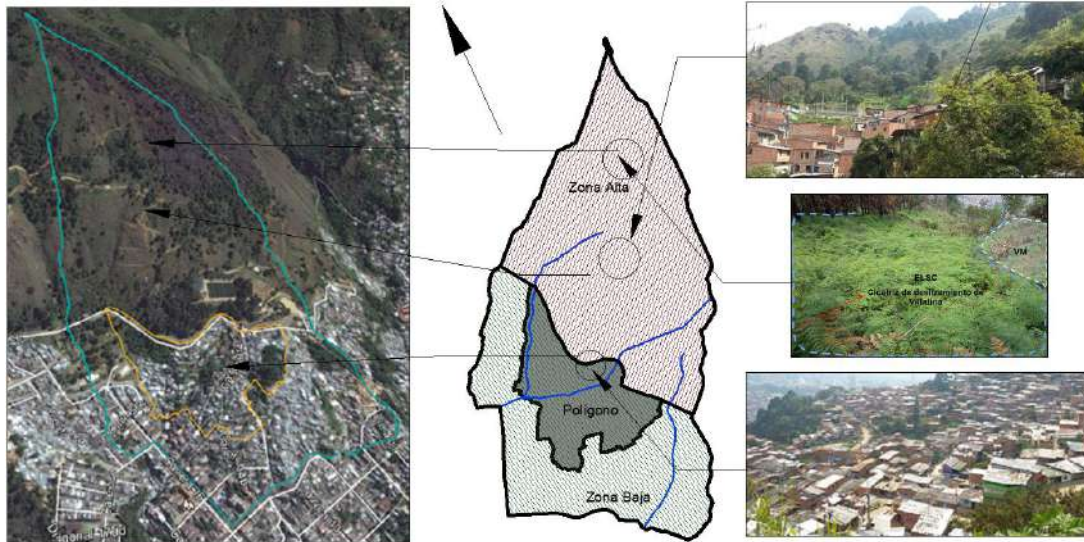
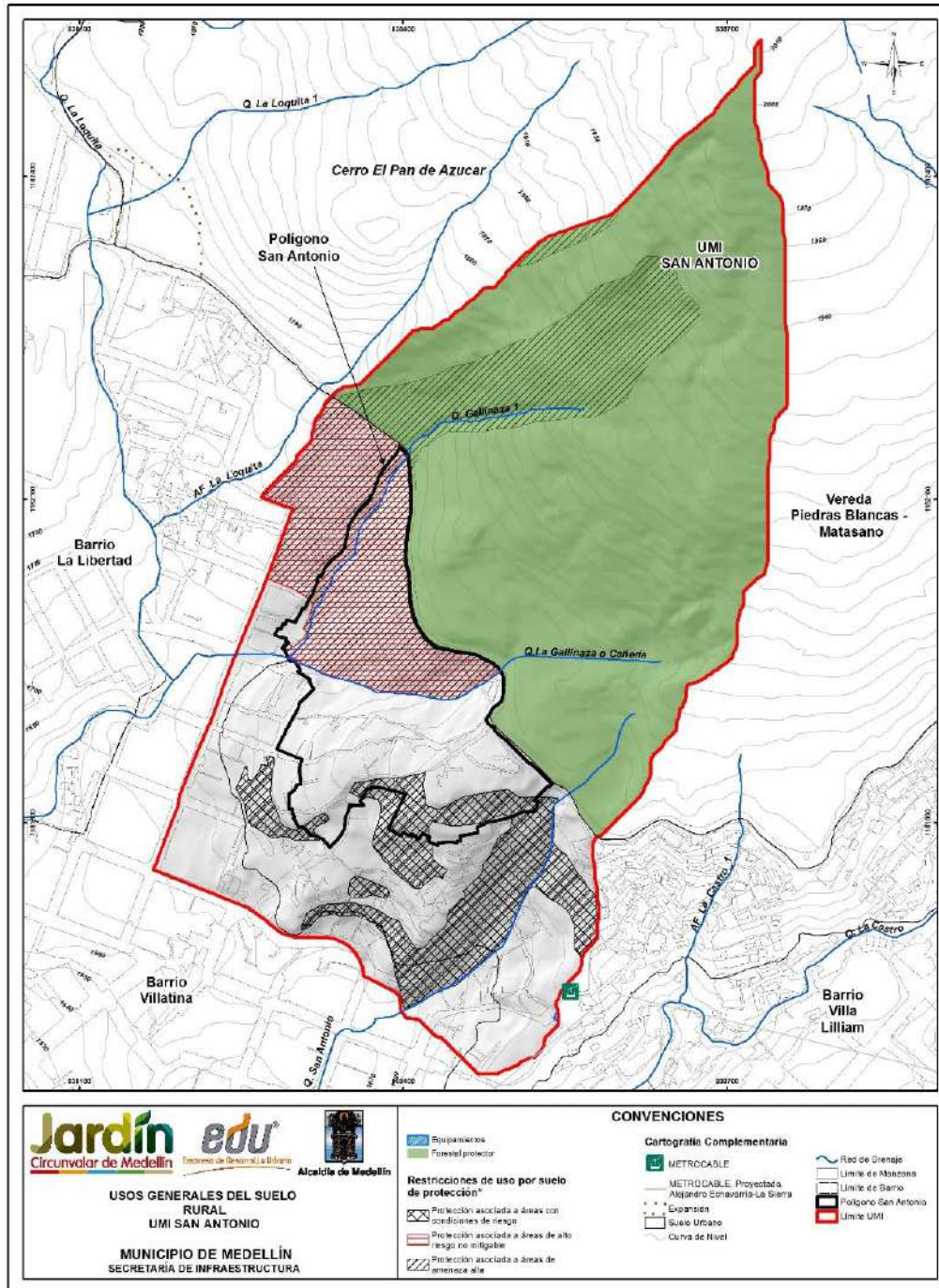


Figura 1. Zonificación de la UMI del polígono al interior del Barrio San Antonio (Sin Escala)

La zona alta pertenece a la parte rural, el límite coincide con la Calle 56EE. Esta zona se caracteriza por el uso del suelo, principalmente de “protección forestal” como se muestra en el Mapa 3. Sobre esta zona se concentran espacios turísticos, recreativos y ecológicos como lo son el Parque Las Tinajas y el Sendero Ruta de Campeones. Se destaca por corresponder a un terreno de pendientes muy altas mayores de 30°, en el cual se evidencia una actividad morfodinámica importante, destacándose la presencia del escarpe del Movimiento en Masa Villatina (1987). Se considera que todos los procesos de inestabilidad que puedan generarse en esta zona afectarían directamente el Polígono San Antonio. Adicionalmente, al interior de la zona alta se encuentran involucradas las cuencas de las Quebradas La Gallinaza y San Antonio, las cuales atraviesan o circundan el polígono, por lo que la delimitación de la UMI involucra igualmente las cuencas de estos drenajes que deberán ser analizados para efectos de la verificación de fenómenos de inundación y/o avenidas torrenciales que puedan llegar al polígono de estudio.

De la Figura 2 a la Figura 4 se presentan panoramas generales de la zona alta de la UMI San Antonio, ilustrando las condiciones de pendiente, uso del suelo e importancia morfodinámica. La Figura 4 muestra el proceso de inestabilidad ocurrido en Villatina en el año 1987. Actualmente, la cicatriz de este fenómeno se encuentra totalmente revegetalizada por pastos espesos, como se pudo comprobar en los recorridos de campo realizados en 2015 para este proyecto, lo que permite establecer que a la fecha este proceso de inestabilidad no presenta signos de reactivación.



Mapa 3. Usos generales del suelo rural San Antonio (POT, 2014)
(17_SATUsosdelSueloRural_Medellin_C y 17_SATUsosdelSueloRural_Medellin_T)



Figura 2. Panorama general de la zona alta de la UMI San Antonio desde el Parque Las Tinajas



Figura 3. Condiciones de pendientes de la zona alta de la UMI San Antonio

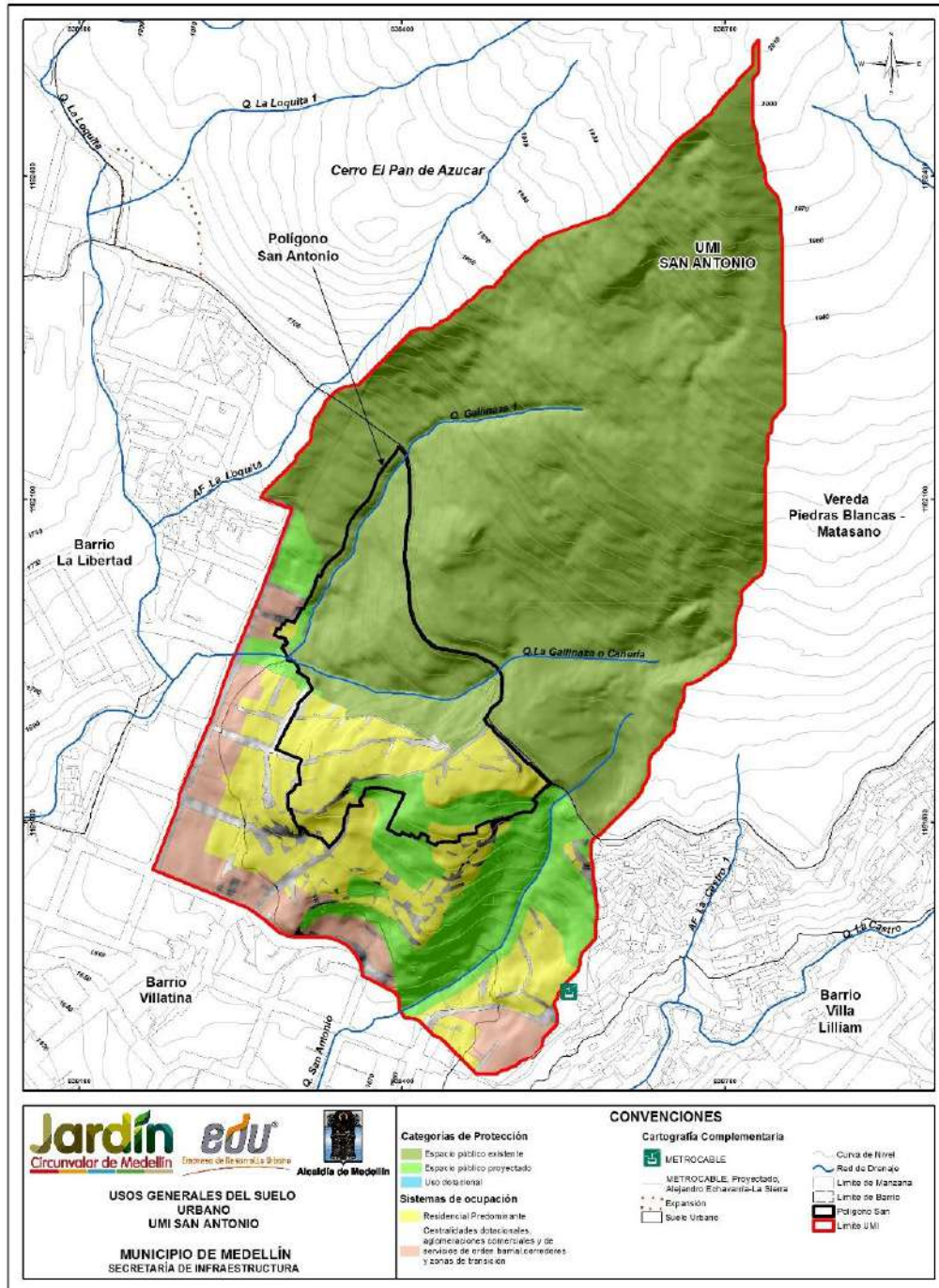


Figura 4. Proceso de inestabilidad de Villatina (1987) ocurrido en la parte alta de la UMI San Antonio

La zona baja se destaca por pertenecer a la zona urbana donde el uso del suelo está principalmente destinado al desarrollo urbanístico y residencial como se muestra en el Mapa 4. En esta zona, aproximadamente el 70% del área se encuentra ocupada por viviendas, incluso gran parte de este urbanismo se concentra en las zonas de drenajes que atraviesan el polígono. En el flanco norte de la zona baja se localiza el campo santo del Movimiento en Masa Villatina (1987), un lugar con una alta intervención antrópica destinada a la transformación de un espacio donde el uso del suelo es de conservación por lo que sobre este no se tiene ningún tipo de estructura.

En la zona baja, al interior del polígono, se concentran cicatrices de procesos morfodinámicos localizados principalmente hacia las márgenes derecha e izquierda de las Quebradas La Gallinaza y San Antonio, siendo estos los procesos más relevantes en términos de actividad morfodinámica y los que podrían representar mayor amenaza por efectos de las altas pendientes y el densificado nivel de urbanismo.

De la Figura 5 a la Figura 8 se presenta un panorama general de las condiciones actuales de la zona baja de la UMI San Antonio. La Figura 5 resalta el contraste del uso del suelo entre ambas zonas que componen la UMI objeto de estudio.



Mapa 4. Usos generales del suelo urbano San Antonio (POT, 2014)
(16_SATUsosdelSueloUrbano_Medellin_C y 16_SATUsosdelSueloUrbano_Medellin_T)



Figura 5. Panorama de contraste entre la zona alta y la zona baja



Figura 6. Zona del Campo Santo Villatina (1987)



Figura 7. Panorama general del urbanismo zona baja de la UMI San Antonio



Figura 8. Condiciones de densidad de estructuras a lo largo de los drenajes San Antonio (izquierda) y La Gallinaza (derecha)

Desde los puntos de vista hidrológico e hidráulico, la UMI está igualmente delimitada por las cuencas de los Drenajes La Gallinaza y San Antonio. Ambos drenajes nacen en la parte media de la zona alta y atraviesan el polígono en sentido noreste a suroeste pasando igualmente por la zona baja de la UMI.

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 del cauce, incrementando las zonas de lleno antrópico y modificando las condiciones del cauce en algunos sectores.

El Drenaje La Gallinaza presenta dos afluentes cuya zona de confluencia está en la zona baja de la UMI, por fuera del polígono de estudio. Estos drenajes atraviesan directamente el Polígono San Antonio y tienen un impacto importante en torno a las diferentes amenazas analizadas en este estudio.



En cuanto al Drenaje San Antonio, éste se encuentra dentro de la UMI pero fuera del polígono. No obstante, su análisis cobra importancia en términos de inundaciones que puedan afectar la margen derecha de su cauce donde se encuentra parte del polígono objeto de estudio.

La Figura 9 muestra un panorama de las condiciones antrópicas que han afectado en parte los Drenajes La Gallinaza y San Antonio en la UMI San Antonio.



Figura 9. Condiciones actuales de los drenajes La Gallinaza (izquierda) y San Antonio (derecha)

Finalmente, los límites físicos de la UMI San Antonio correspondientes a la Carrera 15A y la Calle 56 en su parte inferior, presentan condiciones estables. La delimitación de la UMI hasta este límite es debido a los cambios de pendiente que se identifican en este sector. Los límites laterales de la UMI San Antonio, coinciden con las divisorias de aguas de las quebradas Gallinaza 1 y San Antonio, áreas que deben ser consideradas teniendo presente que hacen parte del aporte hidrológico a los drenajes y donde se presentan evidencias de fenómenos de inestabilidad, más allá de estos límites se considera que los procesos que puedan presentarse no serán de mayor afectación para el polígono San Antonio. La UMI presenta una actividad morfodinámica alta y el área considerada a través de la UMI agrupa todas aquellas zonas que de alguna u otra forma podrían impactar al proyecto San Antonio.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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.

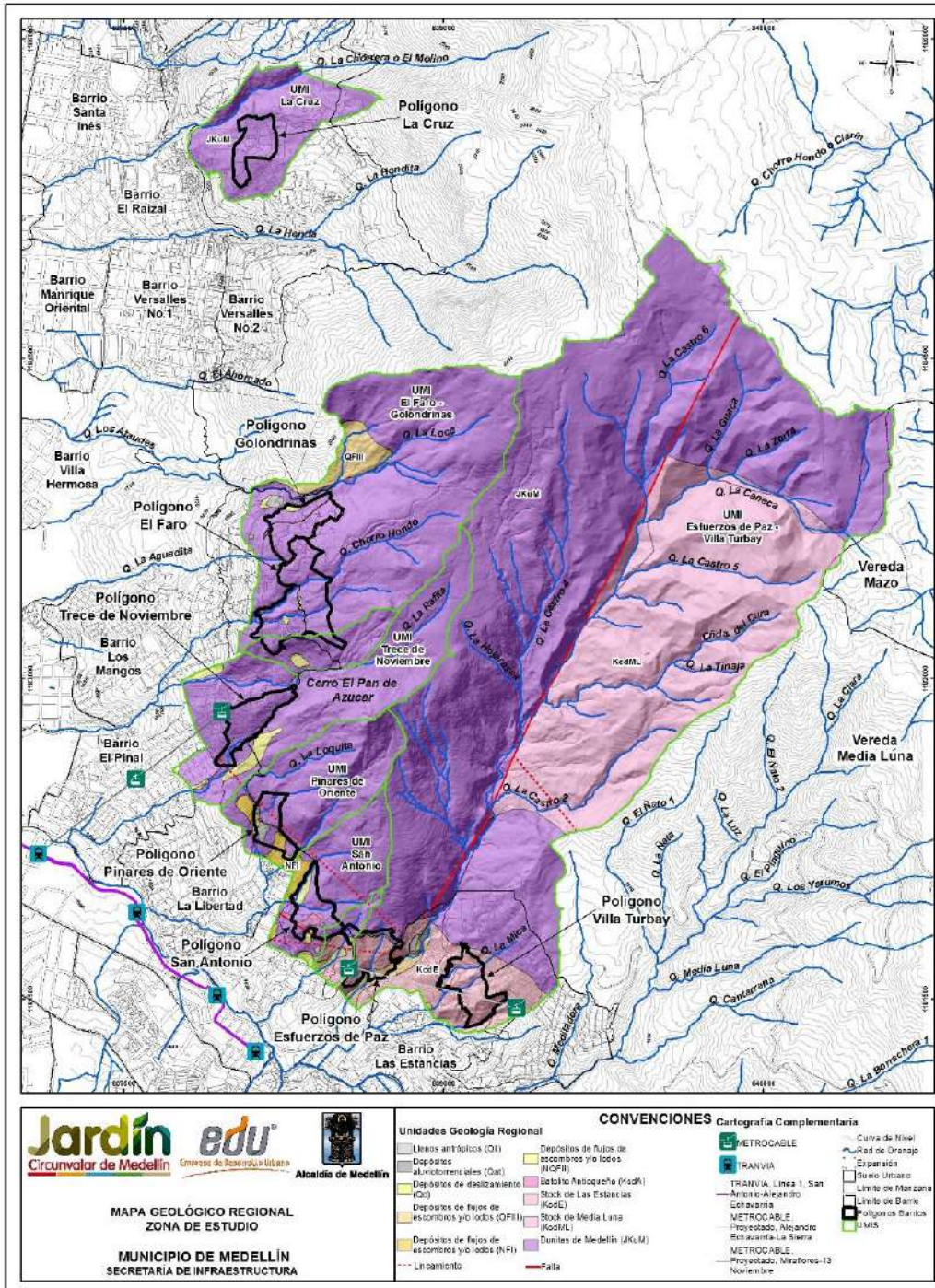
La UMI San Antonio se ubica sobre las unidades geológicas denominadas como Dunitas de Medellín (JKuM), Batolito Antioqueño (KcdA), depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NFI, NQFII) y llenos antrópicos (QII). A continuación, se describen en orden cronológico todas las unidades geológicas donde se 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_SATGeologiaRegional_Medellin_C y 03_SATGeologiaRegional_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 depositación (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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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, INCIGAM, INGEOCILCÓN, TECNISUELOS, INTEINSA, entre otras. En el Numeral 10.1.1 se presenta la información sobre la localización de las perforaciones de dichos estudios, las cuales fueron consultadas para la elaboración del modelo geológico y

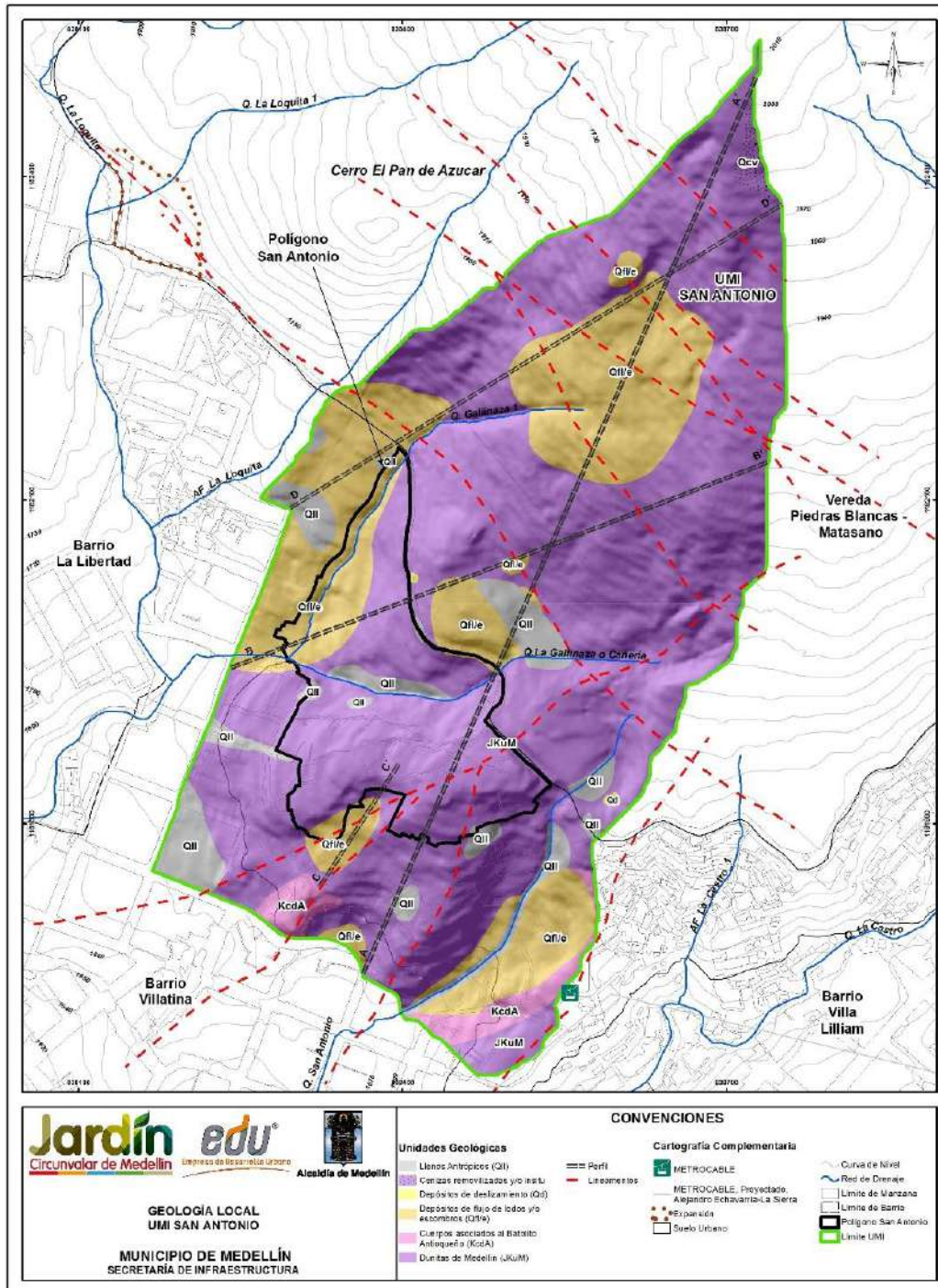
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

fueron clasificadas en “Perforaciones Estudios Anteriores Utilizadas” y “Perforaciones Estudios Anteriores No Utilizadas”.

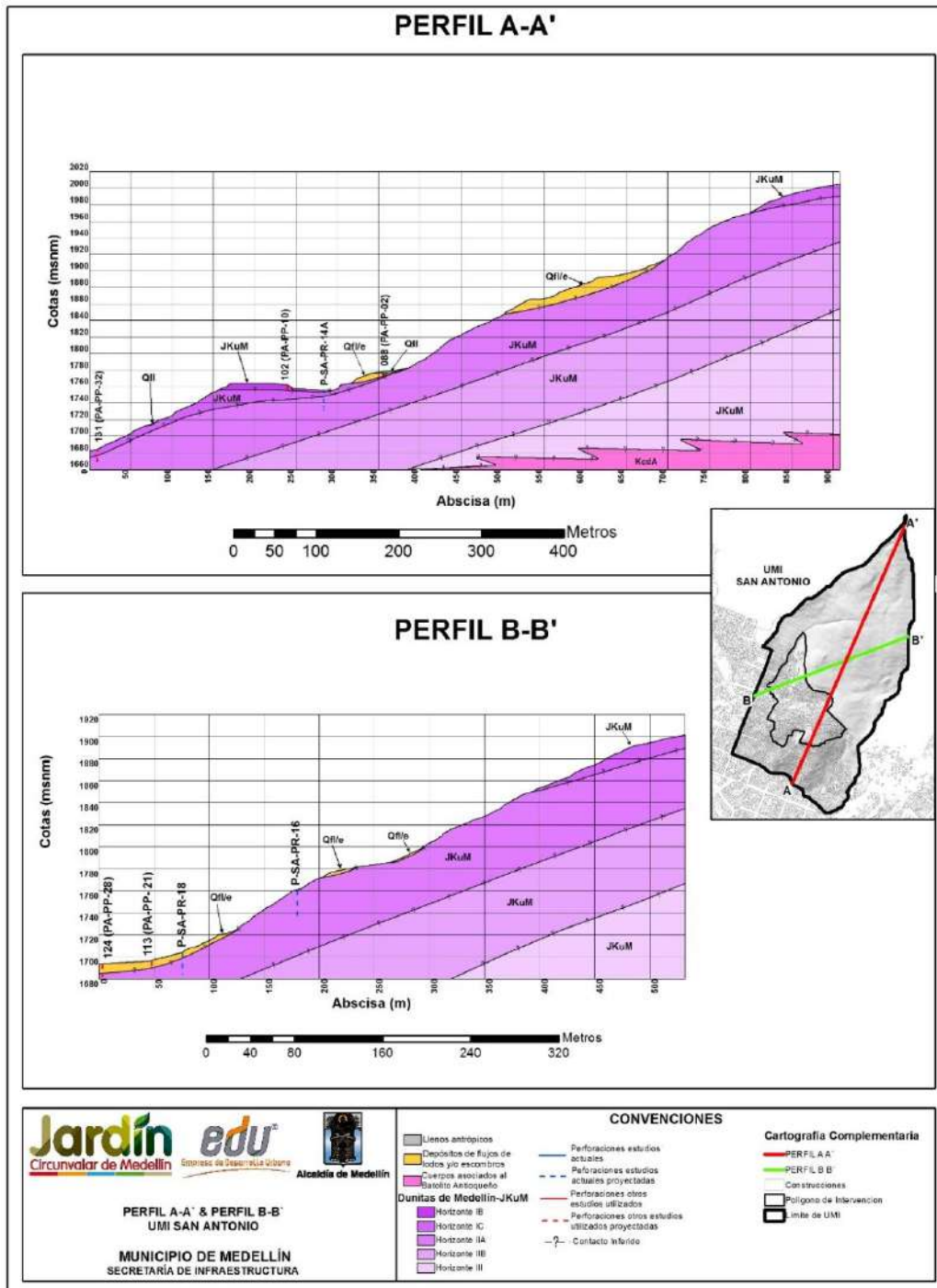
Después de correlacionar dichas perforaciones con la exploración directa e indirecta ejecutada para el presente estudio, de realizar los recorridos de campo y de utilizar herramientas como análisis multitemporal y geomorfológico, se obtuvo como resultado el modelo geológico de la UMI San Antonio mostrado en planta (Mapa 6) y en perfil (Mapa 7 y Mapa 8).

Se puede observar que la unidad geológica predominante corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM) y los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA), ambas unidades son suprayacidas por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) y depósito de deslizamiento (Qd). Además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En el Anexo 01 se presentan los registros de los levantamientos realizados en campo.

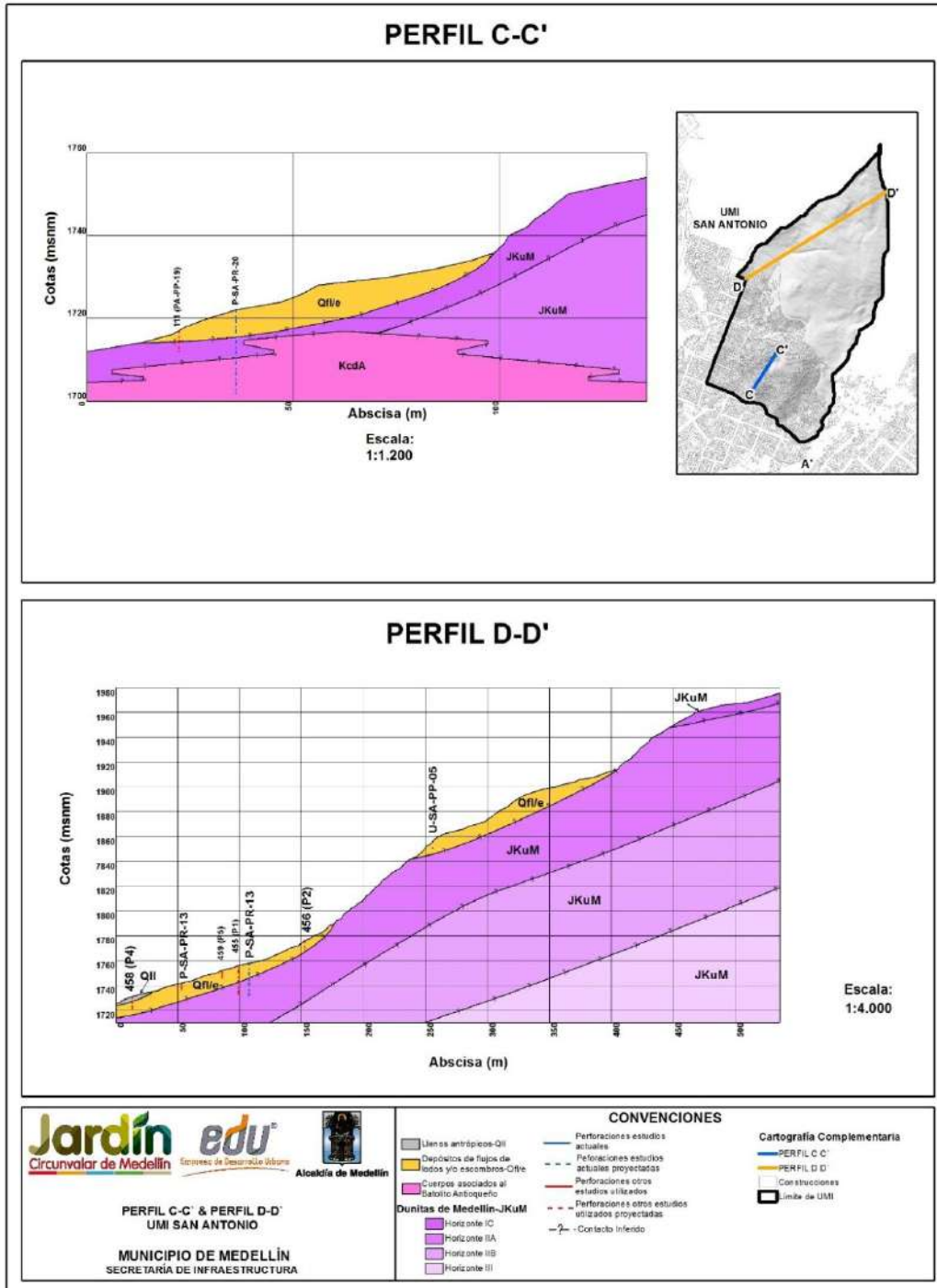
A continuación, se hace una breve descripción de cada una de estas unidades desde la más reciente hasta la más antigua.



Mapa 6. Geología local de UMI San Antonio
(04_SATGeologiaLocalUMI_Medellin_C y 04_SATGeologiaLocalUMI_Medellin_T)



Mapa 7. Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'
(05_SATPerfilesGeologicos_Medellin_C y 05_SATPerfilesGeologicos_Medellin_T)



Mapa 8. Perfiles estratigráficos C-C' y D-D'
 (06_SATPerfilesGeologicos_Medellin_C y 06_SATPerfilesGeologicos_Medellin_T)

4.2.1 Llenos antrópicos (QII)

En la UMI San Antonio se encuentran cuerpos que en superficie abarcan longitudes entre 15 m y 100 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.0 m y 8.0 m, los cuales se concentran en la parte media y baja de la UMI. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-16, 085 (PA-PP-01A), 103 (PA-PP-11), 123 (PA-PP-27), 125 (PA-PP-28A), 132 (PA-PP-34), 458(P4), 460(P6) y 461 (P7), suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizó la Línea Geofísica P-SA-LG-03 como apoyo para determinar la extensión en superficie y en profundidad de algunos cuerpos y las Estaciones de Campo KGL02-SA, KGL03-SA, KGL04-SA, KGL05-SA, KGL06-SA, KGL08-SA, SFJ09-U-SA, SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA.

El lleno encontrado en las Perforaciones P-SA-PR-14 y 085 (PA-PP-01A) con espesor variable entre 4.5 m y 6.0 m de espesor, tiene una relación matriz/fragmentos de 95/5. Está formado por material limoso de color café anaranjado con 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 10).

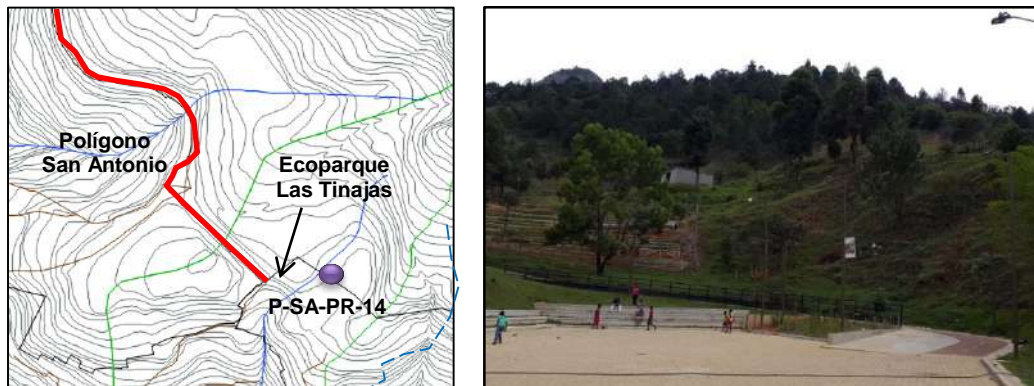


Figura 10. Zona del lleno de Perforación P-SA-PR-14 en cartografía del año 1998

En la parte baja del extremo sureste, 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 (Figura 11) 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. El lleno localizado en el extremo sur de la UMI fue reportado por el Consorcio Microzonificación (2006).





Figura 11. Llenos antrópicos en las Estaciones SFJ10-U-SA y SFJ12-U-SA

En la parte central de la UMI, en la margen derecha de la Quebrada La Gallinaza, fue cartografiado el lleno con la Perforación 103 (PA-PP-11) y las Estaciones KGL02-SA, KGL03-SA, KGL06-SA y KGL08-SA. Tiene un espesor variable entre 2 m y 4 m, relación matriz/fragmentos variable entre 70/30 y 90/10, con matriz limo arenosa a limosa, de color ocre y parda, húmeda, consistencia blanda, fragmentos subangulares de dunitas, que miden entre 5 cm y 30 cm y materiales antrópicos correspondientes a plásticos principalmente.

Cerca del lleno descrito anteriormente, en la vertiente de la margen izquierda de la quebrada se encuentran los llenos identificados en las Estaciones KGL04-SA y KGL05-SA, con espesores entre 1.5 m y 2.0 m, los cuales suprayacen el suelo residual de dunitas. Tiene 70% a 80% de matriz limosa, 10% a 20% de fragmentos subangulares de dunitas y 10% de materiales antrópicos como plásticos.

En la Perforación P-SA-PR-16 se caracterizó un lleno localizado en la vía que conduce al Eco parque Las Tinajas, con un espesor de 4.3 m. Consiste en un material areno limoso de color amarillo crema, con relación matriz/fragmentos de 20/80, húmedo, consistencia blanda y tenacidad baja. Los fragmentos son de dunitas y milonitas, frescos, con tamaños inferiores a 3 cm.

El lleno localizado en la zona ocupada actualmente por la placa sintética del Eco parque Las Tinajas, con un espesor inferido de 2.0 m, fue determinado a partir de la identificación en campo de la geoforma antrópica.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

Hacia el extremo oeste de la UMI, cerca de la zona del Campo Santo de Villatina, se encuentran tres llenos antrópicos suprayaciendo el depósito de flujo de lodos y/o escombros asociado al deslizamiento de Villatina (1987). El primer lleno fue identificado en la Perforación P-SA-PR-13, con espesor de 5 m, tiene 60% de matriz limo arenosa de color café amarillento, húmeda a seca, consistencia firme y tenacidad media, 30% de fragmentos de dunitas y nódulos de hierro, angulares y de tamaños gravas finas y 10% de material antrópico como ladrillos. El segundo lleno caracterizado en las Perforaciones 458(P4) y 460(P6) y la Línea Geofísica P-SA-LG-03, tiene entre 2.5 m y 4.0 m de espesor, cuyo material es limo arcilloso, húmedo, fácilmente disgregable, con fragmentos angulosos y redondeados, meteorizados y fragmentos de materiales antrópicos como ladrillos (INGEOCILCON, 2009). El tercer lleno fue identificado con la Perforación 461(P7) con un espesor de 1.5 m, consiste en un material limo arcilloso, de color oscuro a negro con pequeñas vetas amarillas, húmedo y plástico, con gravas angulares y pedazos pequeños de escombros (INGEOCILCON, 2009).

Hacia el suroeste, se identificaron dos llenos antrópicos con las Perforaciones 123 (PA-PP-27), 125 (PA-PP-28A) y 132 (PA-PP-34), con espesores variables entre 1.5 m y 4.0 m. Estos corresponden a llenos realizados para vías y viviendas de la zona. Consisten en material limoso con gravas de color café oscuro, húmedo, tenacidad baja y densidad baja.

4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ

Las cenizas volcánicas están localizadas en la unidad geomorfológica denominada como Vertiente Suave e identificada mediante las Estaciones de Campo SFJ01-SA, SFJ02-SA y SFJ03-SA. Se presenta como una capa de cenizas volcánicas generalmente removilizadas con un espesor de 50 cm, aunque también de forma puntual y no cartografiable se encuentran in situ. Esta capa cubre el perfil de suelo de la Dunita de Medellín. El tamaño de grano es principalmente limo, de color naranja amarillento y levemente húmeda como se ilustra en la Figura 12.



Figura 12. Capa de cenizas volcánicas removilizadas

4.2.3 Depósito de deslizamiento (Qd)

Este depósito fue identificado con la estación KGL08-U-SA, localizado en la parte central de la UMI, en el talud superior de la vía que conduce al Eco parque Las Tinajas, es ovalado y tiene una longitud de 14 m y un ancho de 10 m. Es un depósito clasto soportado con relación matriz/fragmentos de 20/80. La matriz es limosa de color café, húmedo, de consistencia blanda y los fragmentos son de dunitas subangulares, frescos, que miden hasta 2 m (Figura 13).





Figura 13. Depósito de deslizamiento en la parte central de la UMI

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

Se encuentran distintos cuerpos distribuidos aleatoriamente en toda la UMI, en algunos cubiertos de forma parcial por llenos antrópicos. Tienen espesores entre 3 m y 16 m y abarcan longitudes entre 15 m y 280 m. Se encontraron en las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-15, P-SA-PR-18, P-SA-PR-20, 085 (PA-PP-01A), 088 (PA-PP-02), 089 (PA-PP-02A), 104 (PA-PP-12), 111 (PA-PP-19), 113 (PA-PP-21), 122 (PA-PP-26B), 123 (PA-PP-27), 125 (PA-PP-28A), 131 (PA-PP-32), 132 (PA-PP-34), 151 (PA-PP-04A), 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), (456(P2), 458(P4), 460 (P6) y 461 (P7), así como en las Estaciones de Campo KGL01-SA , KGL03-U-SA, KGL04-U-SA, KGL05-U-SA y SFJ11-U-SA.

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 la Microzonificación Sísmica como QFIII, NFI y NQFII, cuya subdivisión fue hecha con herramientas de apoyo como datación, grado de incisión y

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

madurez (grado de meteorización), objeto de estudio que no es el de este informe. 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 Qf/e.

El depósito generado por el deslizamiento de Villatina es el más reciente y de mayor extensión en la zona de estudio, el cual ocupa parte del extremo oeste y central de la UMI (Figura 14). El evento generó dos cuerpos separados, debido a que la parte central (Unidad geomorfológica Escarpe Largo Semicircular-ELSC) de la zona por donde se transportó la masa desprendida presenta una pendiente alta, por lo cual la acumulación del material en su momento debió ser de poco espesor y la erosión superficial facilitada por la alta pendiente ha limpiado el material hasta el punto de no quedar evidencias de este depósito en la zona del Escarpe Largo Semicircular-ELSC o por lo menos no de un espesor cartografiable.

El depósito de la parte superior se definió con la Perforación 236 (P8), rasgos geomorfológicos e información recopilada sobre este deslizamiento (HERMELIN, 2005). Este depósito es descrito en Vélez, R. M. (2010) como un depósito con relación matriz/fragmentos variable entre 90/10 y 10/90, con matriz limo arcillosa, de plasticidad baja, color pardo rojizo, con fragmentos de dunita meteorizada con tamaños de 2 mm a 10 mm de diámetro.

El depósito de la parte inferior asociado, fue modificado con respecto al planteado por el Consorcio Microzonificación (2006), de acuerdo con las perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-15, P-SA-PR-18, 456 (P2), 089 (PA-PP-02A), 104 (PA-PP-12), 113 (PA-PP-21), 124 (PA-PP-28), 151 (PA-PP-04A), 458 (P4), 460 (P6) y 461 (P7), la estación de campo KGL01-SA y la línea geofísica P-SA-LG-03. Tiene espesor variable entre 3.5 m y 8.0 m, cuya relación matriz/fragmentos varía entre 70/30 y 60/40, la matriz es limosa a limo arenosa de color café amarillento, café grisáceo y negro, húmeda, consistencia firme a blanda y tenacidad baja. Los fragmentos corresponden a dunitas y nódulos de hierro que miden entre 2 cm y 15 cm (Figura 15).

El depósito de la parte central de la UMI, localizado en cercanías a la placa sintética del Eco parque Las Tinajas se definió con la Perforación 088 (PA-PP-02), las estaciones de campo KGL02-U-SA, KGL04-U-SA y KGL05-U-SA y la línea P-SA-LG-01. Este depósito tiene relación matriz/fragmentos variable entre 40/60 y 70/30. La matriz es limosa, de color ocre y pardo, húmeda a seca, consistencia blanda a firme y tenacidad media. Los fragmentos son de dunitas, angulares a subangulares, que miden entre 0.4 m y 2.0 m (Figura 15).

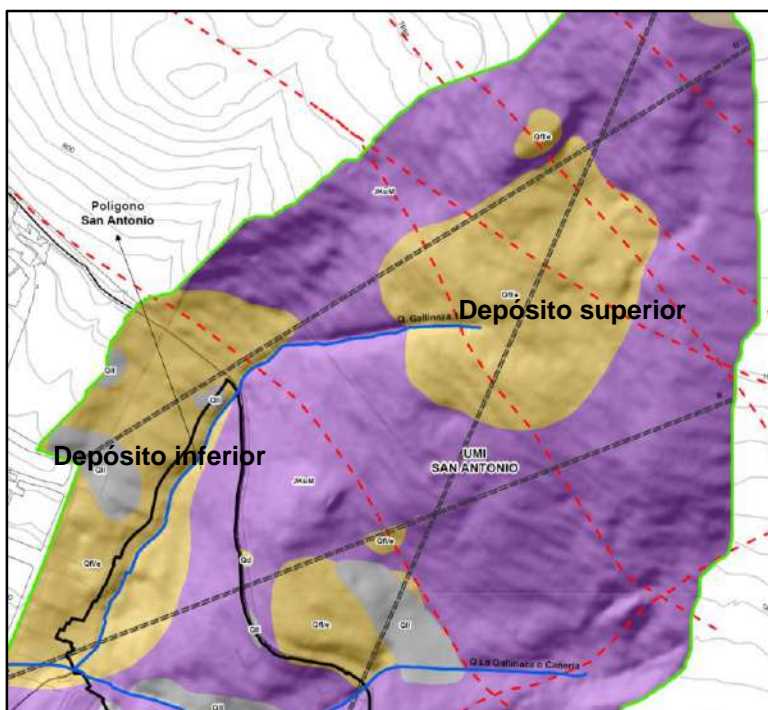




Figura 14. Esquema del depósito de la parte superior e inferior generado por el deslizamiento de Villatina (Sin escala)



Figura 15. Depósito de flujo de lodos y/o escombros en Perforación P-SA-PR-15 (izquierda) y Estación de Campo KGL05-U-SA (derecha)

Los tres depósitos cartografiados en la parte baja de la UMI fueron modificados con respecto a los reportados por el Consorcio Microzonificación (2006) de acuerdo con los rasgos geomorfológicos y los recorridos de campo. El primer depósito, identificado en las Perforaciones P-SA-PR-20 y 111(PA-PP-19) tiene un espesor de 8 m y relación

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

matriz/fragmentos de 85/15. La matriz es limosa, húmeda a saturada, consistencia blanda y tenacidad baja. Los fragmentos son de dunitas, brecha de falla, nódulos de hierro y fragmentos de cuarzo, subangulares, moderada a completamente meteorizados; que miden hasta 4 cm. El segundo depósito, identificado en la Perforación 131 (PA-PP-32) tiene un espesor de 3 m, el cual fue caracterizado por DEACIVIL (2014) como matriz limosa con nódulos de hierro de color café, humedad baja, densidad baja a media y plasticidad baja. El tercer depósito fue caracterizado en las Perforaciones 407(P4), 409(P6), 410(P7), 411(P8) y 121(PA-PP-26A) con un espesor variable entre 1.0 m y 5.0 m, consiste en matriz limo arenosa a limo arcillosa de color café anaranjado, seca, consistencia media con fragmentos milimétricos de cuarzo y micas INCIGAM (2015).

4.2.5 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)

Esta unidad fue identificada 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-SA-PR-20, en el cual se encontró la zona de contacto Dunita de Medellín-Cuerpo granítico en suelo residual de color café grisáceo con estructura entre moteada y bandeada (Figura 16).

El Horizonte IC consiste en un suelo areno limoso blanco con espesor mínimo de 8.0 m, donde se identifican minerales como cuarzo con longitudes de 6.0 mm, plagioclasa alterada a arcillas de color blanco y micas. Tiene consistencia blanda, y se encuentra húmedo.

En los recorridos de campo, específicamente en la Estación de Campo SFJ13-U-SA, localizada en la parte baja de la UMI, se evidenció que este cuerpo presenta formas ovaladas y se presenta como un suelo saprolítico con alto contenido de cuarzo y minerales de hierro que le dan una coloración rojiza como se ilustra en la Figura 17.

También se encuentra material asociado a los cuerpos ígneos intrusivos sobre la margen izquierda de la Quebrada San Antonio, en el límite occidental de la UMI e inmediaciones del Polígono Esfuerzos de Paz.



Figura 16. Horizonte IC de meteorización del granito



Figura 17. Horizonte IC de meteorización del cuerpo granítico

4.2.6 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 halló en las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-14A, P-SA-PR-15, P-SA-PR-16, P-SA-PR-18, P-SA-PR-20,

U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07 y en las líneas geofísicas P-SA-LG-01, P-SA-LG-02, P-SA-LG-03, P-SA-LG-04 y U-SA-LG-13. 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 (Figura 27).



Figura 18. Evidencias de dunita cizallada y brechada en la zona de estudio

El Horizonte IB en la parte alta y baja de la UMI, de acuerdo con las Perforaciones P-SA-PR-14A, U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07, tiene espesores variables entre 2.0 m y 3.0 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 hasta de 5.0 mm.

Además, en las Estaciones de Campo SFJ04-SA, SFJ05-SA, SFJ06-SA y SFJ07-SA, MAD06-SA, MAD07-SA, KGL01-SA, 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 19.



Figura 19. Horizonte IB de meteorización localizado en la parte alta de la UMI

El Horizonte IC se encontró en las Perforaciones P-SA-PR14, P-SA-PR-14A, P-SA-PR-15, P-SA-PR-20, U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07 y las Líneas Geofísicas P-SA-LG-03 y U-SA-LG-13, donde muestra espesores de hasta 7.0 m. En todos los casos 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 la Estación de Campo KGL04-U-SA, sobre la Carrera 11 que conduce hacia el Eco parque Las Tinajas, se encuentra un talud de 2.0 m de altura sobre suelo saprolítico, el cual exhibe estructura esquistosa y minerales de color verde tales como talco y serpentina (Figura 20).

El Horizonte IIA se cartografió con base en las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-14A, P-SA-PR-15, P-SA-PR-16 y P-SA-PR-18 y en las Líneas Geofísicas P-SA-LG-01, P-SA-LG-02, P-SA-LG-03 y U-SA-LG-13, con espesores inferidos superiores a 15 m. Consiste en bloques de dunita y dunita milonitizada con longitudes inferiores a 15 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 en las paredes de las diaclasas (Figura 21). Se observan igualmente espejos de falla y zonas de cizalla. Se encontró una zona de cizalla, en la Perforación P-SA-PR-14A, evidenciada por la presencia de bloques con tamaño máximo de 5 cm, angulares en un suelo arcilloso de color gris verdoso. La recuperación de las muestras en las perforaciones en promedio es del 50%.



Figura 20. Horizonte IC de meteorización que exhibe estructura esquistosa



Figura 21. Horizonte IIA de meteorización con estructuras de esquistosidad en la Dunita

Además, el Horizonte IIA fue identificado en las Estaciones de Campo MAD10-SA, KGL02-SA, KGL06-SA, KGL07-SA, KGL09-SA, MAD11-SA. La roca está fracturada, moderadamente meteorizada y con pátinas de oxidación de color negro y naranja. En el afloramiento mostrado en la Figura 22 el escarpe en roca alcanza alturas de hasta 7.0 m.





Figura 22. Horizonte IIA de meteorización de la Dunita

En algunas zonas se encuentran bloques en superficie de milonitas y dunitas, con tamaños cercanos a 1 m de longitud de formas subangulares. También se observan escarpes en roca cuyos espesores visibles varían de 1.8 m a 7.0 m. El porcentaje de suelo/roca varía entre 70/30 y 80/20, el suelo es de color naranja con manchas verdes y negras, el tamaño de grano es limo con muchas micas, su consistencia es blanda, la tenacidad es baja y moderadamente húmeda (Figura 23).



Figura 23. Bloques de dunita esquistosa en horizonte IIA de meteorización

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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. En la zona de estudio regionalmente se tienen las macrounidades que se describen a continuación:

- ✓ 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. 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 presenta la distribución de las macrounidades que acaban de ser descritas. Se observa que la UMI San Antonio se ubica sobre las macrounidades Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA) y Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB).

5.1.2 Unidades Geomorfológicas

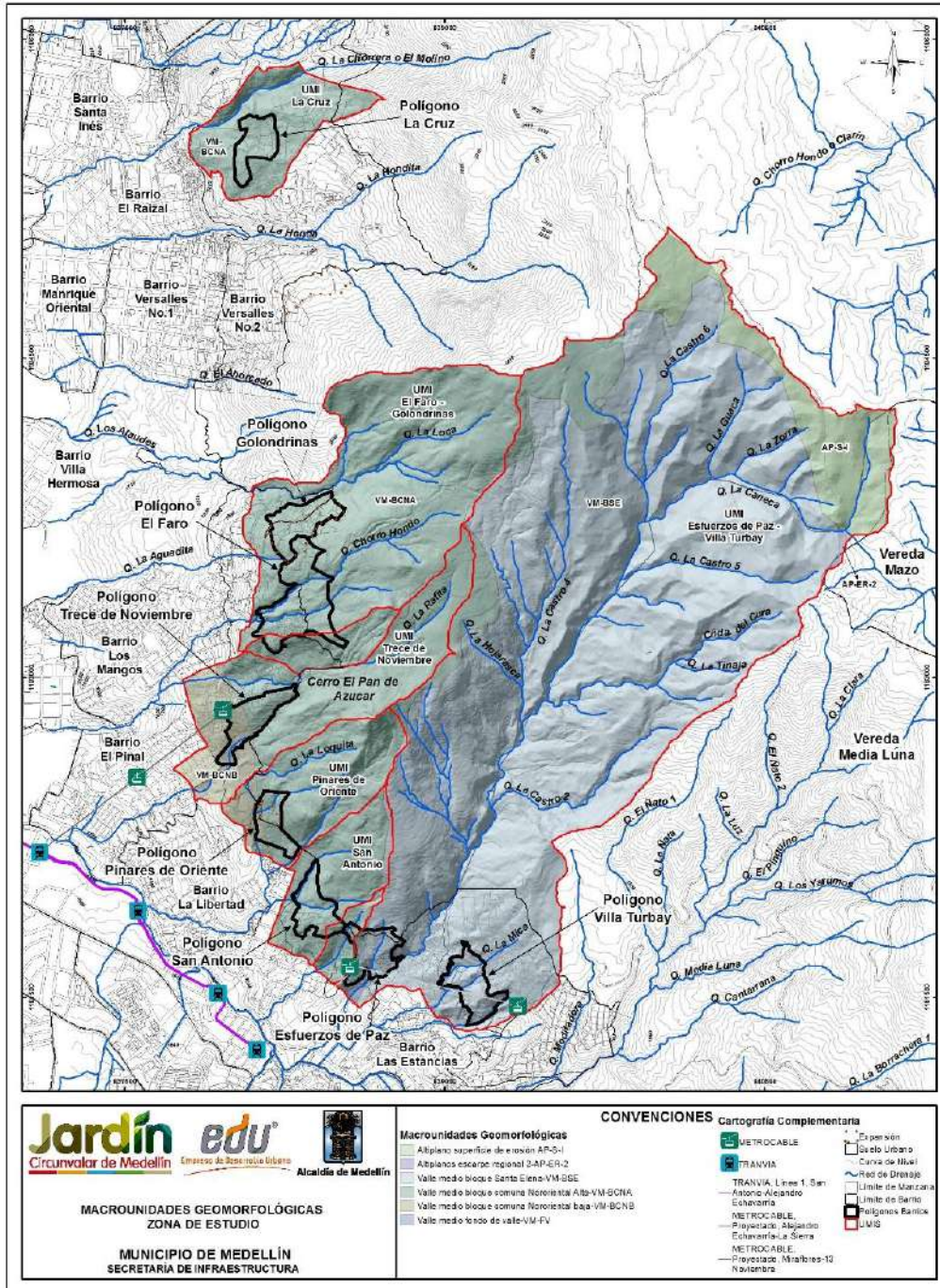
Las unidades geomorfológicas se detallan en escalas un poco más locales, haciendo referencia a aquellas geoformas con relaciones en cuanto a su geometría, la homogeneidad del proceso que las genera, la geología y su edad. Dentro de las macrounidades descritas anteriormente se puede encontrar diversas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

- ✓ 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.

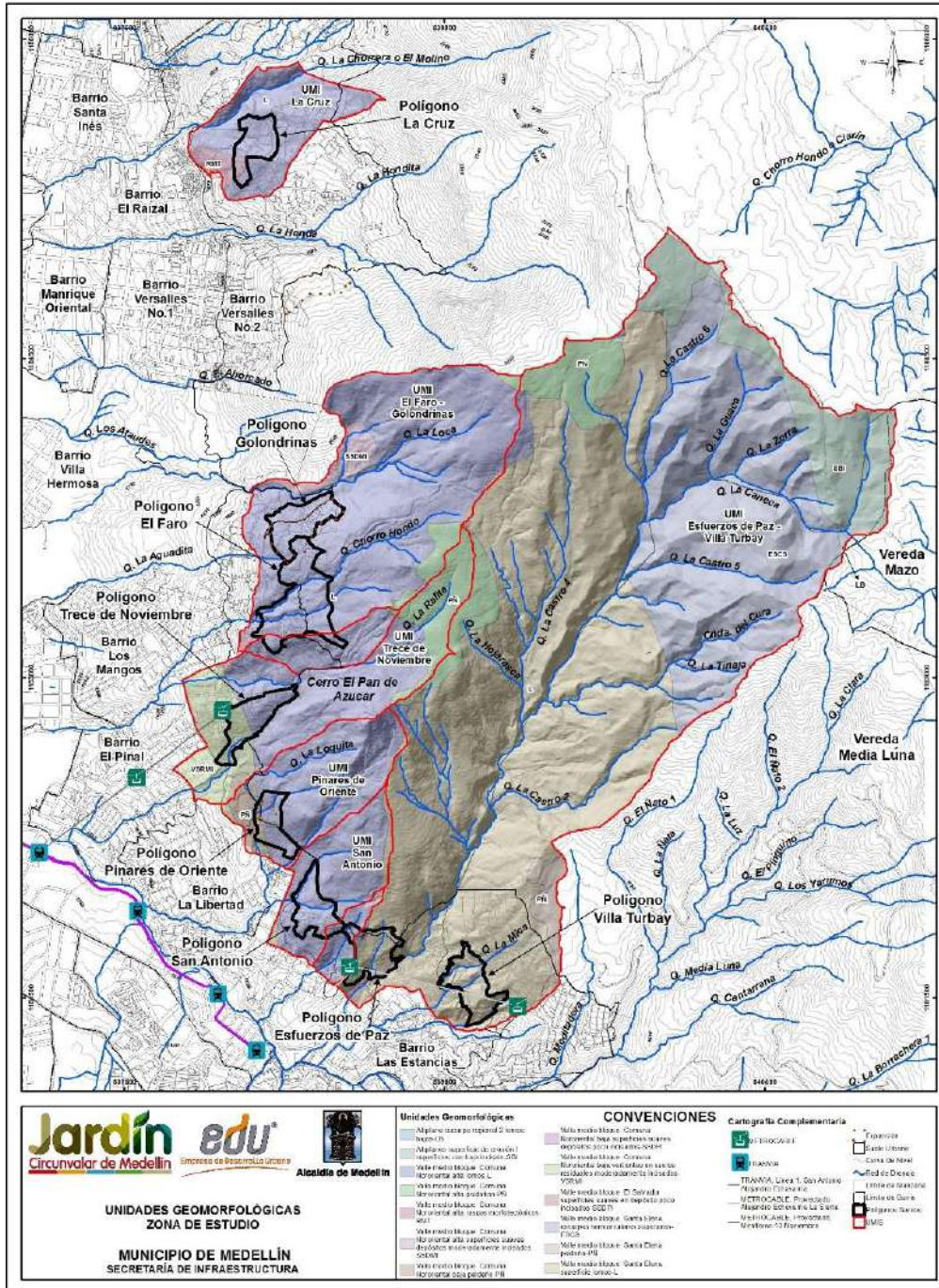
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

- ✓ 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. 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 las unidades geomorfológicas que acaban de ser descritas se muestra en el Mapa 10. La UMI San Antonio se ubica sobre la Unidad de Lomos (L) y Unidad de Vertiente en suelos residuales moderadamente incisados (VSRMI).



Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio (07_SATMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y 07_SATMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)



Mapa 10. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio
(08_SATUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y
08_SATUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)

5.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En este capítulo se realiza el análisis para la definición de las unidades geomorfológicas de la UMI del Polígono San Antonio, 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

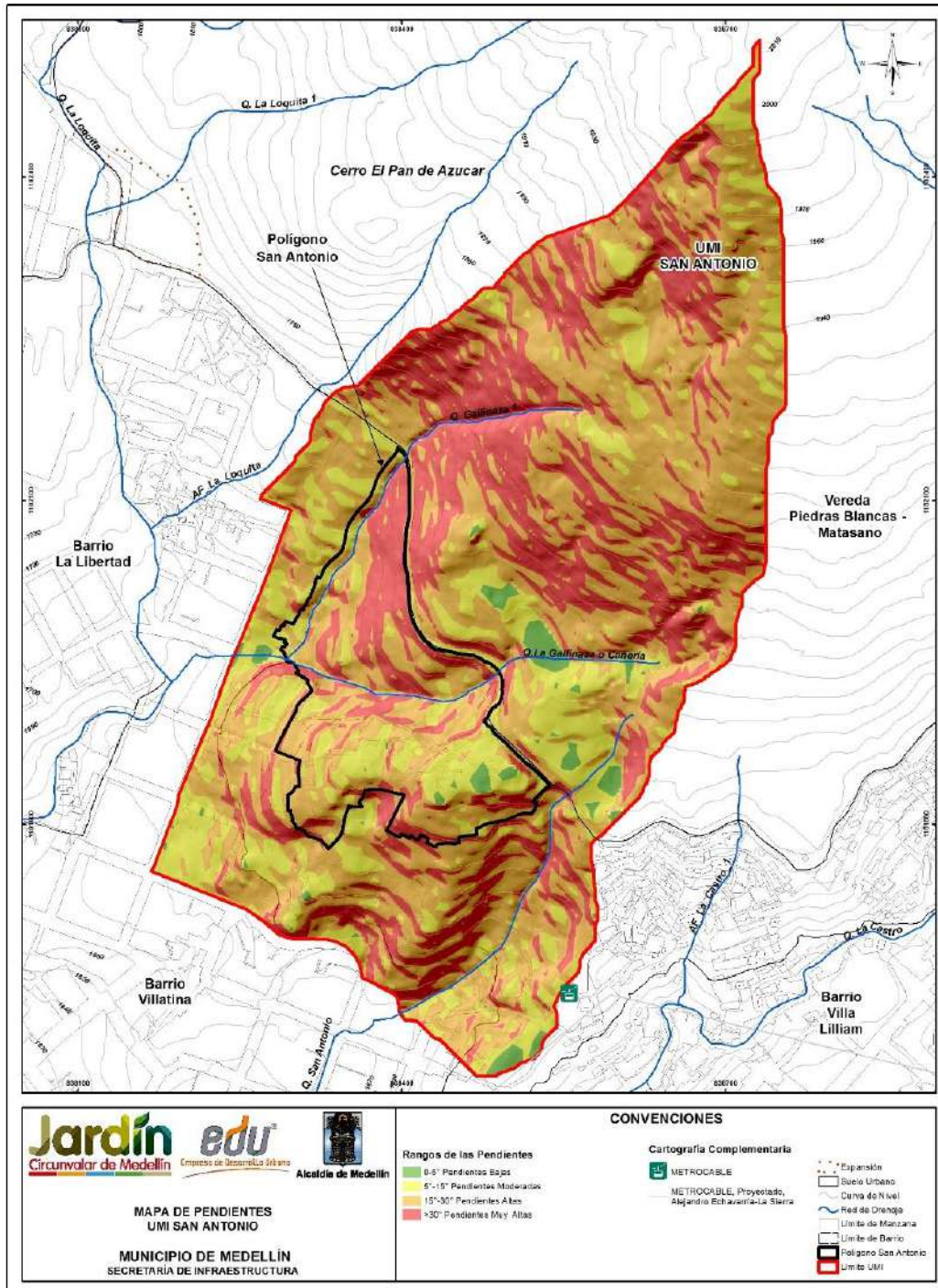
Rango	Clasificación	Rasgo Geomorfológico	Tipo de Proceso
0° a 5°	Baja	Planicies	Erosión superficial
5° a 15°	Moderada	Superficies Suaves	Erosión superficial
15° a 30°	Alta	Superficies Moderadas	Movimientos en masa y Erosión superficial
> 30°	Muy Alta	Laderas Empinadas	Movimientos en masa y Caída de rocas

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:

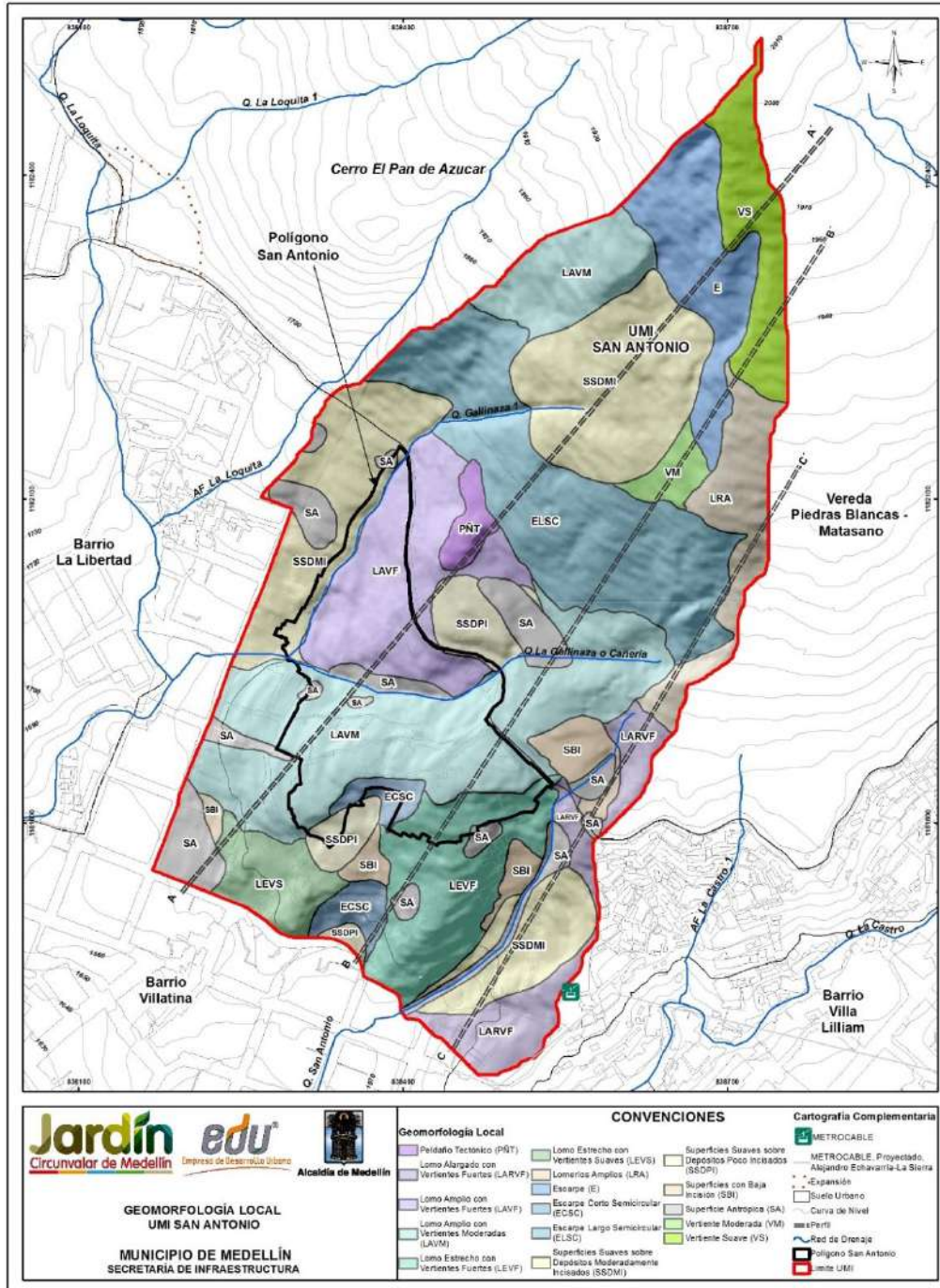
- ✓ Las zonas resaltadas en color verde son las de pendientes bajas (0° a 5°), correspondientes a planicies. Estas zonas se encuentran localizadas en la parte baja y media del polígono, están asociadas a rasgos tectónicos denominados como peldaños o descansos y también a zonas de explanación antrópica.
- ✓ 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 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.

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 16 unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los Numerales 5.2.1 a la 5.2.16 de este capítulo.

En el Mapa 12 se presentan las unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio y de la Figura 24 a la Figura 26 se muestran los perfiles esquemáticos de las unidades más sobresalientes.



Mapa 11. Análisis de pendientes en la UMI San Antonio
(09_SATPendientes_Medellin_C y 09_SATPendientes_Medellin_T)



Mapa 12. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio
(10_SATGeomorfologiaLocal_Medellin_C y 10_SATGeomorfologiaLocal_Medellin_T)

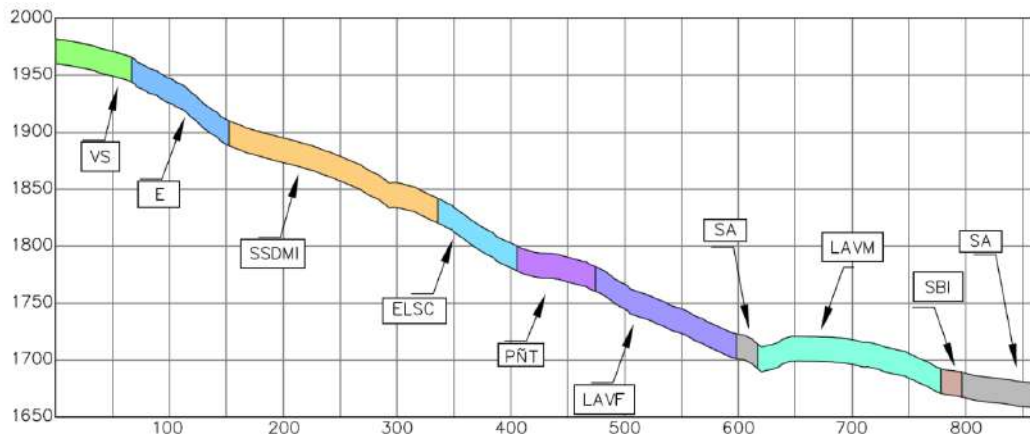


Figura 24. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas

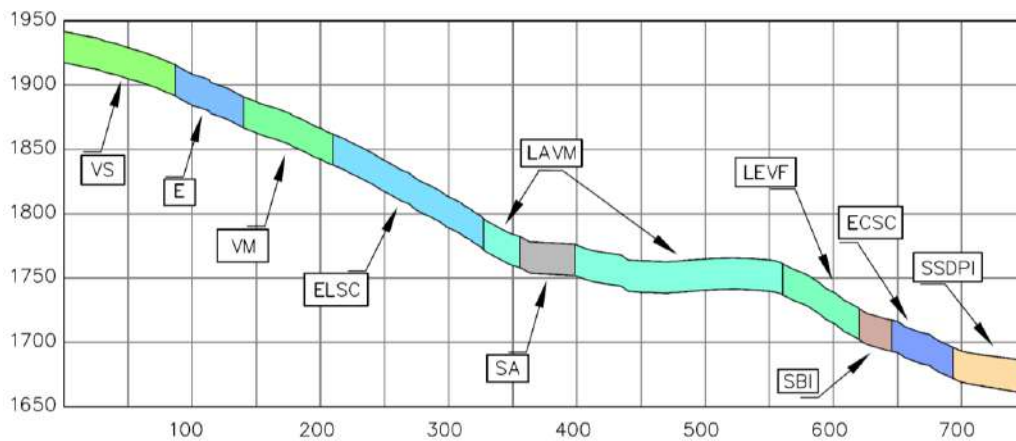


Figura 25. Perfil B-B' de unidades geomorfológicas

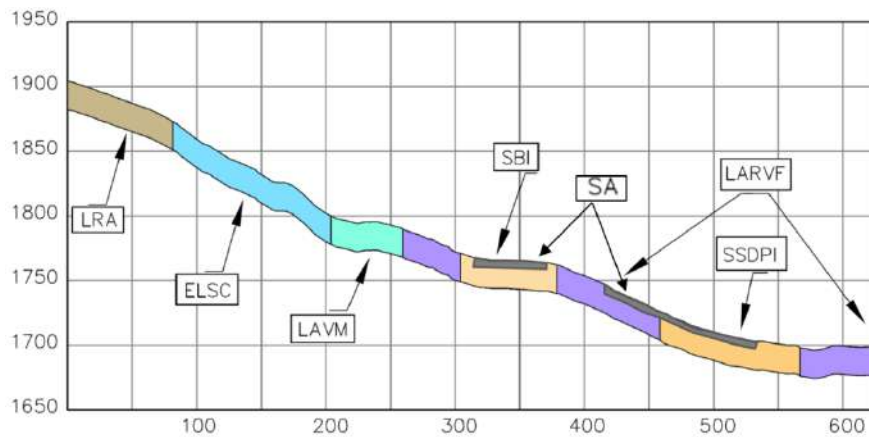


Figura 26. Perfil C-C' de unidades geomorfológicas

5.2.1 Unidad Peldaño Tectónico PÑT

Se encuentran en la parte media de la UMI, entre las cotas 1808-1782 msnm. Presenta forma de óvalo alargado y estrecho de topes suaves continuos con pendientes menores de 5°. Se encuentra limitado por la unidad de Escarpe Largo Semicircular y lineamientos observados en la cartografía y las fotografías aérea. El relieve que moldea este tipo de geformas limitadas y asociadas a estructuras geológicas es denominado “Escalonado” (Superficies suaves o peldaños limitados por escarpes y/o estructuras geológicas como lineamientos o fallas). Litológicamente se desarrolla sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue cartografiada mediante el análisis del mapa de pendientes y la fotointerpretación.

5.2.2 Unidad Lomo Alargado con Vertientes Fuertes LARVF

Se localiza en la parte baja de la UMI, sobre la margen izquierda de la quebrada San Antonio, lugar donde se está construyendo la nueva línea del metro cable Alejandro Echavarría.

Esta unidad se caracteriza por presentar topes 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 pendientes moderadas (menores de 15°) con formas cóncavas debido a que han ocurrido allí procesos de inestabilidad (movimientos en masa), en tanto que la otra vertiente se caracteriza por ser recta con pendientes entre 15° y 30°.

Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño (Figura 27).



Figura 27. Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF y Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes-LEVFM

5.2.3 Unidad Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF

Se localiza entre las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1, 50% del polígono San Antonio se ubica sobre esta unidad. Esta geoforma se encuentra limitada en la parte superior por rasgos estructurales como lineamientos con dirección NW y la unidad de Peldaño Tectónico-PÑT.

Esta unidad se caracteriza por presentar topes convexos sobre el cual se tienen dispuestas superficies antrópicas, vertientes escarpadas irregulares con inclinaciones mayores de 30°. Litológicamente se desarrolla sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 28).

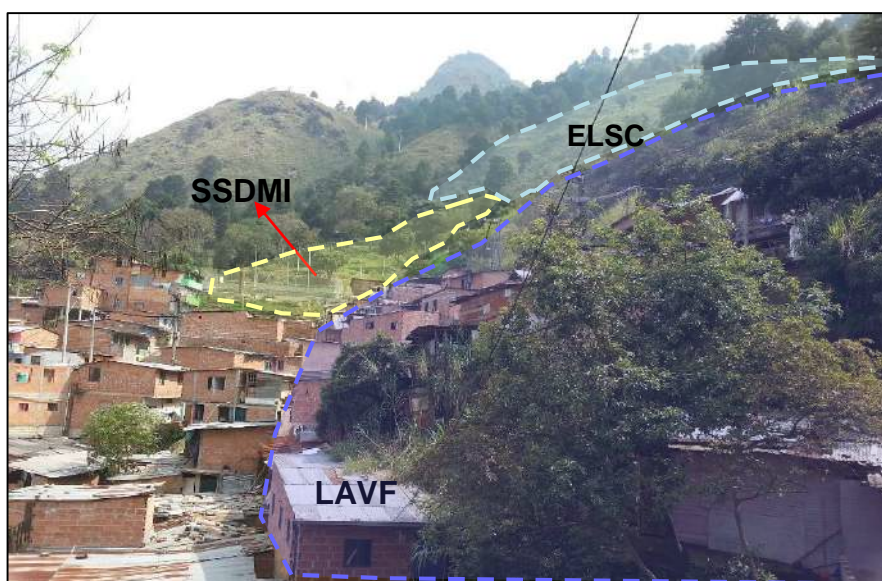


Figura 28. Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes-LAVF, al fondo campo Santo Villatina (Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados-SSDMI) y en la parte superior la unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC

5.2.4 Unidad Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM

Se localiza sobre la margen izquierda de la Quebrada La Gallinaza y en la parte baja y media de la UMI (sur), sobre la que se desarrolla el 50% del polígono. Limita en la parte superior por la unidad de Escarpes Largos Semicirculares (ELSC) y Lomeríos Amplios, en la parte inferior por un conjunto de Lomos, Escarpes Cortos y Superficies con Baja Incisión.

Se caracteriza por presentar topes suaves con pendientes menores de 15°, laderas cortas e irregulares con pendientes moderadas. Presenta cicatrices de deslizamiento denotadas como geoformas escarpadas, es la unidad geomorfológica de mayor longitud (500 m) dentro de la UMI con dirección hacia el eje fluvial de la Quebrada La Gallinaza (también conocida como Cañería) cuyo sentido preferencial es E-W.

Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín y superficies antrópicas en su parte media (Figura 29).



Figura 29. Lomo Amplio con Vertientes Moderadas-LAVM.

5.2.5 Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF

Se encuentra localizado en la parte baja de la UMI. Esta unidad geomorfológica presenta rasgos morfotectónicos evidenciados en cambios de la tendencia NS a NE. Presenta topes agudos estrechos con pendientes entre 15° y 30°, vertientes cóncavas escarpadas con pendientes mayores de 30°, como se ilustra en la Figura 27 y en la Figura 31. Esta unidad se desarrolla litológicamente sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

5.2.6 Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Suaves LEVS

Se localiza en la parte baja de la UMI (al sur), entre la unidad de Lomos Amplios con Vertientes Moderadas y Lomos Estrechos con Vertientes Fuertes. 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 31. Esta geoforma tiene una tendencia NE. Litológicamente se desarrolla sobre materiales residuales de cuerpos graníticos asociados al Batolito Antioqueño y las Dunitas de Medellín.

5.2.7 Unidad Lomeríos Amplios LRA

Se encuentran localizados en la parte alta de la UMI hacia el extremo oriental donde se tiene el límite con la UMI del Polígono Esfuerzos de Paz. Esta unidad geomorfológica de lomos se caracteriza por presentar pendientes moderadas a altas, con inclinaciones menores que 30°, topes amplias onduladas y convexas y vertientes cortas con moderado

grado de incisión (Figura 30). Litológicamente se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

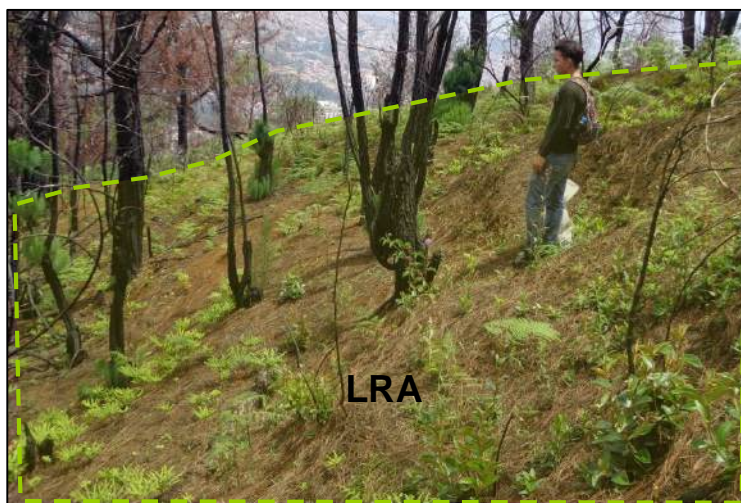


Figura 30. Unidad de Lomeríos Amplios-LRA

5.2.8 Unidad Escarpe Corto Semicircular ECSC

Esta unidad se encuentra distribuida en la parte baja del polígono, limitado 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 31). Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

5.2.9 Unidad Escarpe Largo Semicircular ELSC

Esta unidad se encuentra distribuida en la parte media de la UMI, limitada por unidades de Lomos y Superficies Modeladas en Depósitos como se muestra en la Figura 28 y en la Figura 32. 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.



Figura 31. Unidad de Escarpe Corto Semicircular-ECSC; Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados-SSDPI y Lomo Estrecho con Vertientes Suaves-LEVS



Figura 32. Unidad de Escarpes Largos Semicirculares-ELSC

5.2.10 Unidad Escarpe

Se encuentra localizado en la parte superior de la UMI. Esta geoforma conforma parte de lo que fue el deslizamiento de Villatina y las paredes rocosas, las cuales se encuentran entre las cotas 1988 msnm a 1932 msnm y 1836 msnm a 1778 msnm, respectivamente.

Se caracteriza por presentar pendientes muy escarpadas con ángulos mayores de 30°, desarrolladas sobre material rocoso altamente fracturado. Presenta paredes-frentes de roca de aproximadamente entre 200 m a 400 m de longitud y alturas de 100 m, con formas onduladas y semicirculares. En esta unidad geomorfológica se encuentra la cicatriz de deslizamiento de Villatina (Figura 33). Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.



Figura 33. Unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC sobre parte de la cicatriz del deslizamiento de Villatina y la unidad de Vertiente Moderada-VM

5.2.11 Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados

Localizada sobre ambas márgenes de la Quebrada La Gallinaza, donde actualmente se encuentra el Campo Santo de Villatina. Esta geoforma presenta forma ovalada, topos 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 del deslizamiento de Villatina como se ilustra en la Figura 34.



Figura 34. Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados-SSDMI sobre Campo Santo Villatina

5.2.12 Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados SSDPI

Localizadas en la parte baja y media de la UMI, limitados en la parte superior por unidades de Escarpe. Esta geofoma presenta forma ovalada, topes suaves con pendientes menores de 15° y laderas cortas poco incisadas. Son el resultado de procesos de inestabilidad como movimientos en masa generados en la unidad geomorfológica de escarpes como se ilustra en la Figura 31. Litológicamente se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros.

5.2.13 Unidad Superficies con Baja Incisión SBI

Localizada en la parte baja de la UMI. Presenta topes suaves con pendientes menores de 5°, sus 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 como se ilustra en la Figura 36.

5.2.14 Unidad Superficie Antrópica SA

Localizada en la parte media y baja de la zona de estudio y sobre ambas márgenes de la quebrada San Antonio (Figura 35). Corresponde a superficies explanadas con formas irregulares modificadas antrópicamente, con pendientes suaves entre 0° y 5°. Una de ellas conforma parte del Parque Las Tinajas del Jardín Circunvalar (Figura 36).

5.2.15 Unidad Vertiente Moderada VM

Localizada en la parte alta de la UMI, hacia el norte en los límites con la UMI de Esfuerzos de Paz. Limitada por la unidad de Lomeríos, Superficies en Depósitos y la unidad de Escarpes como se ilustra en la Figura 33. Se caracteriza por tener pendientes moderadas e irregulares. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

5.2.16 Unidad Vertiente Suave VS

Localizada en la parte alta de la UMI, hacia el norte en los límites con la UMI de Esfuerzos de Paz. Se caracteriza por tener pendientes de suaves rectas y convexas como se ilustra en la Figura 37. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.



Figura 35. Unidad de Superficie Antrópica SA en la Quebrada San Antonio

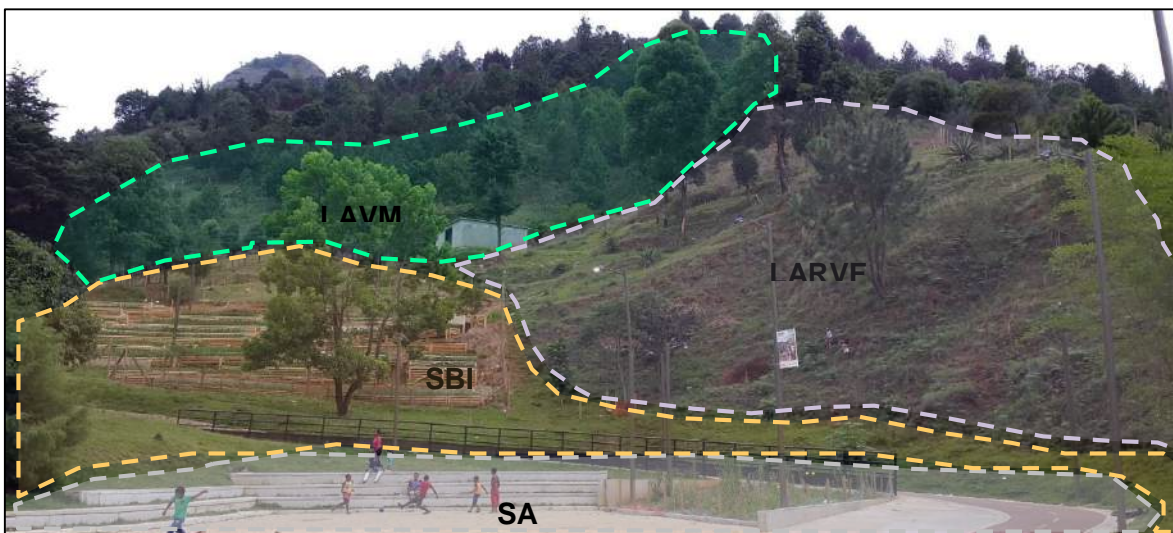




Figura 36. Unidad de Superficie Antrópica-SA, Superficies con Baja Incisión-SBI, Lomo Alargado con Vertientes Fuertes-LARVF, Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM



Figura 37. Unidad de Vertiente Suave VS

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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

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 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). 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 38 y la Figura 39 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%

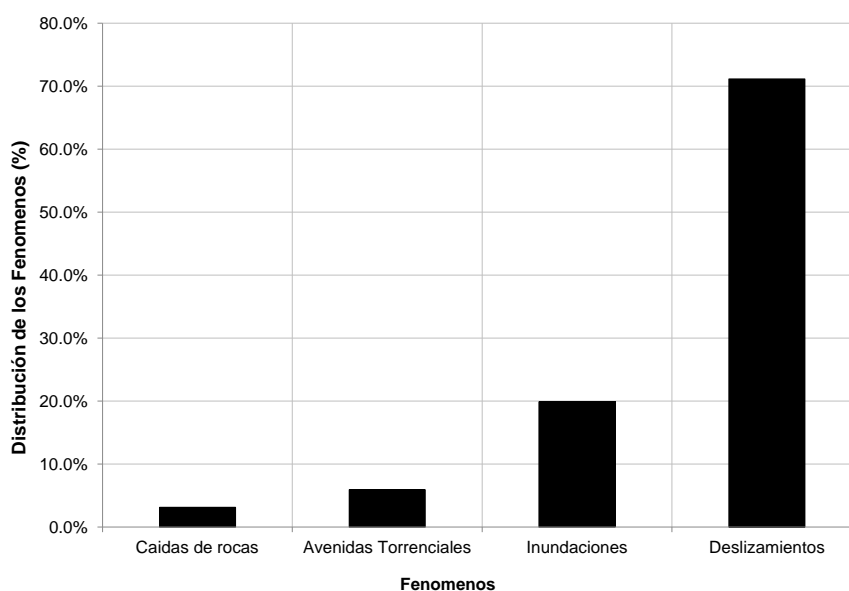


Figura 38. Distribución de los fenómenos

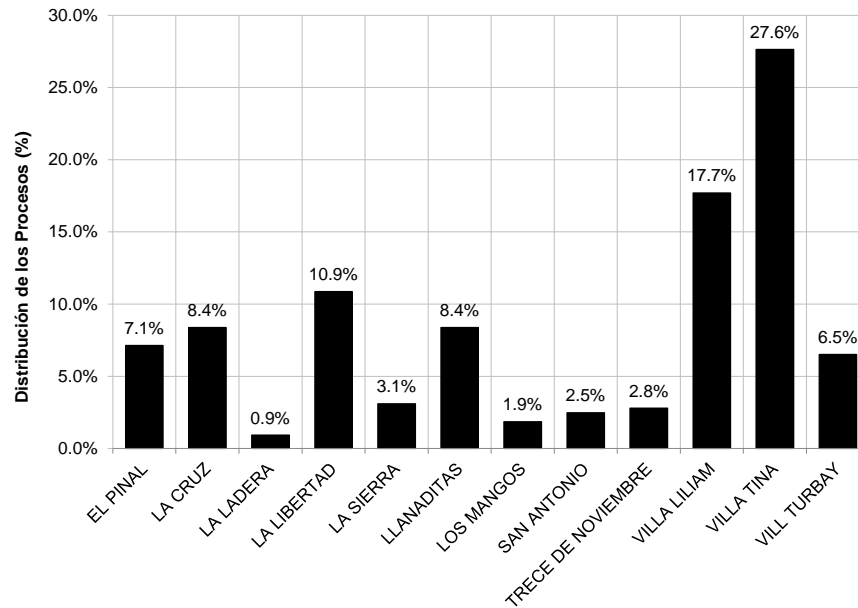


Figura 39. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos

Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes (Figura 38) en la zona de estudio, 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 39 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villatina, Villa Liliam y La Libertad. Respecto a los barrios del Proyecto Barrios Sostenibles, el 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.



	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
---	--	---

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	2010	Reptaciones y movimientos lentos
Enciso - Los Mangos	6 de junio de 2011	Deslizamiento por redes de servicios públicos
Villa Turbay - Las Miras	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 injerencia 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 40). 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 40. 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 San Antonio, 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.

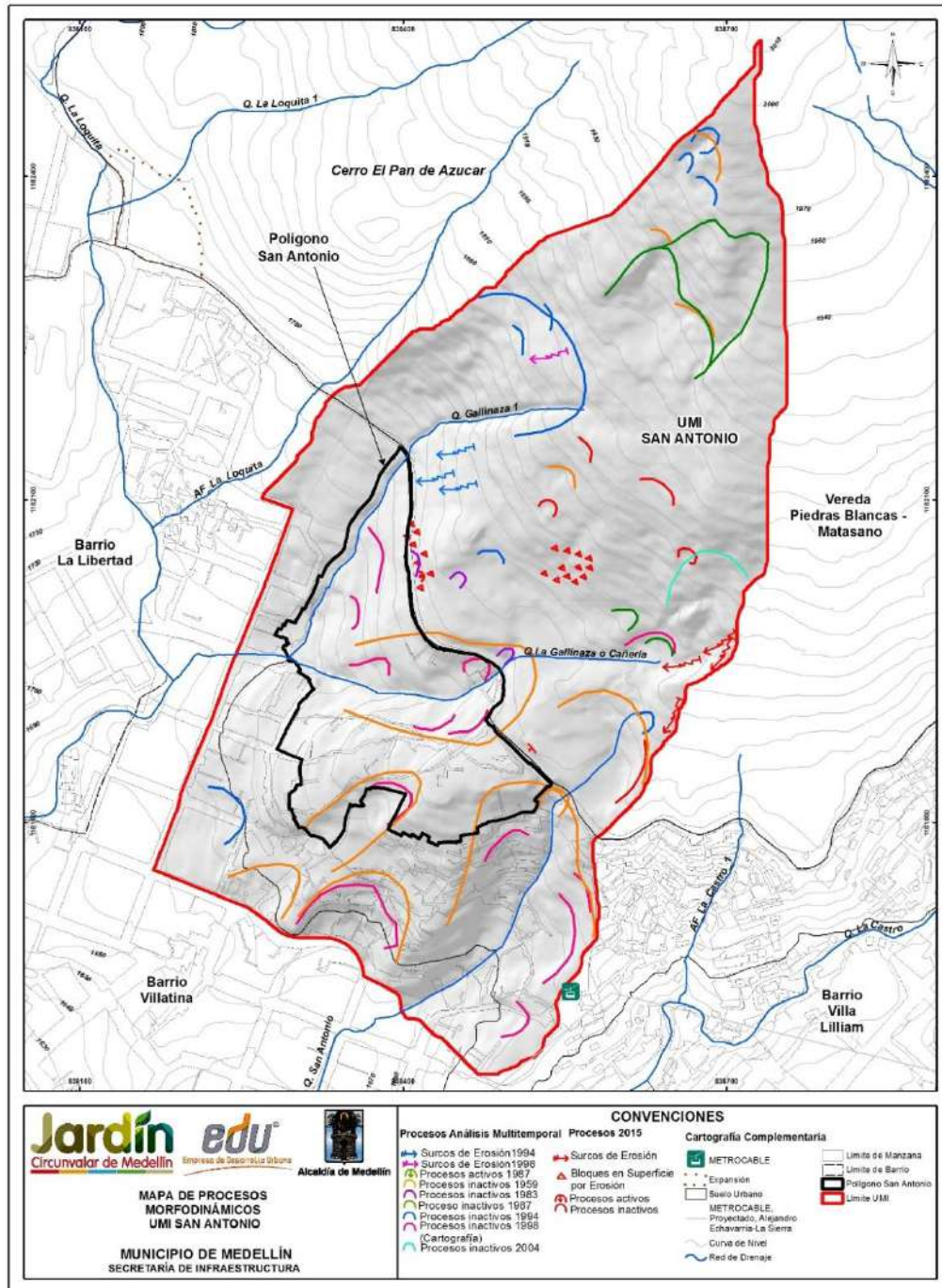
Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1976	FD-87	3	29-35	1 : 10.000
1981-1983	R-898	1	261-271	1 : 5.160
1985	Geovial-2	6	31-34	1 : 3.200

Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1987	Geovial-18	19	232-240	1 : 5.300
1987	Geovial-18	20	212-222	1 : 4.600
1987	Geovial-18	21	243-246	1 : 5.200
1987	Geovial-18	22	252-257	1 : 5.300
1994	Geovial 65/3	32	156-160	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	33	98-109	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	34	130-141	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
2004	AE-182	2	726-729	1 : 10.700
2004	AE-183	3	985-987	1 : 19.900

En el Mapa 13 se muestran los procesos morfodinámicos de la UMI San Antonio, los cuales fueron definidos con base en la fotointerpretación de 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 San Antonio
 (11_SATProcesosMorfodinamicos_Medellin_C y
 11_SATProcesosMorfodinamicos_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, y bloques en superficie por erosión. Aunque la mayoría de los procesos son inactivos, se presentan procesos activos en los años 1987 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 en mayor proporción en el área comprendida entre la parte media y alta de la respectiva UMI. Estos deslizamientos 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 Dunitas de Medellín. También se dan desgarres con dimensiones entre 3 m y 15 m y escarpes de 2 m de alto, sobre suelo residual.

Uno de los procesos más importantes de la UMI San Antonio, y que es necesario resaltar, es el deslizamiento de Villatina ocurrido en 1987 (Figura 40 y Figura 41). Por su magnitud y su grado de afectación a la comunidad, ha generado una nueva visión en cuanto a la realización de estudios de amenaza y riesgo geológico.

El deslizamiento de Villatina ocurrió el día 27 de septiembre de 1987 en la parte más alta de la UMI San Antonio. El movimiento fue clasificado de tipo planar y se originó en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, con la particularidad que en esta zona, dicho horizonte presenta gran cantidad de suelo residual mezclado, además de bloques de roca moderadamente meteorizados y muy fracturados. El material presente, además de las altas pendientes y las evidencias de cizallamiento hicieron de esta zona un área altamente susceptible a los deslizamientos (Hermelín, 2005).

Según Bustamante (1988) en Hermelín (2005), la zona de desprendimiento del material tiene dimensiones aproximadas de 52 m de ancho y 60 m de largo en dirección de la pendiente, con escarpes entre 5 m y 8 m de altura. Dichas medidas corresponden con un tramo de la cicatriz de deslizamiento identificada en campo.

Del mismo modo, Bustamante (1988) en Hermelín (2005) plantea una división del deslizamiento en tres zonas:

- I. Zona comprendida entre las cotas 1960 m y 1900 m. Corresponde a la zona de acumulación primaria después del desprendimiento.
- II. Zona comprendida entre las cotas 1900 m y 1750 m. Corresponde a la zona por donde el material desprendido se desplazó. La pendiente en esta zona es fuerte y el recubrimiento por el material no supera los 2 m. En este punto se presenta una vaguada que ayudó a canalizar el material y fue por ello que su dirección cambió.
- III. Zona comprendida entre las cotas 1750 m y 1710 m. Corresponde al área habitada y donde finalmente el material se detuvo. Su volumen ha sido estimado en 6.000 m³.



Figura 41. Cicatriz del deslizamiento de Villatina identificado en campo. (A) Vista superior y (B) vista inferior

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en la unidad geomorfológica denominada como Escarpe Largo Semicircular ELSC, la cual se encuentra hacia la parte media de la UMI 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 42).

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 el desprendimiento.



Figura 42. Escarpes de roca en la media de la UMI 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 hacia los límites norte y oriental de la UMI, sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín, con aproximadamente 30 cm de ancho, 50 cm de profundidad y cuya longitud es variable.

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 56). Los bloques en superficie se encuentran en zonas de la UMI con pendientes fuertes a moderadas que corresponden a las unidades geomorfológicas Escarpe Largo Semicircular ELSC y Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM (Figura 42).



Figura 43. Erosión superficial (A) Surcos y (B) erosión en montículos

Los desgarres son procesos igualmente comunes en toda la UMI, se presentan sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín (Figura 44). En general, dan lugar a escarpes no mayores de 2 m de altura, aunque pueden tener hasta 15 m de ancho y 5 m de largo. En ocasiones pueden incluso presentar depósitos asociados.



Figura 44. Desgarre cerca de la vía principal de San Antonio

En lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI San Antonio, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas en las márgenes de los drenajes, los cuales pueden estar asociados a la dinámica del cauce de las Quebradas La Gallinaza y San Antonio.

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). 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. Del sistema de fallas con dirección NE, las principales trazas son La Chapa y Santa Elena (Consortio Microzonificación, 2006).

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.



Tabla 6. Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consortio 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 San Antonio se encontraron estructuras tales como lineamientos geológicos y discontinuidades, las cuales se presentan en el Mapa 14.

Los lineamientos se identificaron a través de los análisis geomorfológicos y foteogeológicos, encontrando tendencias NW-SE y NE-SW, en donde la primera 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

relaciona con la dirección del contacto Anfibolitas-Dunitas de Medellín (falla contacto Anfibolitas-Dunitas), mientras que la segunda se relaciona con zonas de cizalla reportadas en la vía a la Vereda El Plan, y con diaclasas reportadas en la vereda Pericos, ambas ubicadas en el municipio de Envigado. Además, cabe resaltar la posible relación de estos lineamientos geológicos con las evidencias de falla encontradas en los recorridos de campo y en las perforaciones, lo cual lleva a concluir que las Dunitas de la zona de estudio están cizalladas.

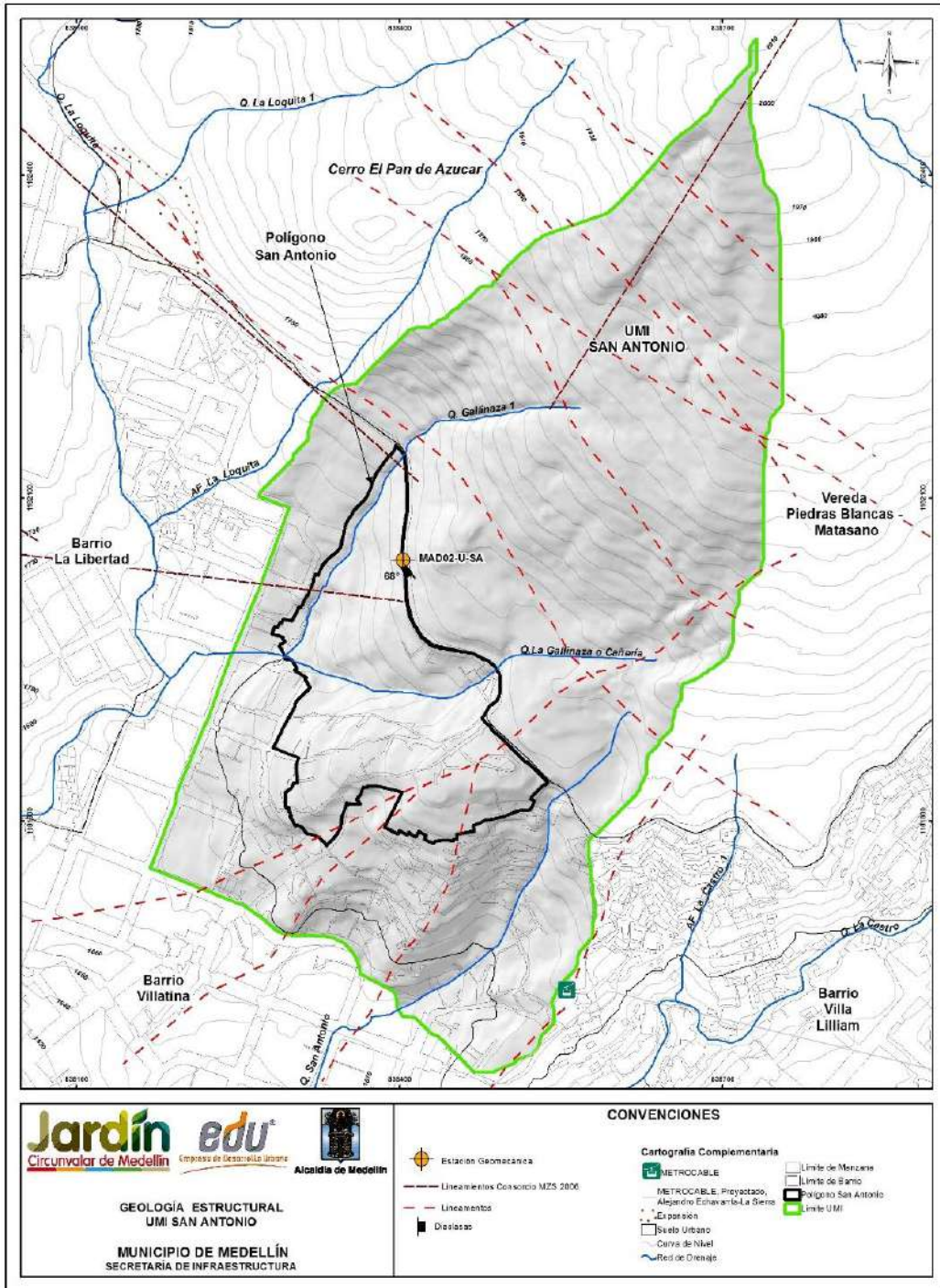
Para la caracterización de los afloramientos del macizo rocoso evidenciado en el Polígono San Antonio, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas los afloramientos.

El análisis de discontinuidades, inició con el levantamiento manual en campo de los planos de discontinuidades mediante el establecimiento de una estación geomecánica, en la cual se tomaron las respectivas medidas de orientación y buzamiento de cada una las discontinuidades.

En la estación geomecánica al interior de la UMI San Antonio se tomaron datos de rumbo y buzamiento para los planos de discontinuidad, bajo la notación buzamiento/dirección de buzamiento. En total se recolectaron 14 datos, como se indica en la Tabla 7. En el Mapa 14 también se presenta la localización de la estación geomecánica.

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

Estación	Coordenadas		Número de Datos
	Norte	Este	
MAD02-U-SA	1182030	838410	14



Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI San Antonio
(12_SATGeologiaEstructural_Medellin_C y 12_SATGeologiaEstructural_Medellin_T)

La Figura 45 presenta el diagrama de polos y la Figura 46 el diagrama de rosas, obtenidos con los datos de las discontinuidades tomadas en la Estación Geomecánica MAD02-U-SA. Se pueden observar concentraciones de polos que permiten definir, en principio, una tendencia (familia) principal, con las características que se muestran en la Tabla 8.

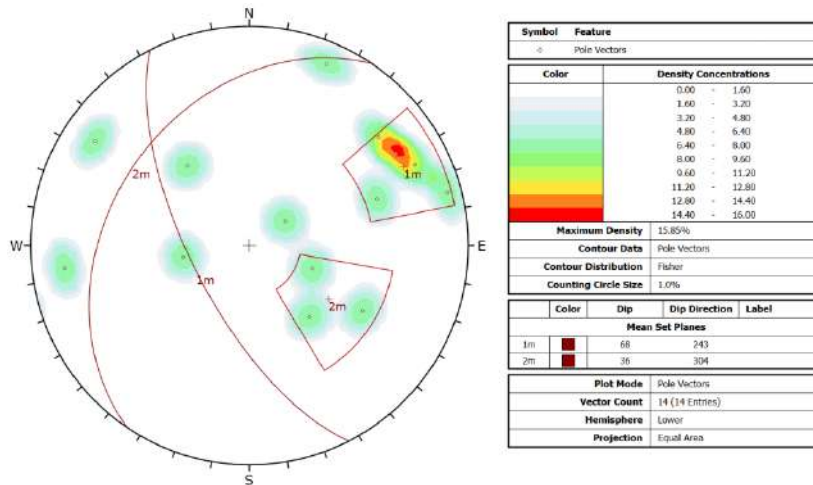


Figura 45. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

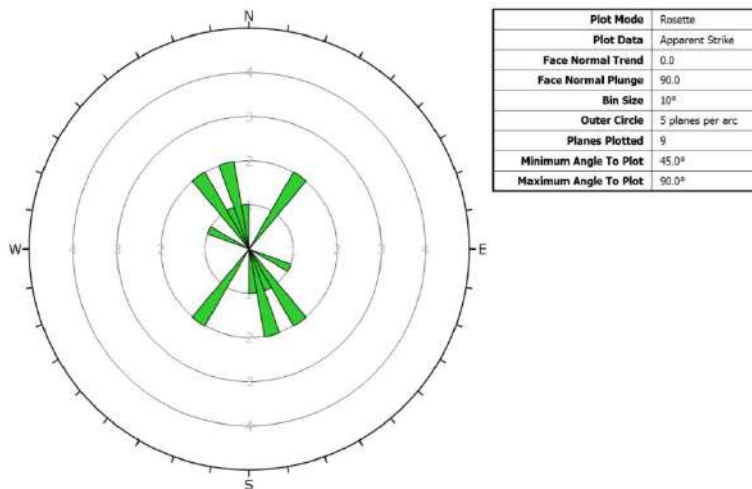


Figura 46. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

Tabla 8. Familia de discontinuidad considerando todos los datos

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	68°/243°	N27°W/68°SW	8.0 – 16.0
2	36°/304°	N34°E/36°NW	1.6 – 8.0

Los resultados obtenidos por medio del análisis estructural indican que se identifican dos familia de diaclasas con disposición N27°W/68°SW y N34°E/36°NW (Tabla 8). La Familia 2 (N34°E/36°NW) presenta direcciones en rumbo y buzamiento semejantes al sistema de diaclasas N50°E/45°E, según el reporte realizado por el Consorcio Microzonificación (2006) en la vereda Pericos en el municipio de Envigado.

6.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En este numeral se presenta el análisis cinemático basado en la geología estructural presentada anteriormente. Este análisis se llevó a cabo para el tramo de talud localizado en la margen derecha sobre la vía principal del Polígono San Antonio en sentido Esfuerzos de Paz – Pinares de Oriente, parte alta del polígono de estudio, tal como se muestra en la Figura 47. Se seleccionó este talud considerando que fue el único afloramiento de roca evidenciado en las diferentes visitas de campo efectuadas por parte del personal del Proyecto.

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. A partir de las características de relleno y alteración de las discontinuidades se definió un ángulo de fricción de 25° considerando que es el límite inferior, según la clasificación de Barton et al. (1974), para un índice de alteración de las discontinuidades (Ja) de 2, es decir, para “planos de discontinuidades ligeramente alterados que presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc.”.

Con los datos tomados en el tramo de análisis 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. Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran en la Figura 48.

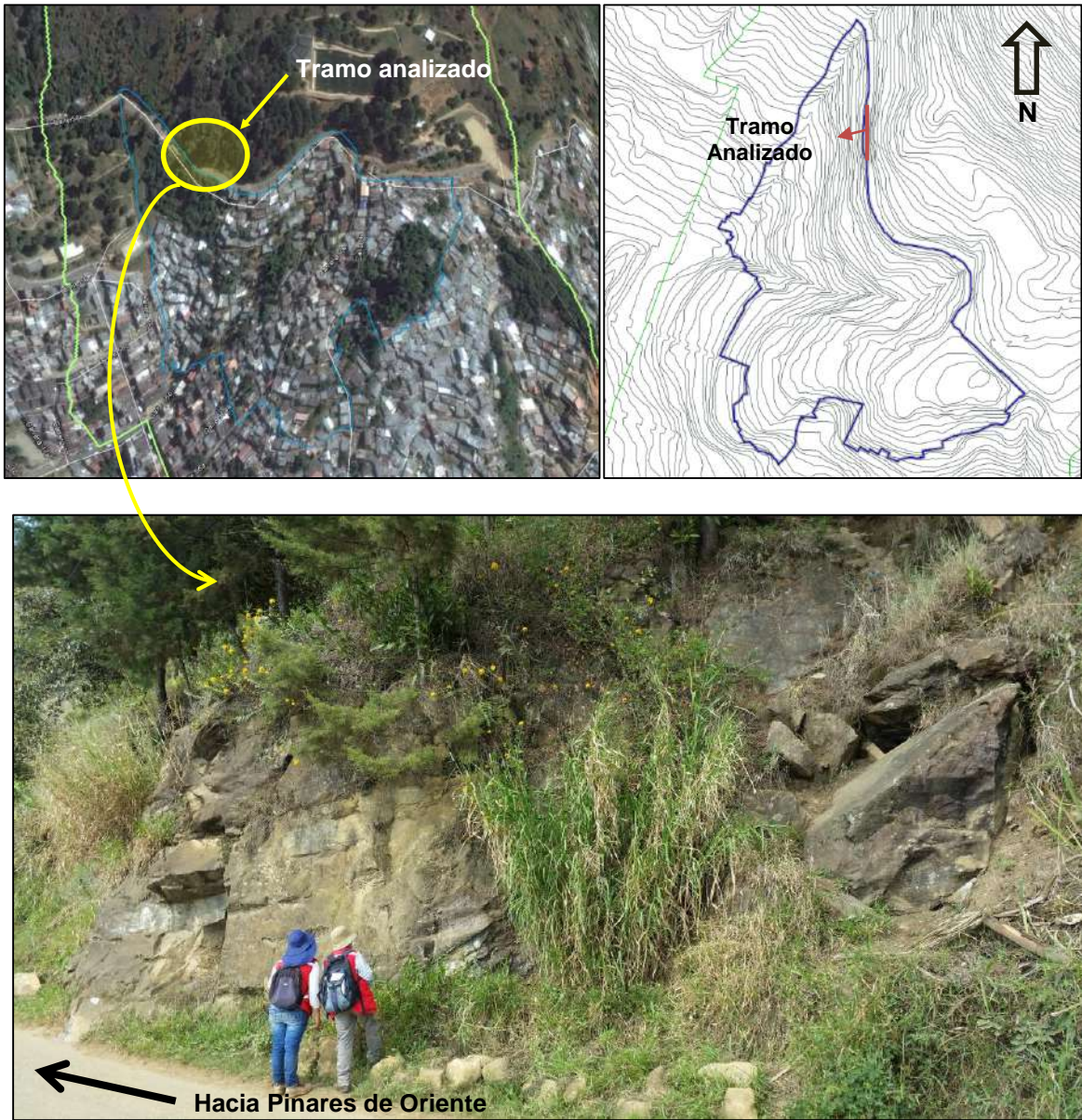


Figura 47. Tramo de talud analizado localizado en la parte alta del polígono San Antonio

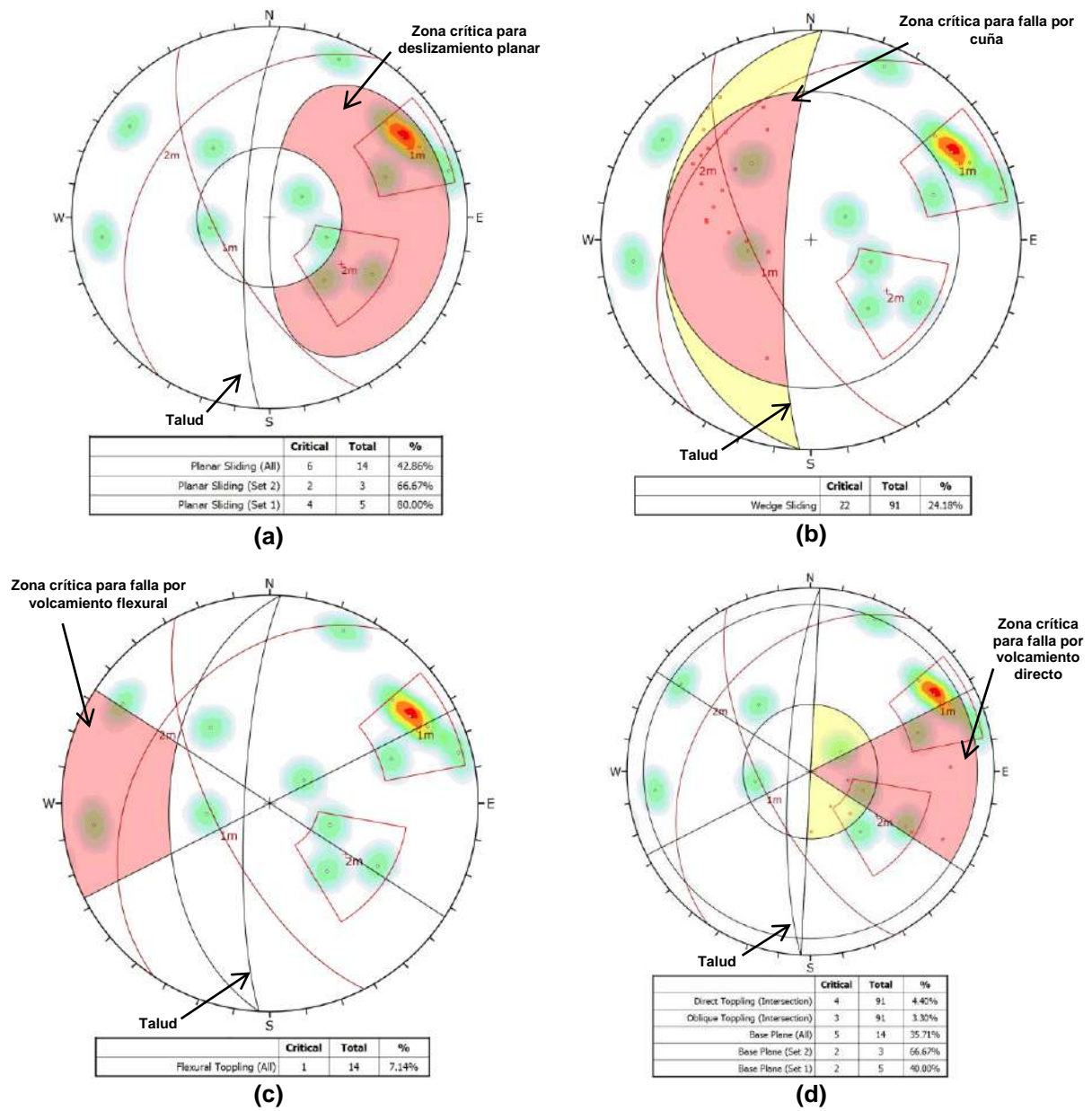


Figura 48. Análisis cinemático del tramo analizado. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

En la Tabla 9 se presentan las probabilidades de falla por cada mecanismo para las familias evidenciada

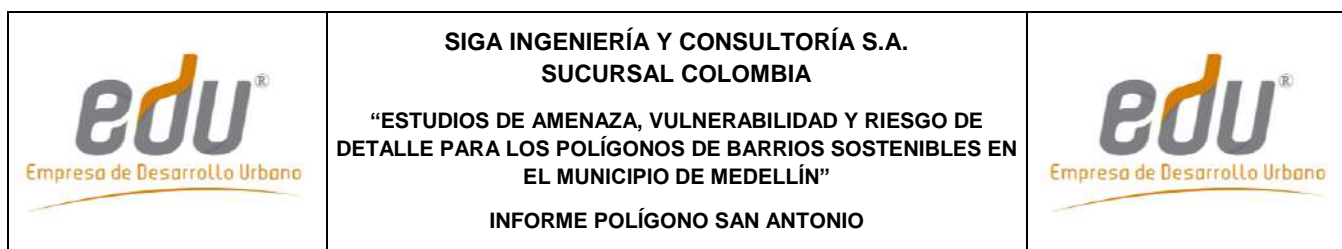


Tabla 9. Resumen resultados análisis cinemático

Familia	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base
Todo	42.86%	24.18%	7.14%	4.40%	3.30%	35.71%
1	80.00%	-	-	-	-	40.00%
2	66.67%	-	-	-	-	44.67%

Cabe resaltar que el análisis se realizó para un solo afloramiento evidenciado en las visitas de campo, con 14 datos que pudieron ser recolectados. Aunque se cuenta con pocos datos para el análisis, se identificaron dos disposiciones diferentes de lo que podrían ser consideradas familias para proceder con los análisis cinemáticos.

Como se puede observar en el resumen de resultados, el mecanismo de falla predominante en el tramo de talud analizado es el planar, con probabilidades de falla hasta de un 80% con los datos recolectados.

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 San Antonio.

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 resumen además en la Figura 49.

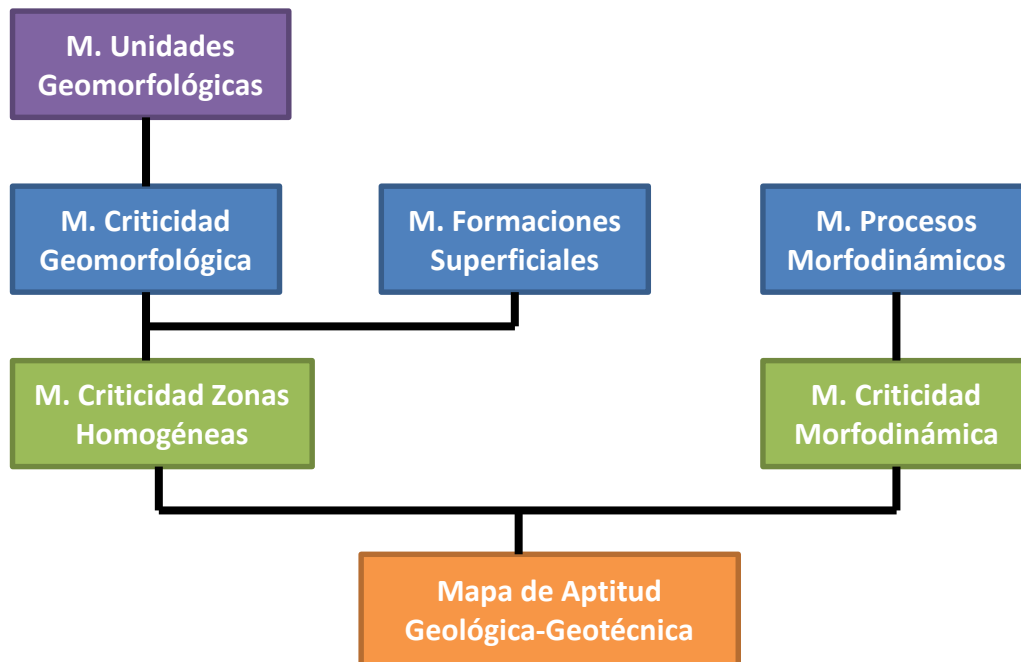


Figura 49. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica

Como se observa en la Figura 49, 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 10). 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 10. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel de Criticidad
Peldaño Tectónico	2
Escarpe	3
Escarpe Largo Semicircular	3
Escarpe Corto Semicircular	3
Lomo Alargado con Vertientes Fuertes	3
Lomo Amplio con Vertientes Moderadas	2
Lomo Amplio con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Suaves	2
Lomeríos Amplios	2
Superficie Antrópica	1
Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	2
Superficies Suaves sobre Depósitos Poco Incisados	1
Superficies con Baja Incisión	1
Vertiente Suave	2
Vertiente Moderada	2

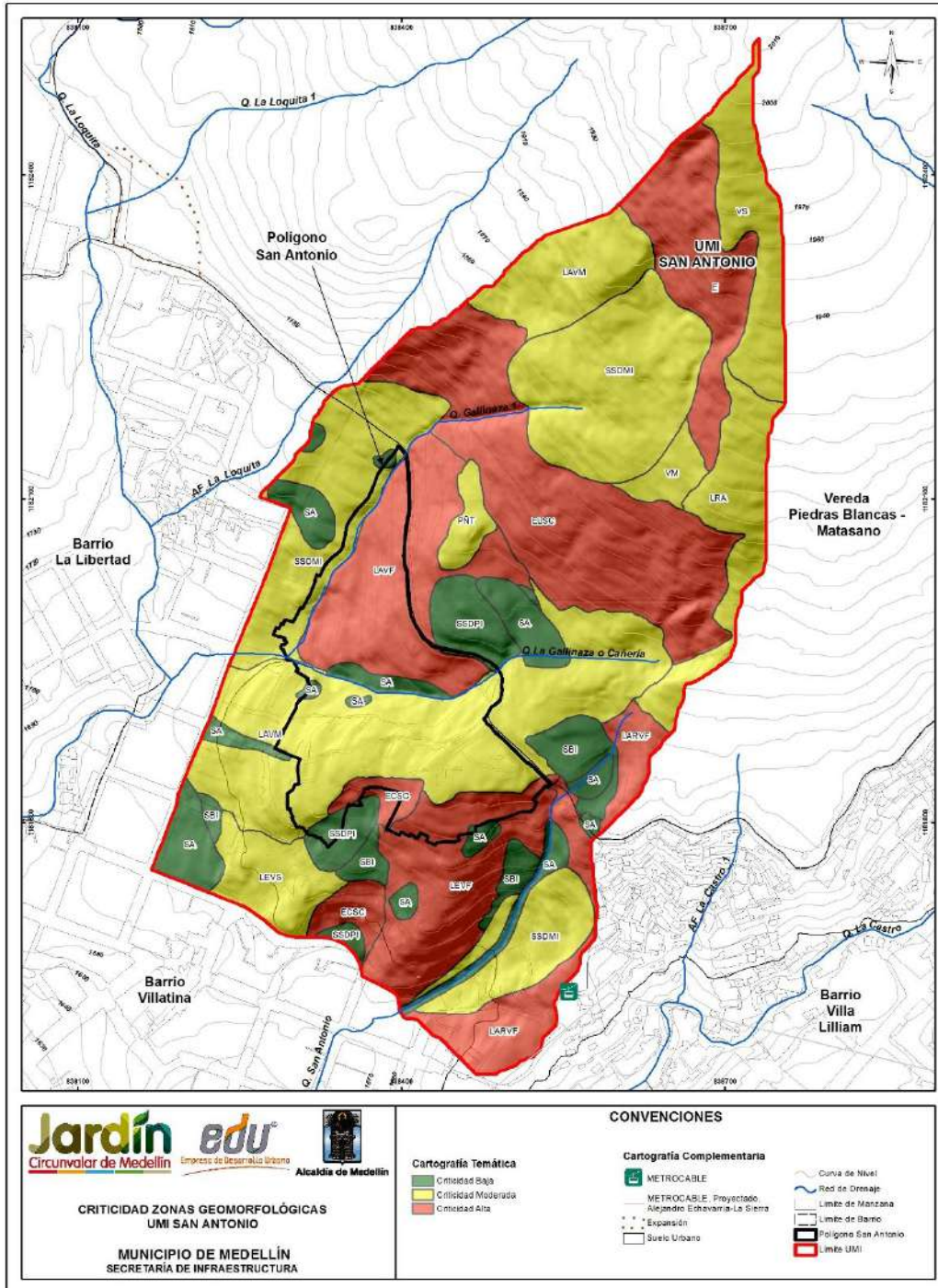
Finalmente, en el Mapa 15 se muestra el análisis de la criticidad geomorfológica obtenido para la UMI San Antonio.

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 11.

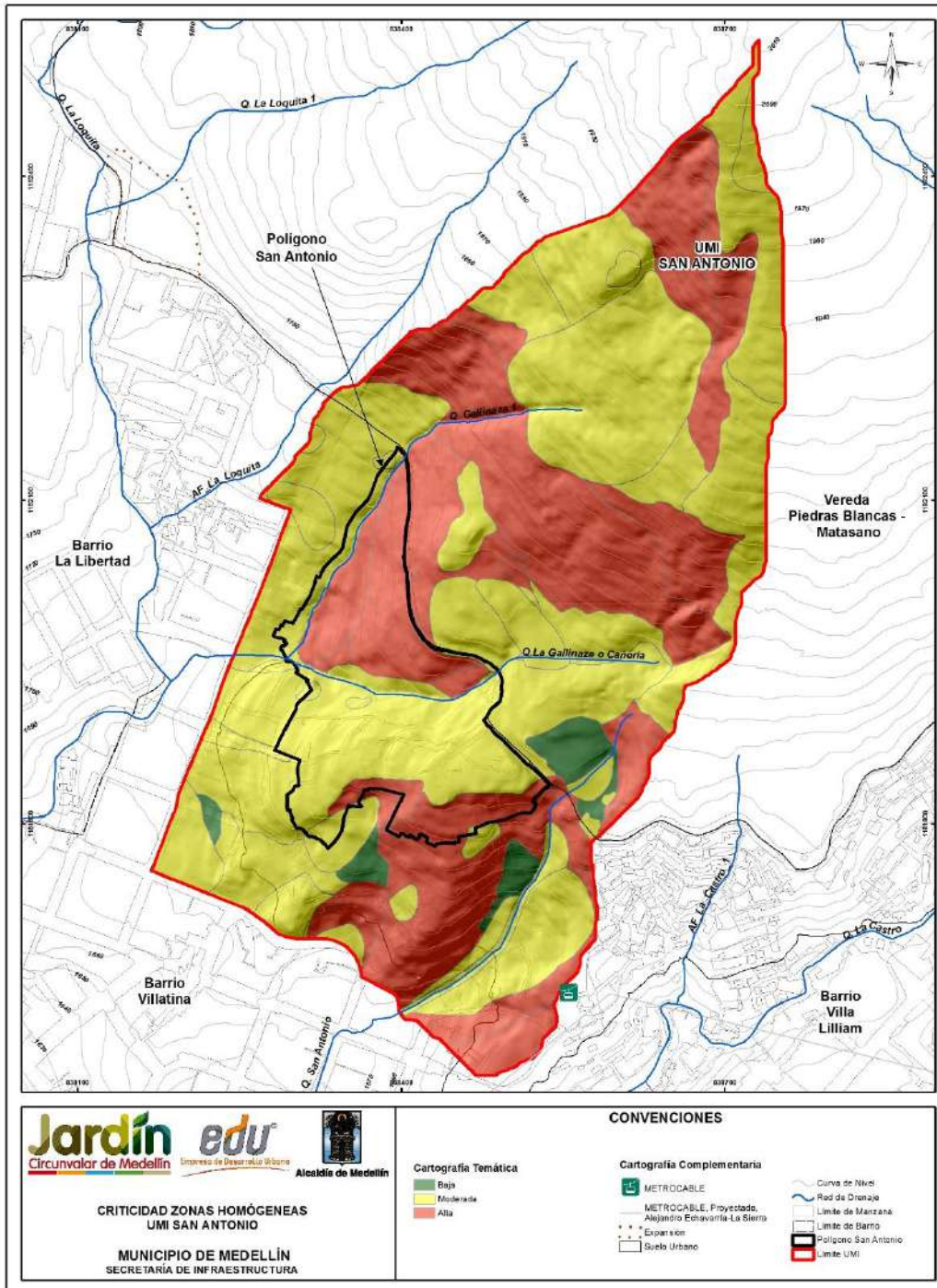
Tabla 11. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas

Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
1	Lleno Antrópico	2
	Depósitos de vertientes (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	1
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
2	Lleno Antrópico	3
	Depósitos de vertiente (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	2
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
3	Lleno Antrópico	3
	Depósitos de vertientes (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	3
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	3
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	3

Se genera entonces 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), como se muestra en el Mapa 16.



Mapa 15. Criticidad geomorfológica UMI San Antonio (SATCriticidadZonasGeomorfológicas_Medellin_C)



Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI San Antonio
(SATCriticidadZonasHomogéneas_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 con 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.

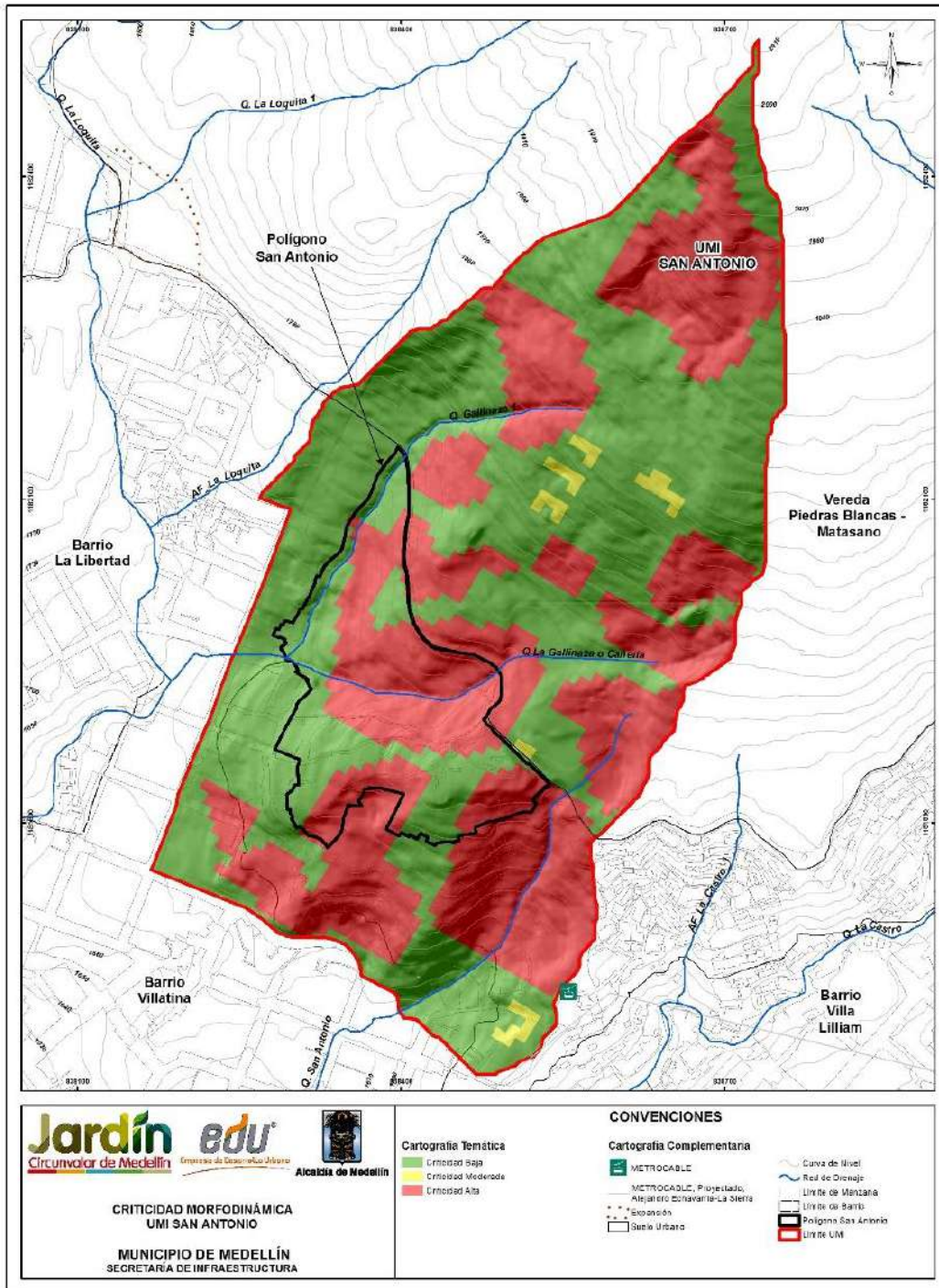
Luego de lo anterior, se hizo una zonificación de la zona de estudio de acuerdo con el grado de actividad de los procesos morfodinámicos, dividiéndose estos en activos e inactivos.

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 12.



Tabla 12. 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). El Mapa 17 presenta el análisis de la criticidad morfodinámica de la UMI San Antonio 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 17. Criticidad morfodinámica UMI San Antonio
 (SATCriticidadMorfodinámica_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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.

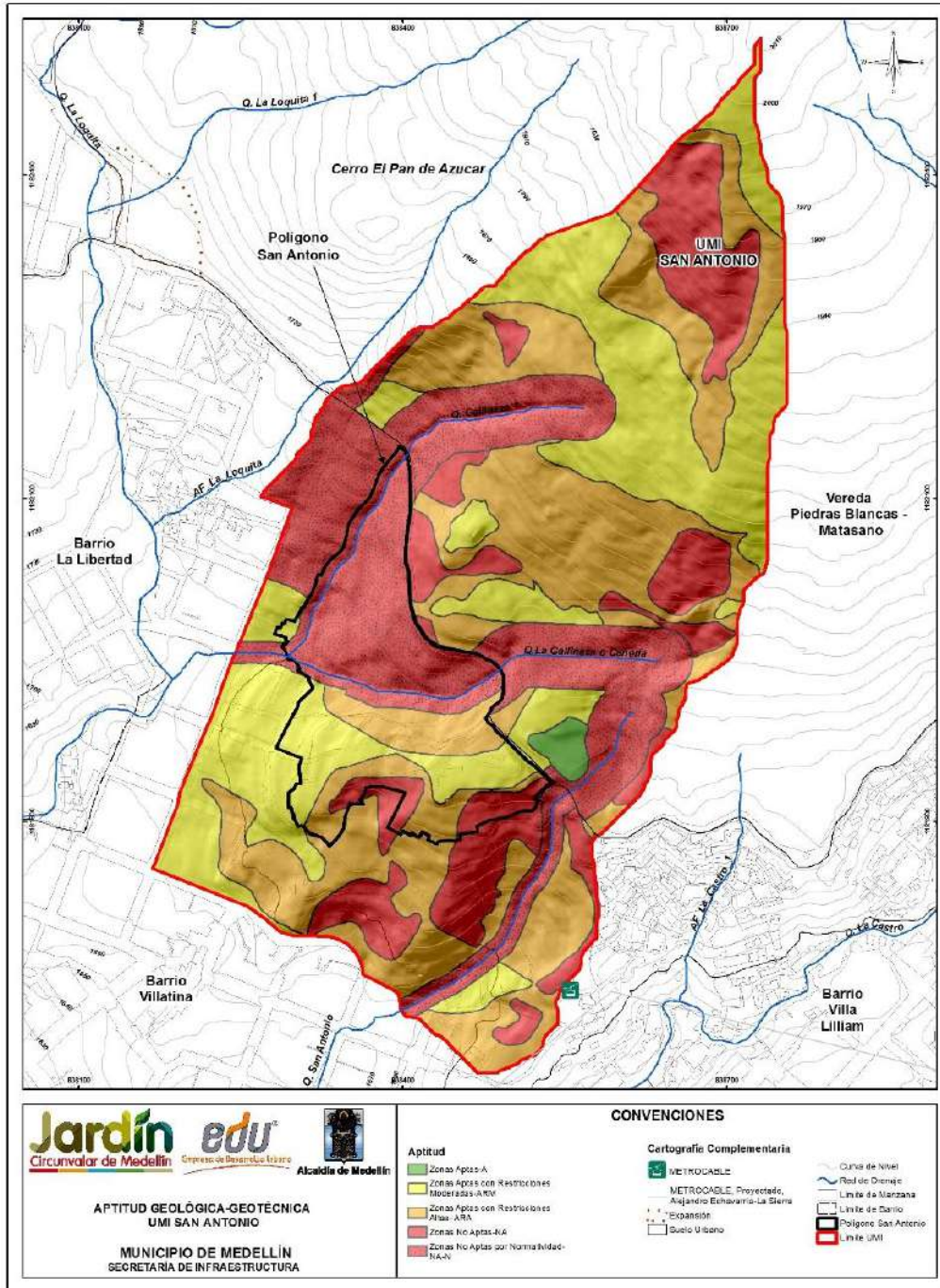
En el Mapa 18 se presenta la aptitud geológica de la UMI San Antonio obtenido con la metodología descrita anteriormente. Este mapa está refinado con base en lo observado en campo y teniendo en cuenta las áreas que por norma tengan restricción, como lo son las áreas protegidas y los retiros a corrientes de agua, según las especificaciones del POT (2014) del municipio de Medellín, como se muestran en el Mapa 19 y el Mapa 20.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

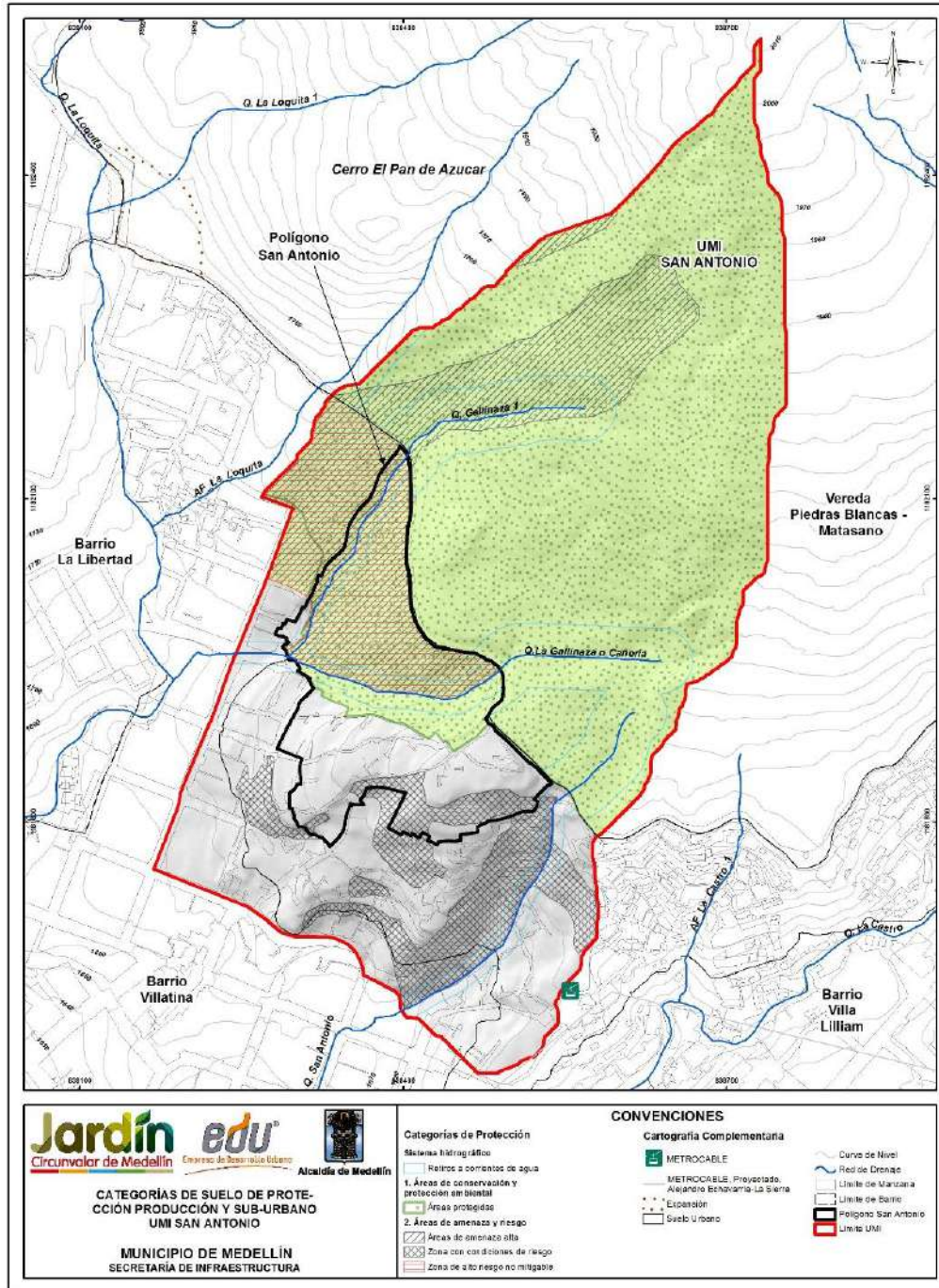
Además, se delimitaron otros retiros de quebradas que no han sido reportados en el Mapa de Estructura Ecológica del Acuerdo 48 de 2014, debido a la escala de trabajo.

De acuerdo con el mapa finalmente obtenido, se tienen entonces las siguientes observaciones:

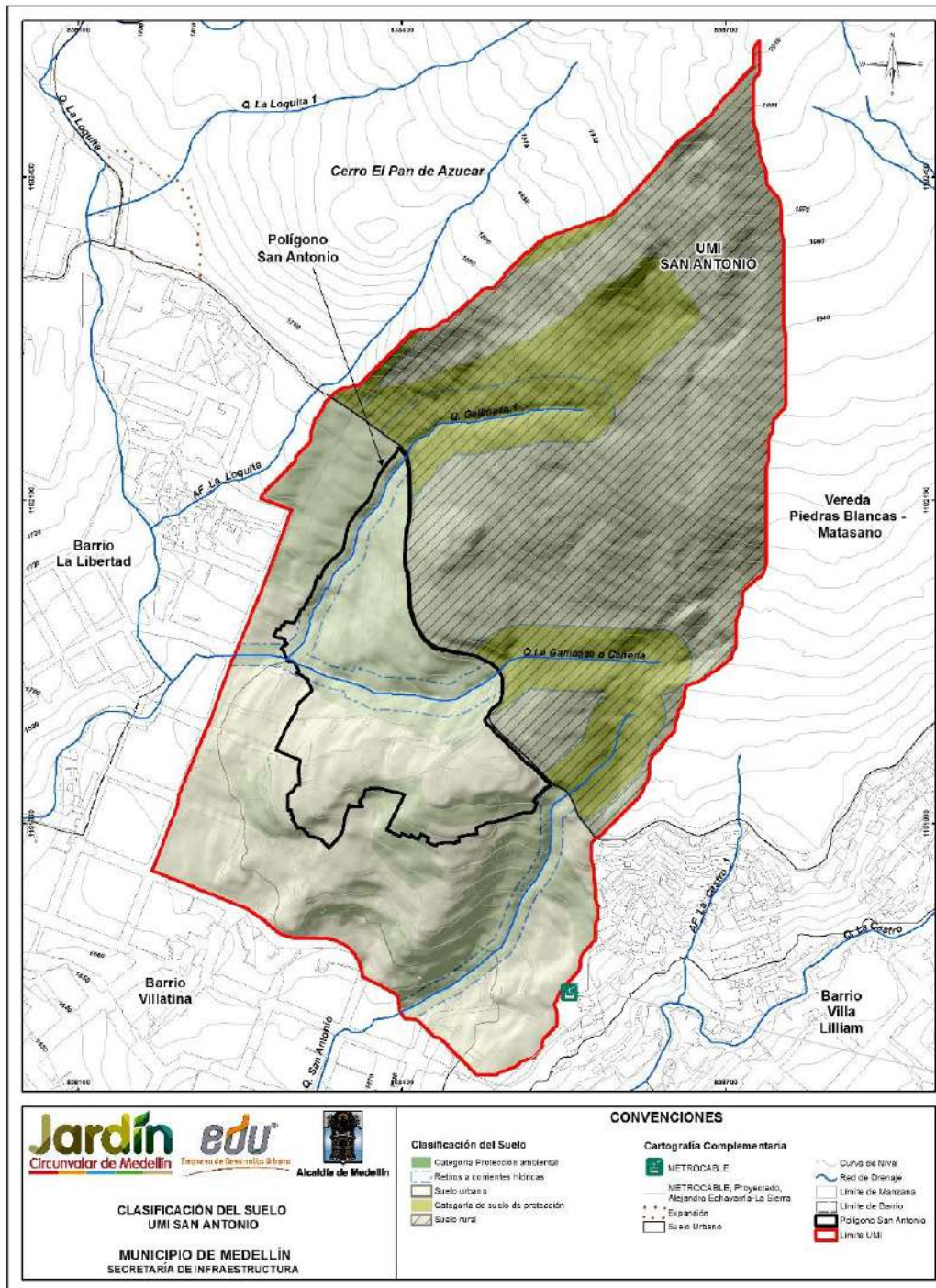
- ✓ Las Zonas Aptas con Restricciones Moderadas son las que más predominan en la UMI y corresponden al oriente del Polígono San Antonio.
- ✓ Las Zonas Aptas con Restricciones Altas se encuentran distribuidas en la parte alta, media y baja del área de interés y ocupan el occidente del polígono en estudio.
- ✓ Las Zonas No Aptas se distribuyen a lo largo de la UMI, en la parte alta media y baja. El Polígono San Antonio presenta algunas zonas de poca extensión e intermitentes.
- ✓ Las Zonas No Aptas por Normatividad se encuentran en la parte alta de la UMI, nororiente del sitio en estudio y en los alrededores de las quebradas La Gallinaza, La Gallinaza 1, la Quebrada San Antonio y la parte noroeste del polígono. Estas zonas corresponden a retiros de quebradas, y las zonas de riesgo no mitigable, definidas por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014, las cuales presentan un ancho de franja variable a lo largo de los drenajes, mostrando una franja de retiro de mayor ancho en cercanías a sus nacimientos (60 m) y de menor ancho hacia la parte baja de la UMI (20 m). Las zonas de riesgo no mitigable se asocian a la zona del desastre de Villatina, ya que según El numeral 5 del Artículo 60 del POT, se consideran suelos de protección y que tienen restringida la posibilidad de urbanizarse, las zonas que han sido objeto de declaratoria de calamidad pública o desastre.





Mapa 18. Aptitud Geológica UMI San Antonio
 (18_SATAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_C y
 18_SATAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T)



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



Mapa 20. Clasificación del suelo (POT, 2014)
(14_SATClasificaciondelSuelo_Medellin_C y 14_SATClasificaciondelSuelo_Medellin_CT)

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 50 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 50. Localización esquemática 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 51 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:

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

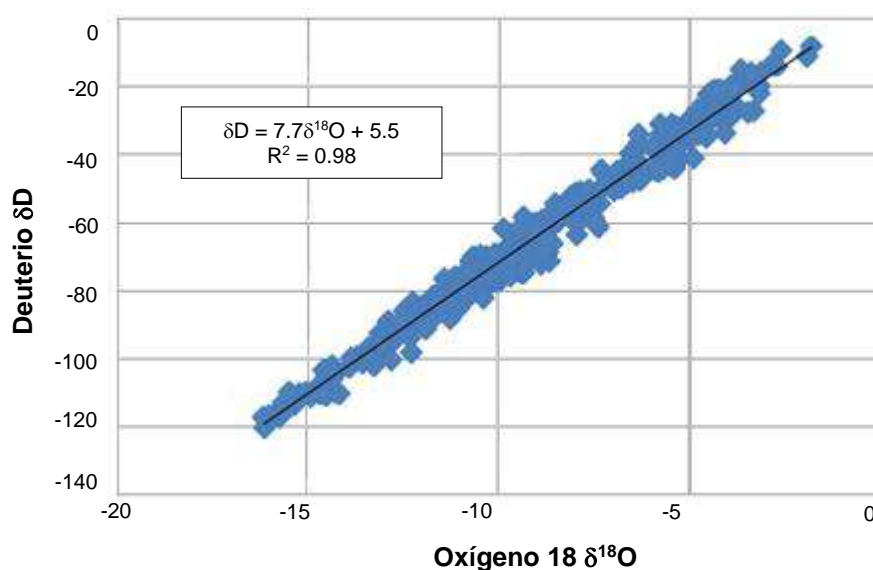


Figura 51. Recta Meteórica para Colombia

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada en la Figura 51 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

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 52). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

Específicamente en la Tabla 13 y en la Tabla 14 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 53 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 51 vs. Figura 53). 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 52. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio

Tabla 13. 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



 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 13. 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 14. 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	Observaciones
EDU-09	03/07/15	838772.26	1182739.33	1950	-78.7	-10.96	Plan Pan de Azúcar
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	

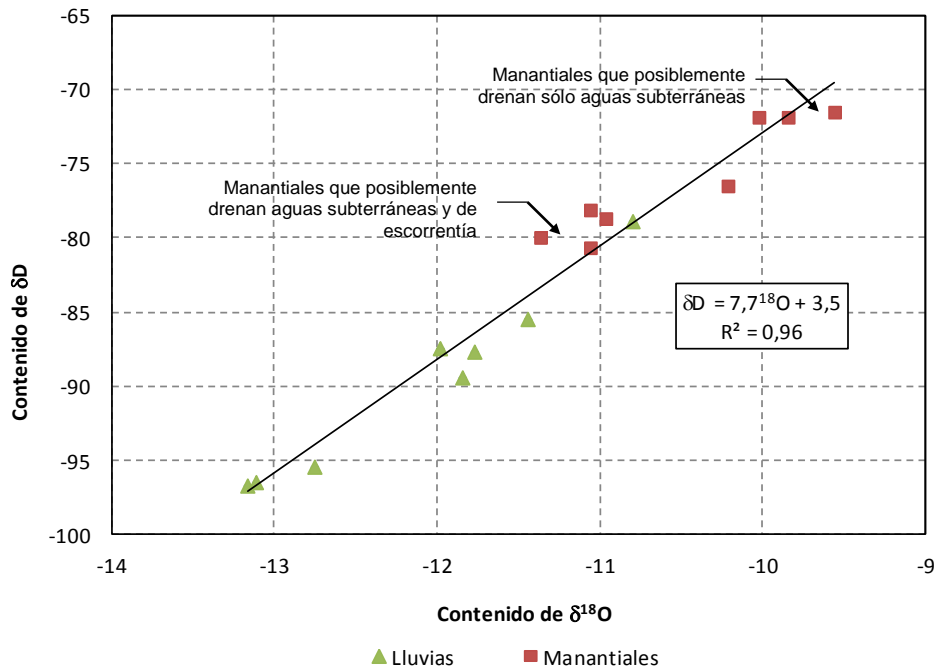


Figura 53. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental

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 54 y la Figura 55 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 14 y complementados con los de la Tabla 15. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 56 y la Figura 57.

Tabla 15. 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.

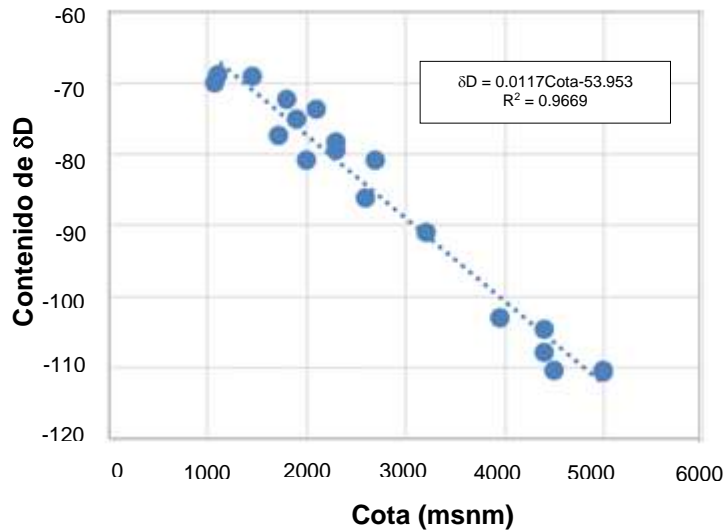


Figura 54. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

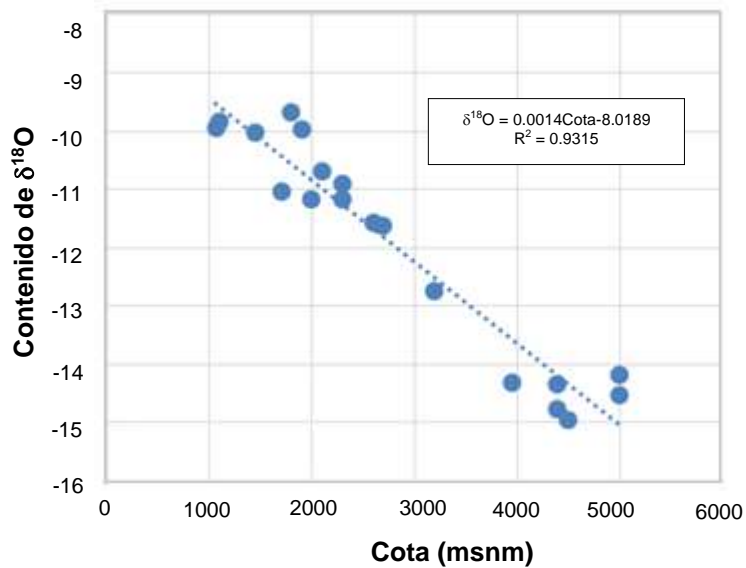


Figura 55. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

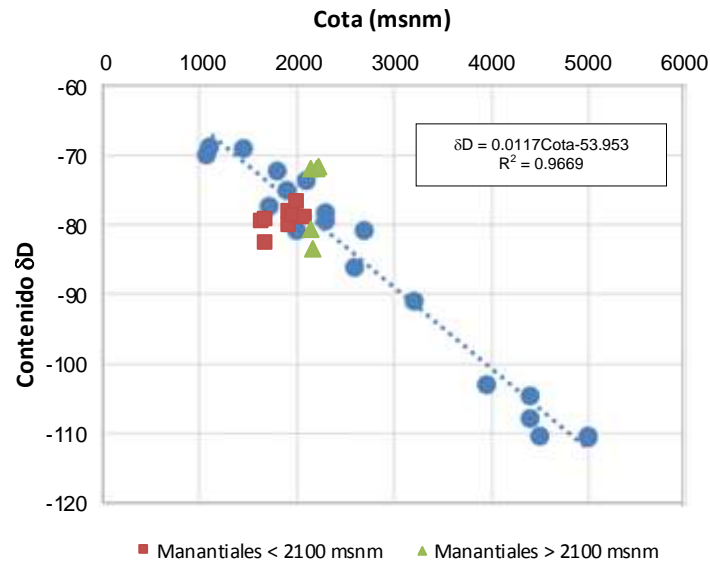


Figura 56. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

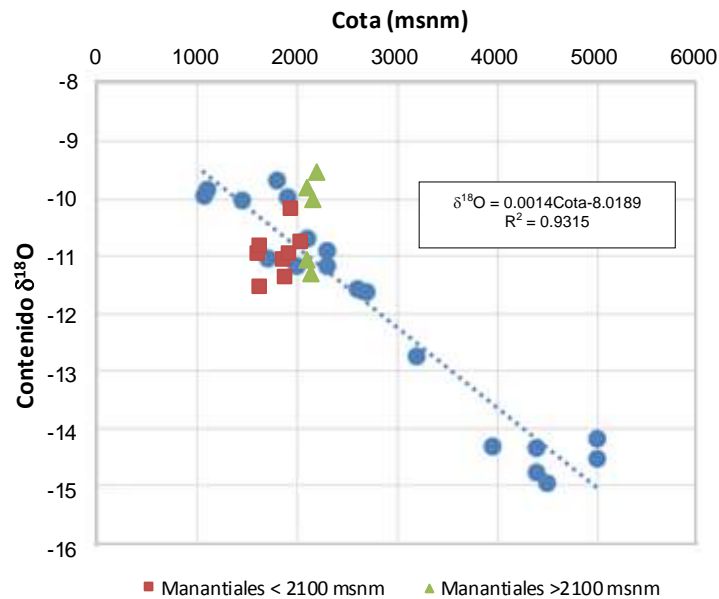


Figura 57. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

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

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 16 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 16. 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	Vía 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

Tabla 16. 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-31	07/09/12	843996.88	1178177.29	2570	-84.8	-11.71	Quebrada El Cartucho Acceso a Montevivo
TAO-32	07/09/12	844073.75	1178170.94	2575 ^o	-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 ^o .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 58 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 16 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 14. 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.

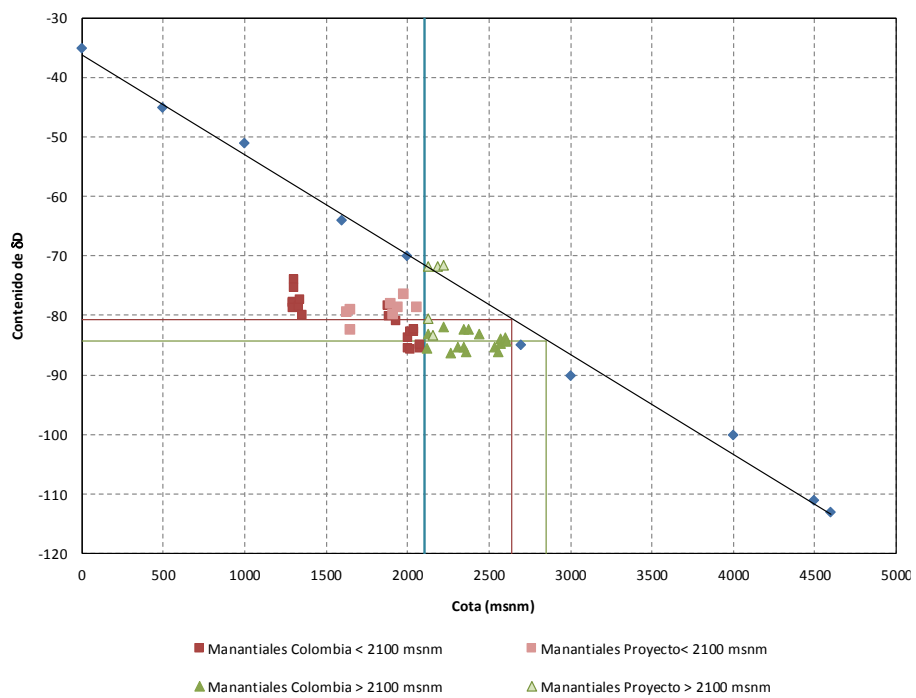




Figura 58. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)

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 58 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 59. 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.

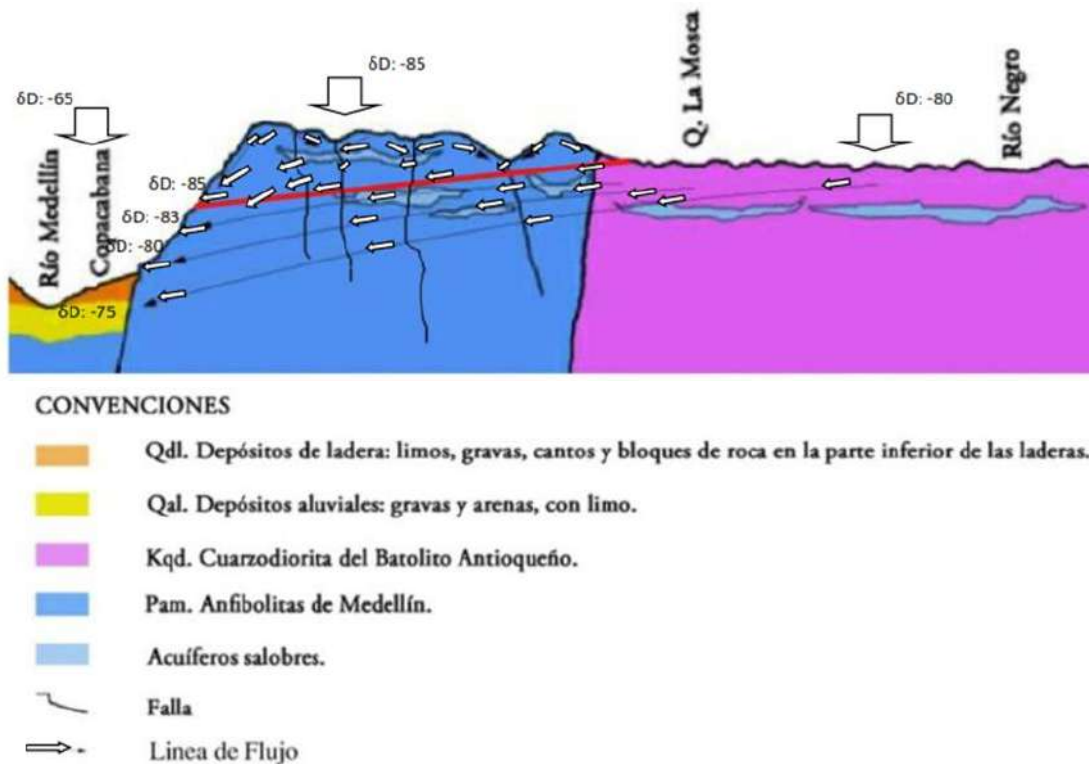




Figura 59. Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá

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 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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.

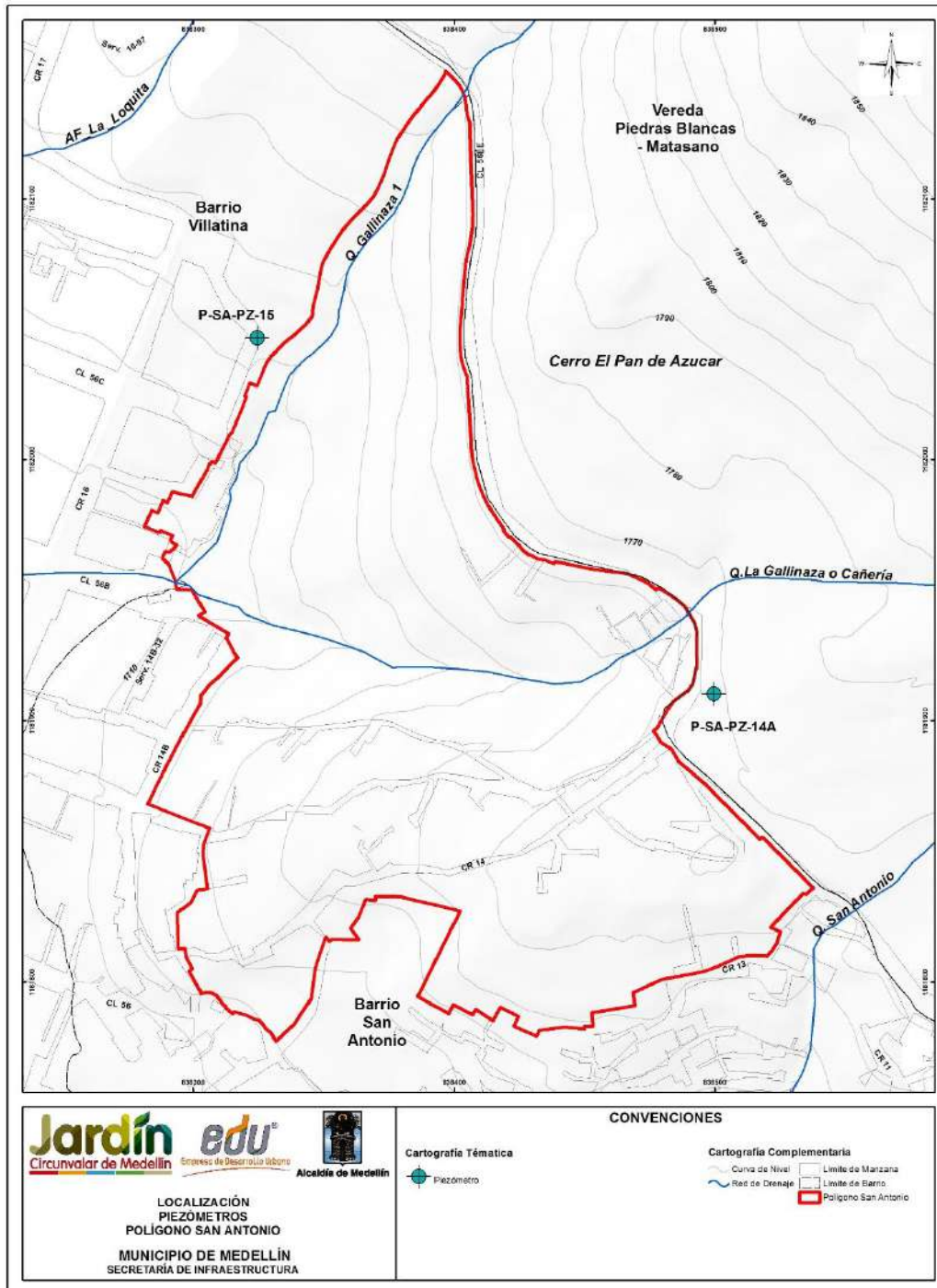
8.5.4 Zonas de descarga

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 San Antonio, 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-SA-PR-14A y P-SA-PR-15 realizadas en el Polígono San Antonio (Mapa 21).



**Mapa 21. Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil
(SATInstrumentacion_Medellin_C)**

Se escogieron estas perforaciones dado que se encuentran cerca de las zonas de drenaje de los afluentes de la Quebrada La Gallinaza. Los equipos instalados fueron entonces denominados como Piezómetros P-SA-PZ-14AD y P-SA-PZ-015D (Figura 60).

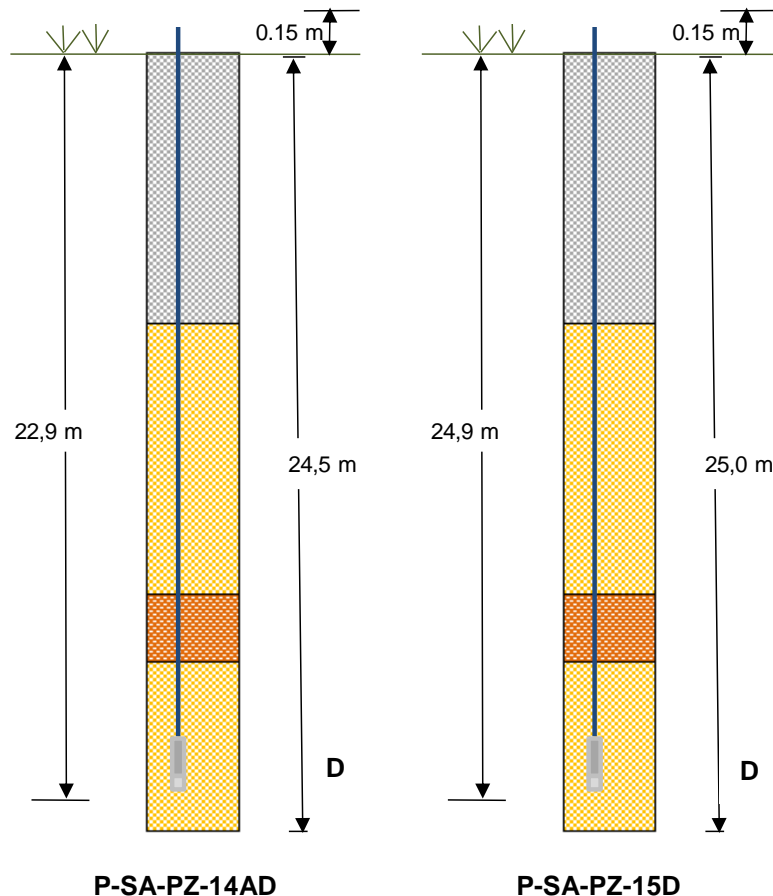




Figura 60. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil

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.

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 (μ/γ_w):

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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

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 dos 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 San Antonio.

8.6.1 Piezómetros P-SA-PZ-14AD

La Figura 61 presenta los registros obtenidos con el Piezómetro P-SA-PZ-14AD, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que el Piezómetro P SA PZ-14AD fue instalado en profundidad, en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-SA-PR-14A, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Basados en las lecturas obtenidas hasta el momento, se puede hablar de un nivel de aguas subterráneo por debajo de la cota de instalación del equipo, incluso por debajo de la cota 1745 msnm, pero sin que se pueda decir con exactitud la cota. Lo anterior porque el piezómetro está registrando presiones de poros negativas en lugar de positivas. En estos casos, piezómetros de alambre vibrátil como el instalado sirven para estar seguros de que no hay realmente presión en el agua si no tensión, pero no para determinar el valor de dicha tensión.

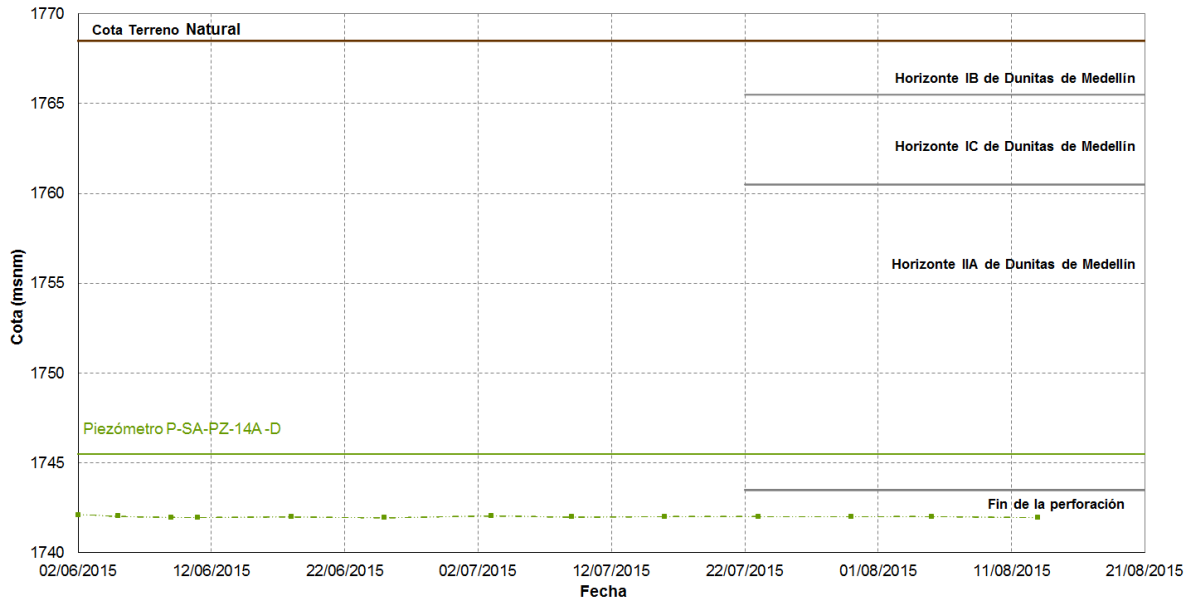


Figura 61. Cotas piezométricas en Piezómetros P-SA-PZ-14AD

8.6.2 Piezómetros P-SA-PZ-15D

La Figura 62 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-SA-PZ-15D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que el Piezómetro P-SA-PZ-15D fue instalado en profundidad, en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-SA-PR-15, vale la pena destacar el hecho de que la medida del nivel freático reportado en la mañana, a 25 m de profundidad del sondeo, fue de 11.3 m. Sin embargo, de acuerdo con lo registrado por el piezómetro, puede establecerse un nivel de aguas subterráneo a 17.4 m de profundidad en el Horizonte IIA. Esto equivale además a una cabeza de presión en el Horizonte IIA, el denominado en el Numeral 8.5.2 como acuífero confinado, de unos 8 m.

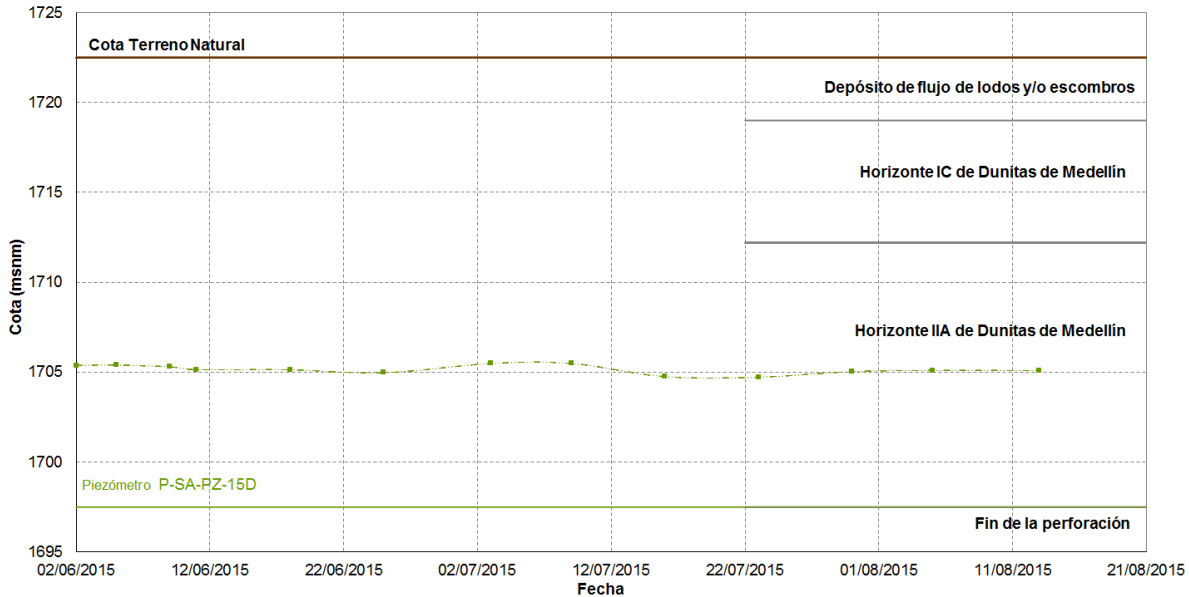


Figura 62. Cotaciones piezométricas en Piezómetros P-SA-PZ-15D

8.6.3 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 San Antonio, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, muestran que específicamente con el Piezómetro P-SA-PZ-15D fue posible interceptar el flujo regional, ubicado en sus alrededores en la cota 1705 msnm.

Las condiciones de flujo del agua subterránea en la UMI San Antonio pueden ser esquematizadas en la red de flujo que se presenta en la Figura 63. Las líneas equipotenciales fueron definidas a partir de los registros del Piezómetro P-SA-PZ-15D y se tuvieron en cuenta las líneas de drenaje superficial con corrientes permanentes (Quebradas La Gallinaza 1 y San Antonio), 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.

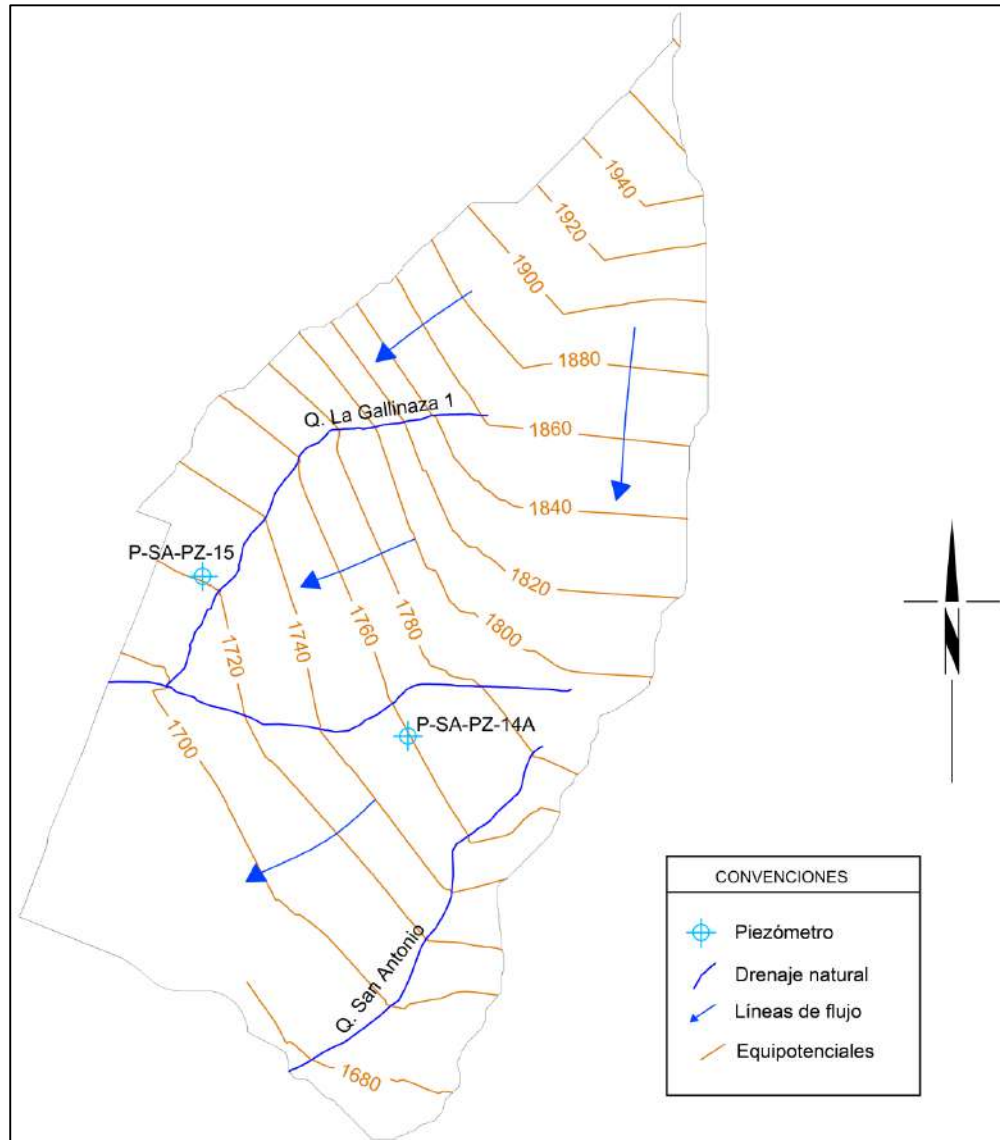




Figura 63. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono San Antonio

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 acuícludo 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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---



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.

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 91 y en la Figura 92. Dicho mecanismo puede ser descrito en términos de los eventos enumerados y descritos a continuación:

- ✓ 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).

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

- ✓ 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 San Antonio, 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.

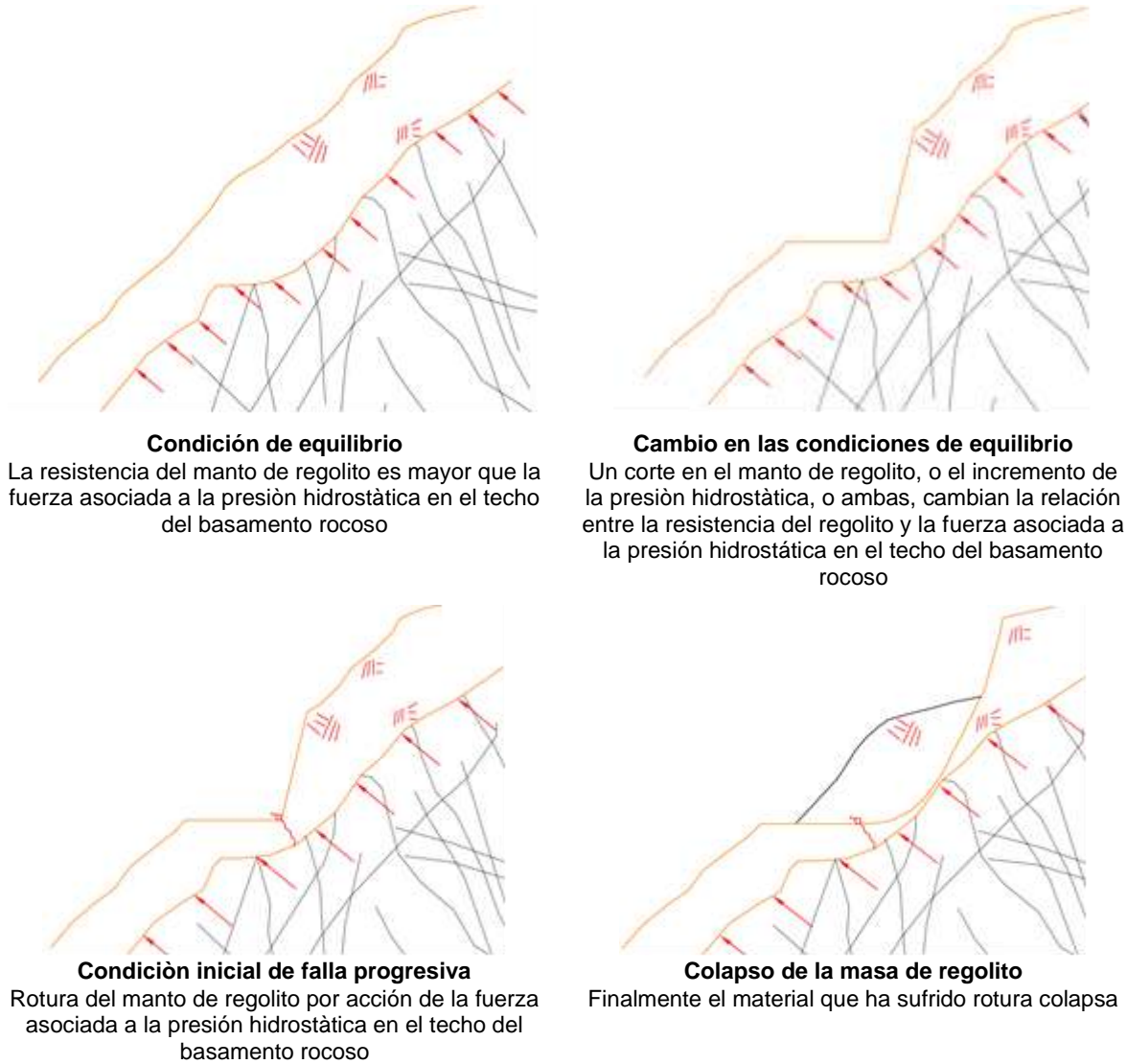
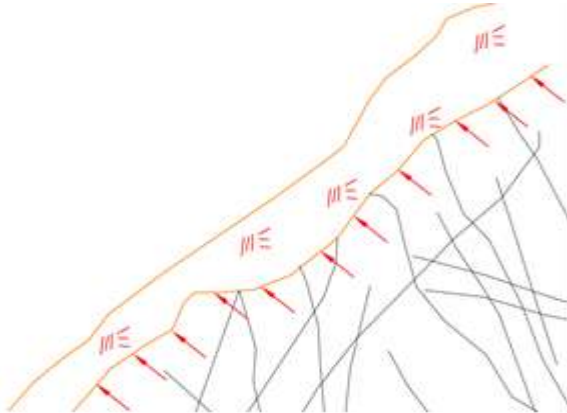


Figura 64. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica (Skempton, 1964)



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 65. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica (Skempton, 1964)

9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 66 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 San Antonio.

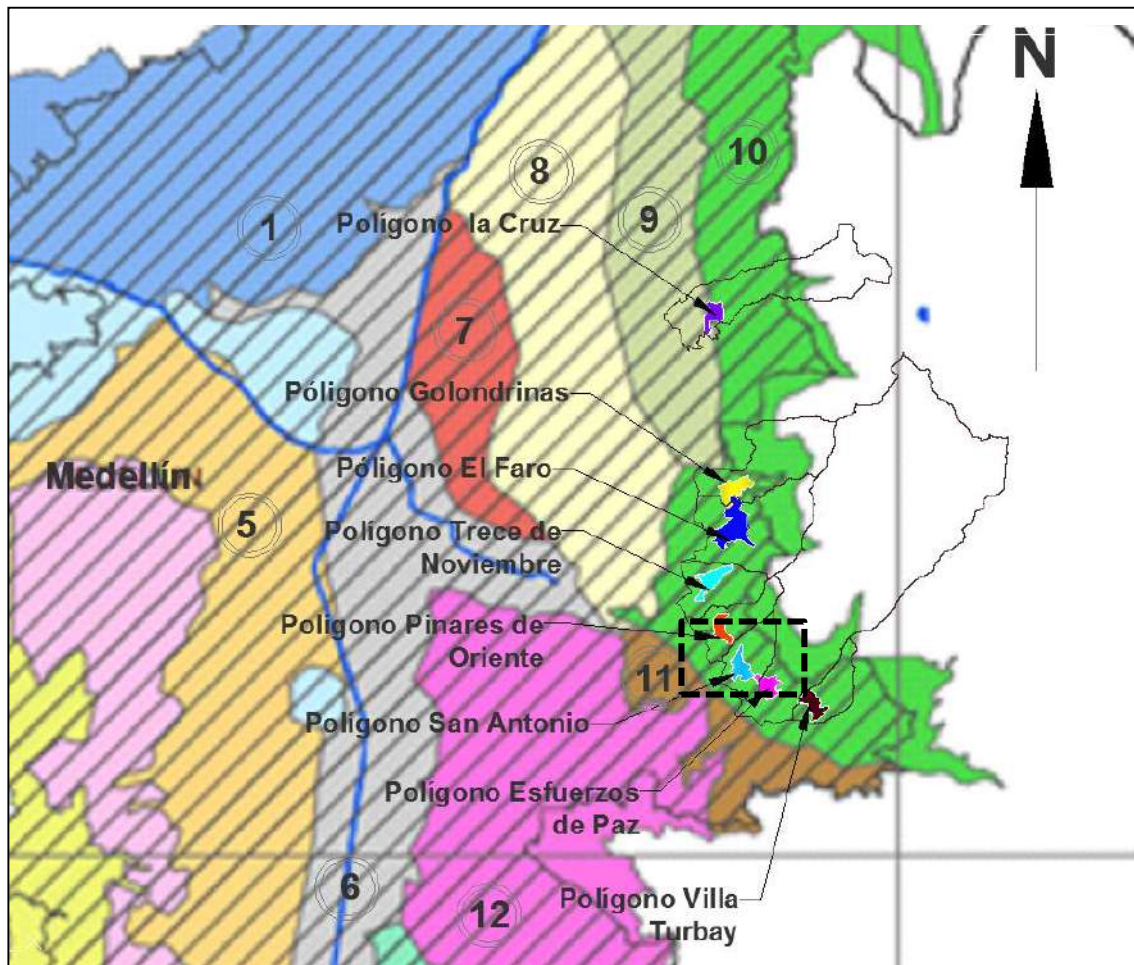




Figura 66. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)

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 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 San Antonio, 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.

La Tabla 17 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). En la UMI San Antonio, la unidad geológica predominante corresponde a las Dunitas de Medellín (JKuM) y a cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA), los cuales son suprayacidos por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósito de deslizamiento (Qd) y cenizas volcánicas remolivizadas y/o insitu, además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En el Numeral 4.2 se presentan y discuten los perfiles geológico-geotécnicos generales determinados con base

	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 POLÍGONO SAN ANTONIO	
---	--	---

en la exploración disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo. Así las cosas, se puede establecer que el perfil geológico general de la UMI San Antonio se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

Tabla 17. 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 18).

Tabla 18. 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 0.25g.

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.

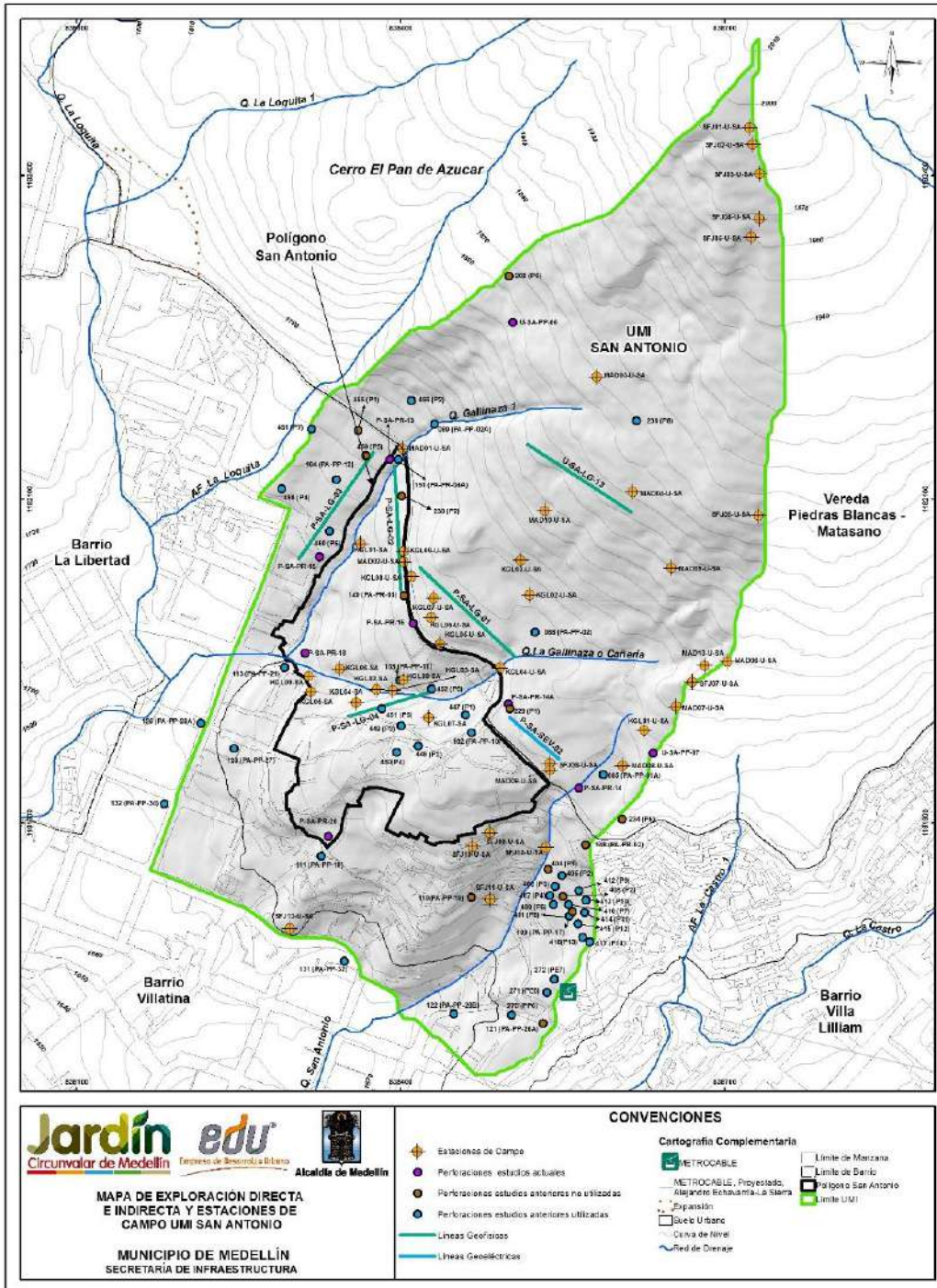
El Mapa 22 presenta la localización de la exploración considerada para la UMI San Antonio. En este se pueden observar los sondeos tanto de tipo directo (perforaciones) como indirecto (líneas de geofísica), que en conjunto conforman un sistema de exploración que cubre ampliamente la zona de estudio a nivel local y regional.

10.1.1 Perforaciones

En total se realizaron siete perforaciones a rotación, dentro de la UMI San Antonio correspondientes a las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-14A, P-SA-PR-15, P-SA-PR-16, P-SA-PR-18 y P-SA-PR-20 y dos perforaciones a percusión denominadas U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07.

Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI también fue considerada la información obtenida de 40 perforaciones realizadas en estudios anteriores por INCIGAM (2015), DEACIVIL (2014), VELEZ (2010), TECNISUELOS-ICC (2010) e INGEOCILCÓN (2009). Las perforaciones correspondientes a cada estudio son presentadas en la Tabla 19. En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el Proyecto y los de estudios anteriores que fueron considerados.

En la Tabla 19 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 22. Localización de la exploración directa e indirecta (13_SATExploracion_Medellin_C y 13_SATExploracion_Medellin_T)

Tabla 19. Exploración geotécnica utilizada en la UMI San Antonio

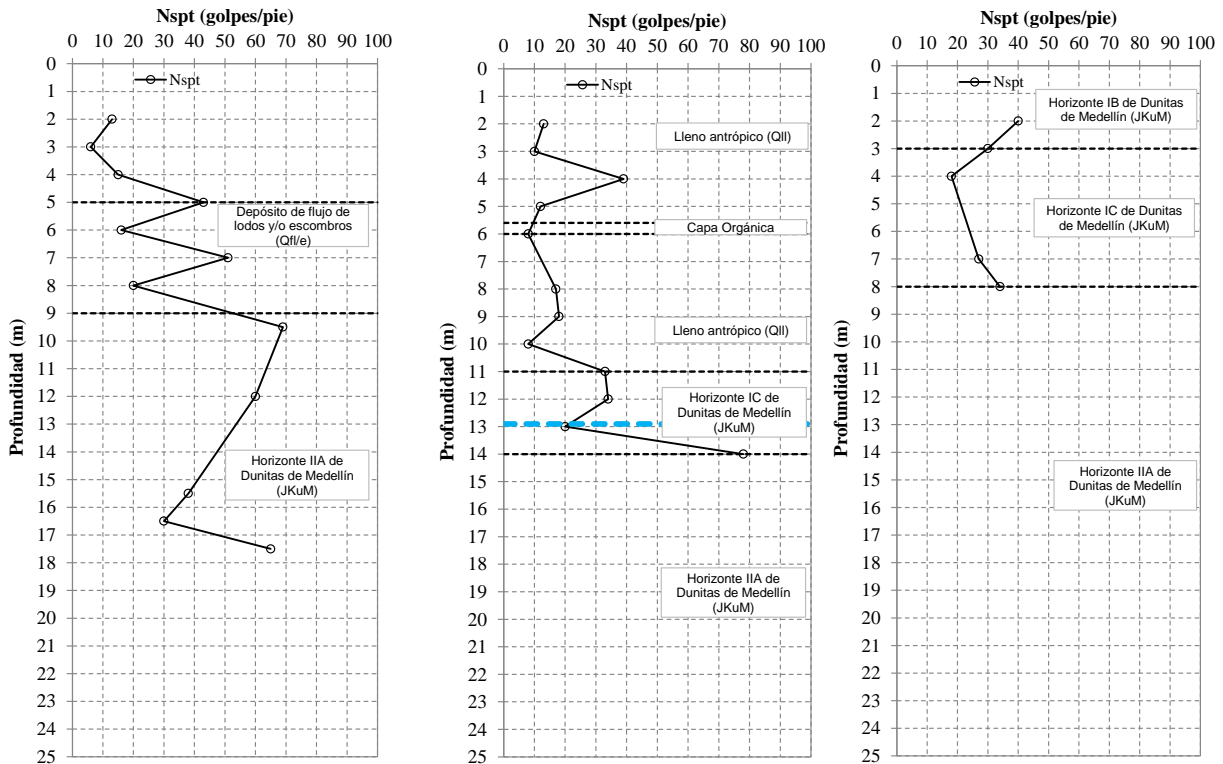
	Perforación	Prof. (m)	Prof. N.F (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
Proyecto (2015)	P-SA-PR-13	25.0	Seco	1755.7	838389.991	1182137.091
	P-SA-PR-14	25.0	11.5	1766.5	838564.580	1181832.381
	P-SA-PR-14A	24.0	Seco	1768.7	838499.848	1181910.345
	P-SA-PR-15	25.0	11.3	1722.8	838324.686	1182046.684
	P-SA-PR-16	25.0	No reporta	1760.6	838411.645	1181985.225
	P-SA-PR-18	20.0	6.0	1705.1	838311.580	1181957.330
	P-SA-PR-20	20.2	11.2	1722.3	838332.866	1181787.553
	U-SA-PP-05	6.75	Seco	1855.7	838503.500	1182264.010
	U-SA-PP-07	6.75	Seco	1786.6	838633.504	1181864.635
Deacivil (2014)	085 (PA-PP-01A)	8.45	Seco	1766.0	838587.303	1181844.908
	088 (PA-PP-02)	5.6	Seco	1777.3	838524.340	1181976.752
	089 (PA-PP-02A)	2.80	Seco	1775.4	838431.169	1182169.607
	102 (PA-PP-10)	5.45	Seco	1761.3	838465.465	1181883.982
	103 (PA-PP-11)	3.45	Seco	1737.6	838399.217	1181932.088
	104 (PA-PP-12)	5.45	Seco	1741.6	838340.217	1182118.243
	111 (PA-PP-19)	4.45	Seco	1716.7	838326.480	1181769.410
	113 (PA-PP-21)	9.45	Seco	1705.1	838292.569	1181944.337
	122 (PA-PP-26B)	10.45	Seco	1689.8	838448.895	1181623.221
	123 (PA-PP-27)	14.45	Seco	1706.3	838245.651	1181868.989
	125 (PA-PP-28A)	8.45	Seco	1695.0	838214.962	1181892.531
	131 (PA-PP-32)	15.45	Seco	1684.3	838347.661	1181672.047
	132 (PA-PP-34)	10.45	Seco	1683.1	838181.154	1181817.519
	151 (PA-PR-04A)	25.0	1.8	1757.0	838397.611	1182137.128
Velez (2010)	236 (P8)	4.00	Seco	1879.1	838617.959	1182172.925
Tecnisuelos-ICC (2010)	270 (PP-6)	15.50	12.0	1704.3	838502.555	1181622.040

Tabla 19. Exploración geotécnica utilizada en la UMI San Antonio

Perforación		Prof. (m)	Prof. N.F (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
	271 (PE-6)	9.20	Seco	1717.7	838535.139	1181643.154
	272 (PE-7)	13.45	Seco	1720.4	838542.237	1181655.315
Ingecilcón (2009)	456 (P2)	7.45	Seco	1776.1	838409.552	1182191.745
	458 (P4)	12.45	Seco	1732.7	838289.827	1182109.589
	460 (P6)	7.45	Seco	1729.5	838334.300	1182070.394
	461 (P7)	7.45	Seco	1748.9	838317.441	1182165.063
Incigam (2015)	405 (P2)	6.50	Seco	1739.1	838548.970	1181751.426
	406 (P3)	7.50	Seco	1733.2	838542.723	1181741.165
	407 (P4)	7.50	Seco	1727.9	838537.897	1181732.589
	409 (P6)	7.50	Seco	1725.5	838541.259	1181724.380
	410 (P7)	7.50	Seco	1730.5	838555.213	1181724.409
	411 (P8)	8.50	Seco	1726.8	838555.561	1181713.473
	412 (P9)	12.50	Seco	1738.1	838564.853	1181737.416
	413 (P10)	10.50	Seco	1739.1	838571.201	1181728.335
	414 (P11)	11.50	Seco	1736.1	838570.332	1181717.120
	415 (P12)	9.50	Seco	1730.5	838564.121	1181706.539
	416 (P13)	10.50	Seco	1730.5	838568.144	1181694.091
	417 (P14)	8.50	Seco	1731.9	838574.677	1181689.943
Incigam (2015)	447 (P1)	10.0	Seco	1754.0	838459.860	1181900.342
	448 (P2)	15.0	8.1	1756.2	838416.004	1181871.216
	449 (P3)	13.0	Seco	1748.6	838400.279	1181890.271
	450 (P4)	10.0	Seco	1753.3	838396.091	1181865.592
	451 (P5)	10.0	6.6	1737.4	838382.396	1181906.085
	452 (P6)	6.45	Seco	1744.8	838428.361	1181924.273

De la Figura 67 a la Figura 76 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos. Se exceptúan las

Perforaciones P-SA-PR-16, 151 (PA-PR-04A), 236 (P8) en las que no se realizó el ensayo de penetración estándar y las perforaciones realizadas por INCIGAM (2015) que fueron entregadas recientemente al EDU. 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.



Perforación P-SA-PR-13

Perforación P-SA-PR-14

Perforación P-SA-PR-14A

Figura 67. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio

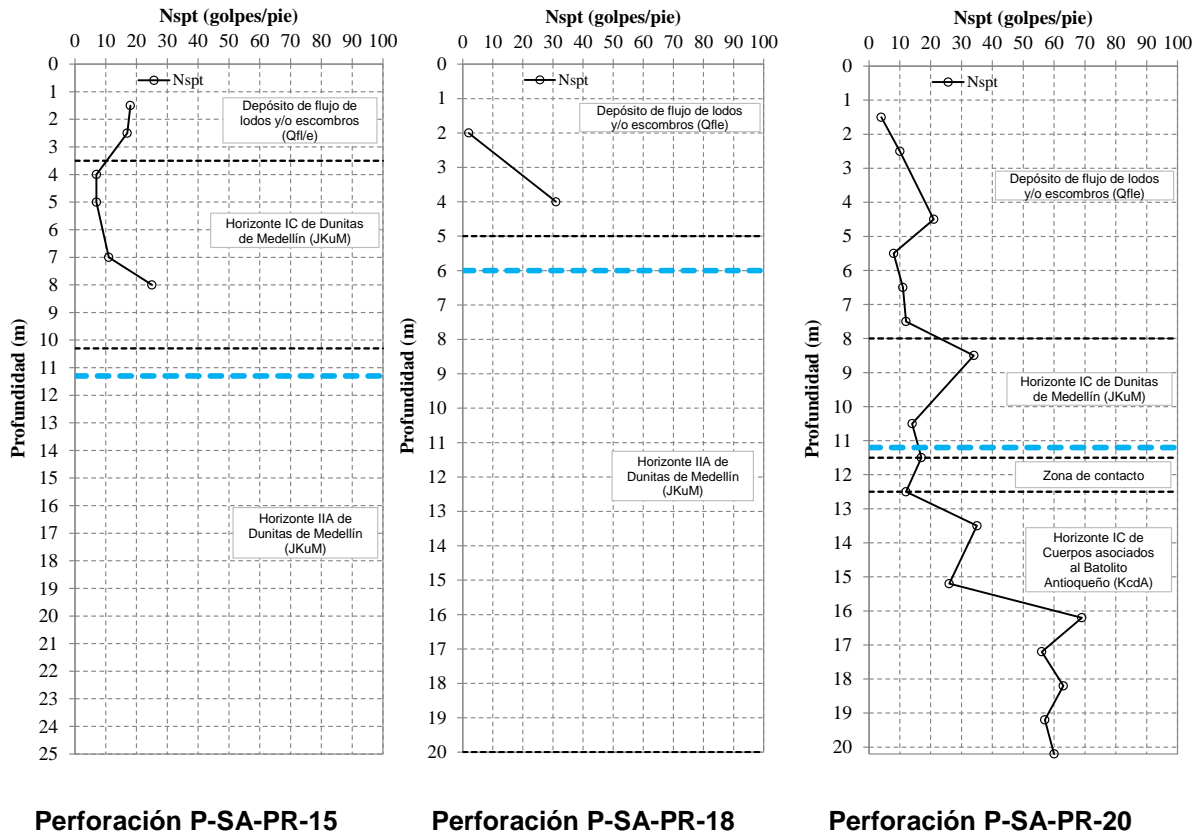


Figura 68. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

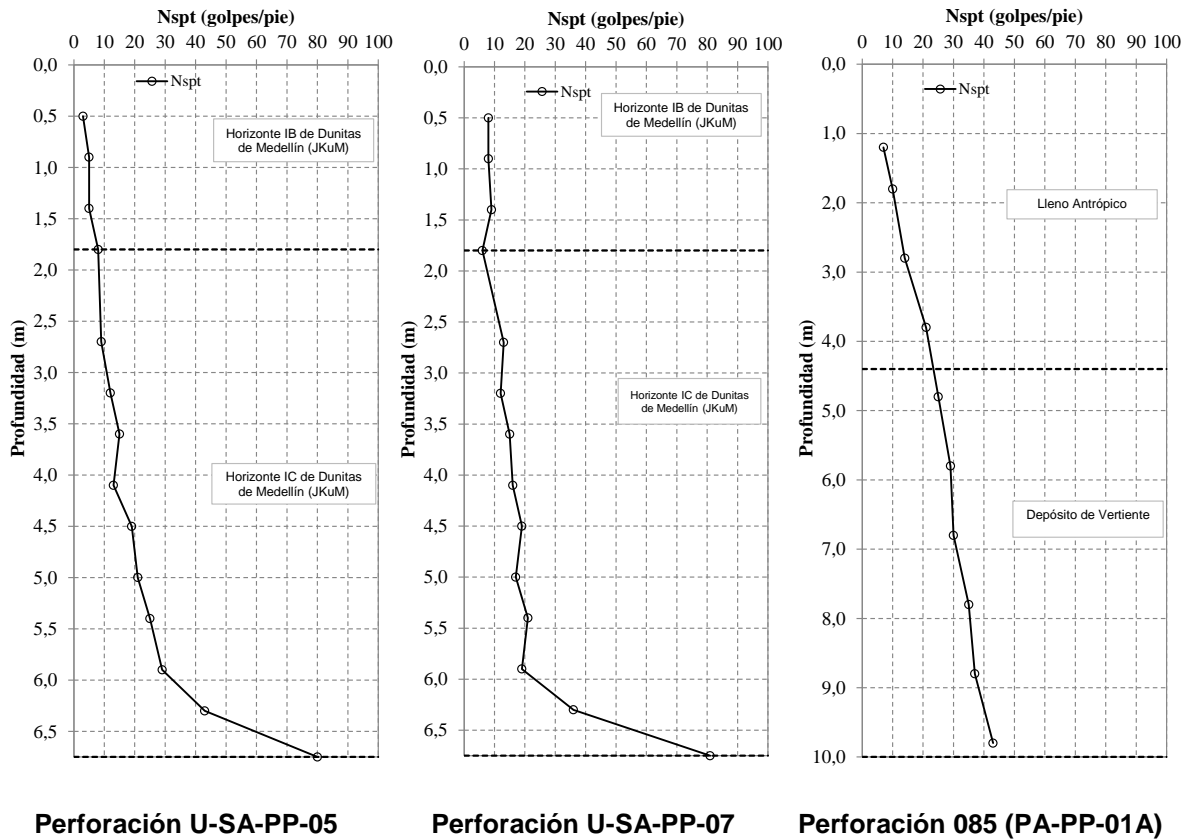
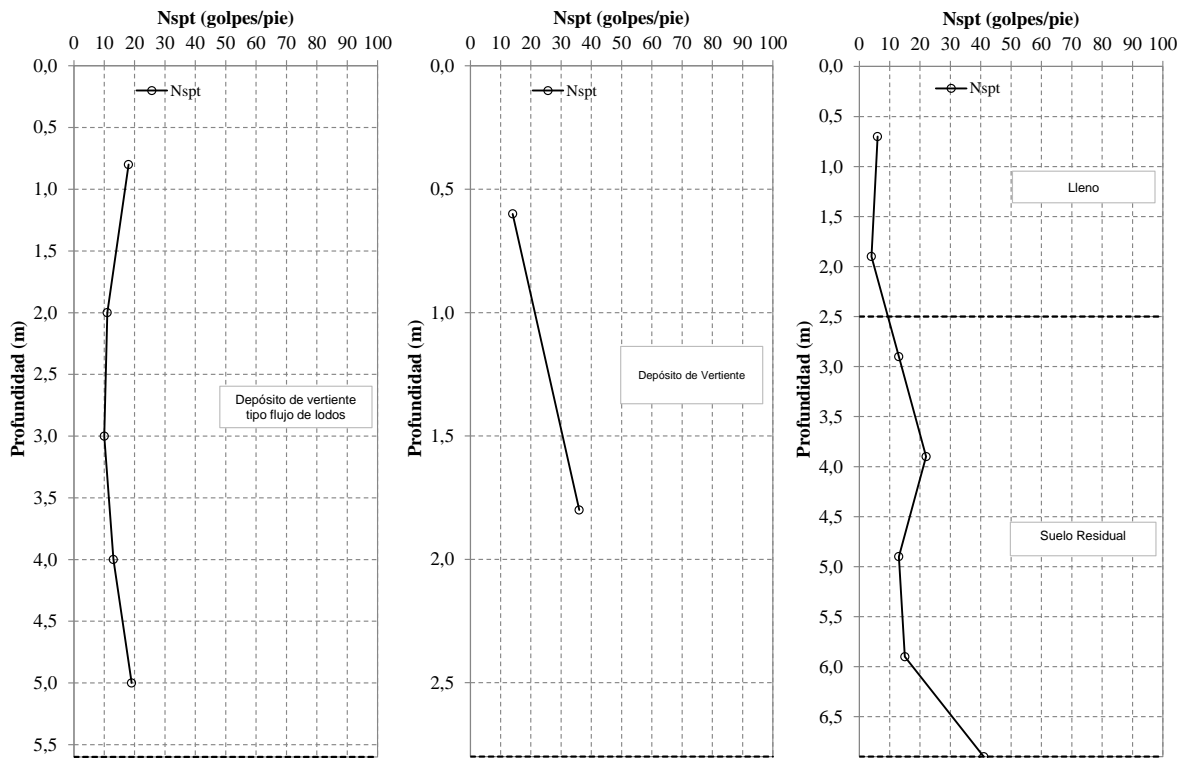
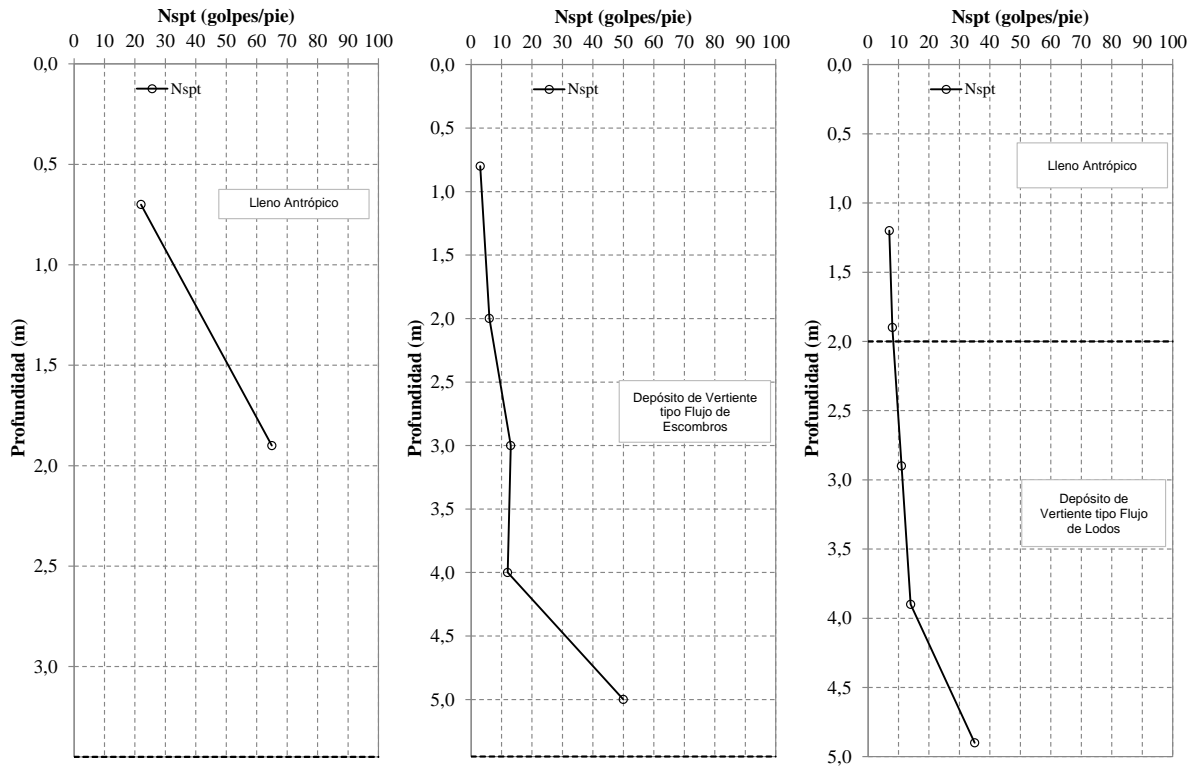


Figura 69. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)



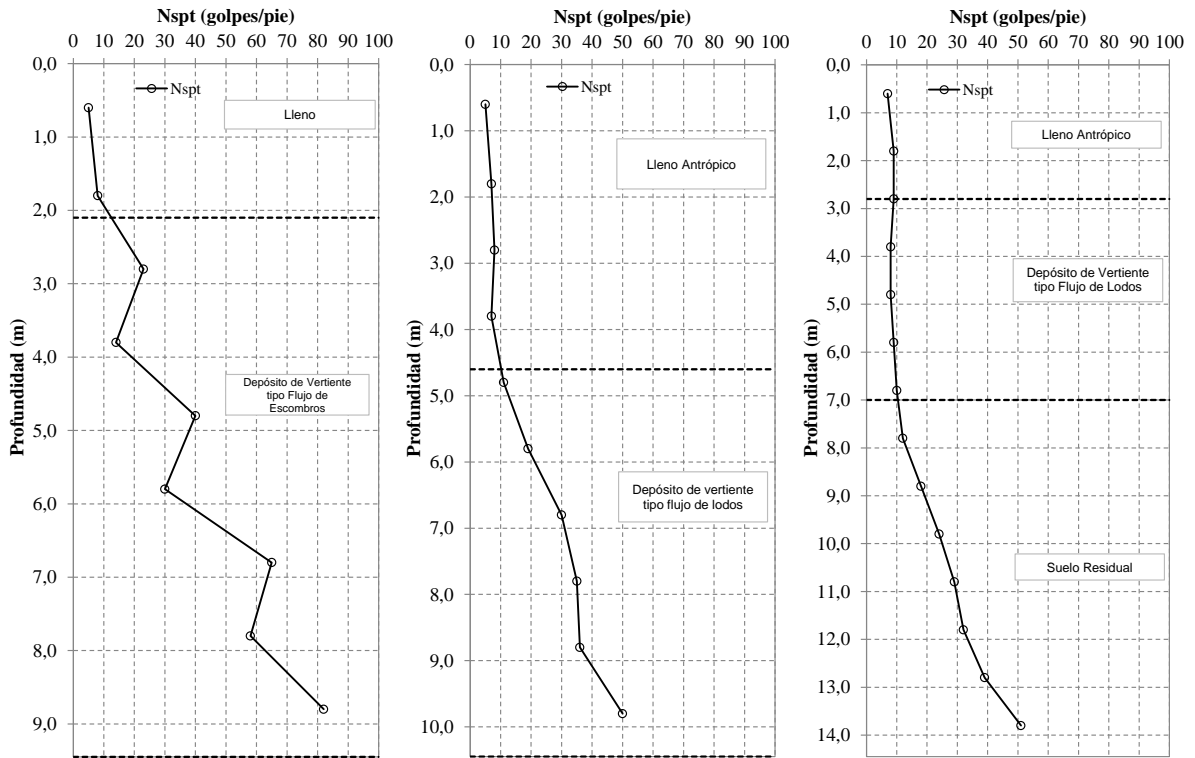
Perforación 088 (PA-PP-02) Perforación 089 (PA-PP-02A) Perforación 102 (PA-PP-10)

Figura 70. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

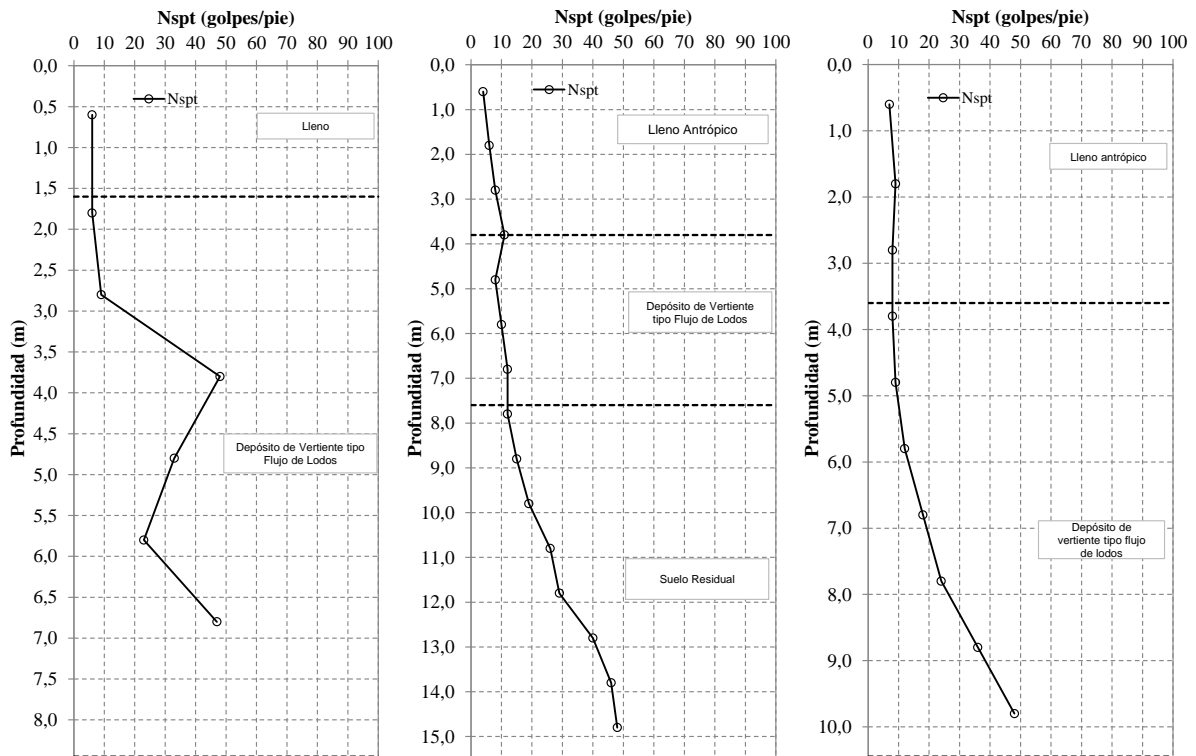


Perforación 103 (PA-PP-11) Perforación 104 (PA-PP-12) Perforación 111 (PA-PP-19)

Figura 71. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)



Perforación 113 (PA-PP-21) Perforación 122 (PA-PP-26B) Perforación 123 (PA-PP-27)
Figura 72. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)



Perforación 125 (PA-PP-28A) Perforación 131 (PA-PP-32) Perforación 132 (PA-PP-34)

Figura 73. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

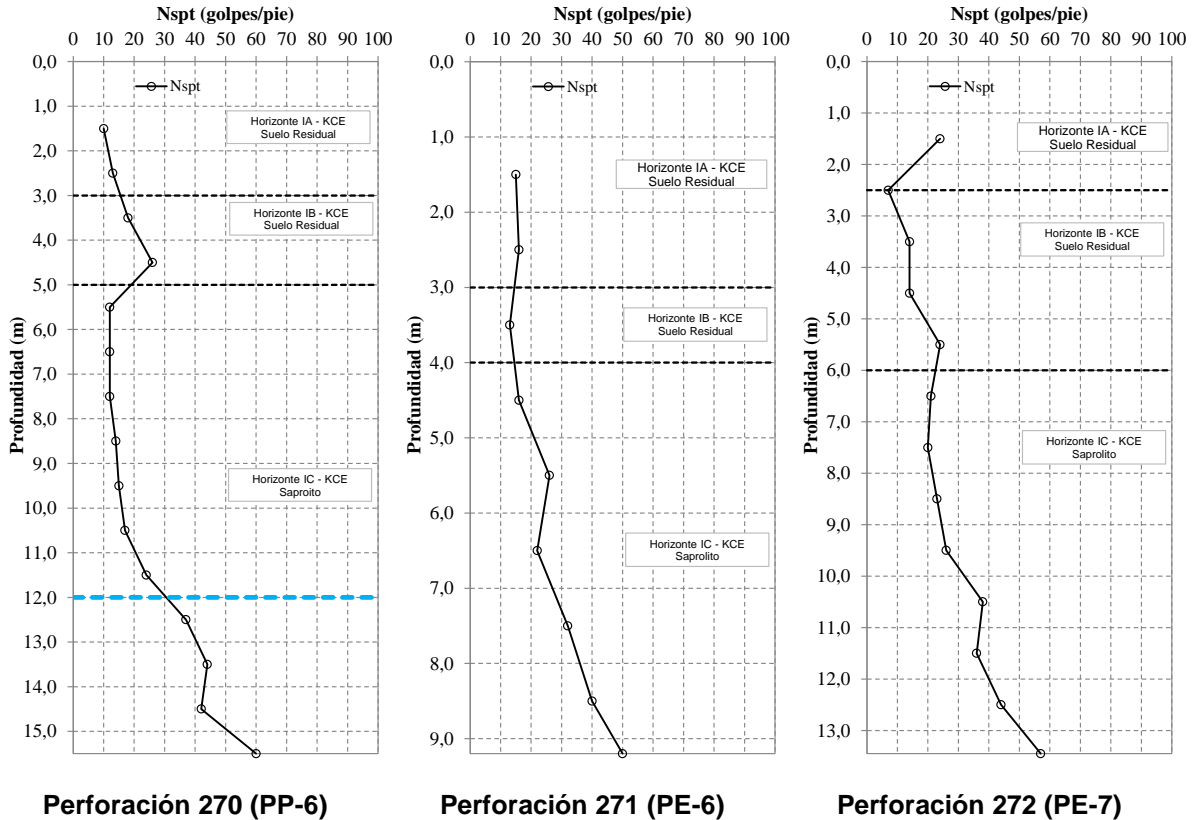


Figura 74. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

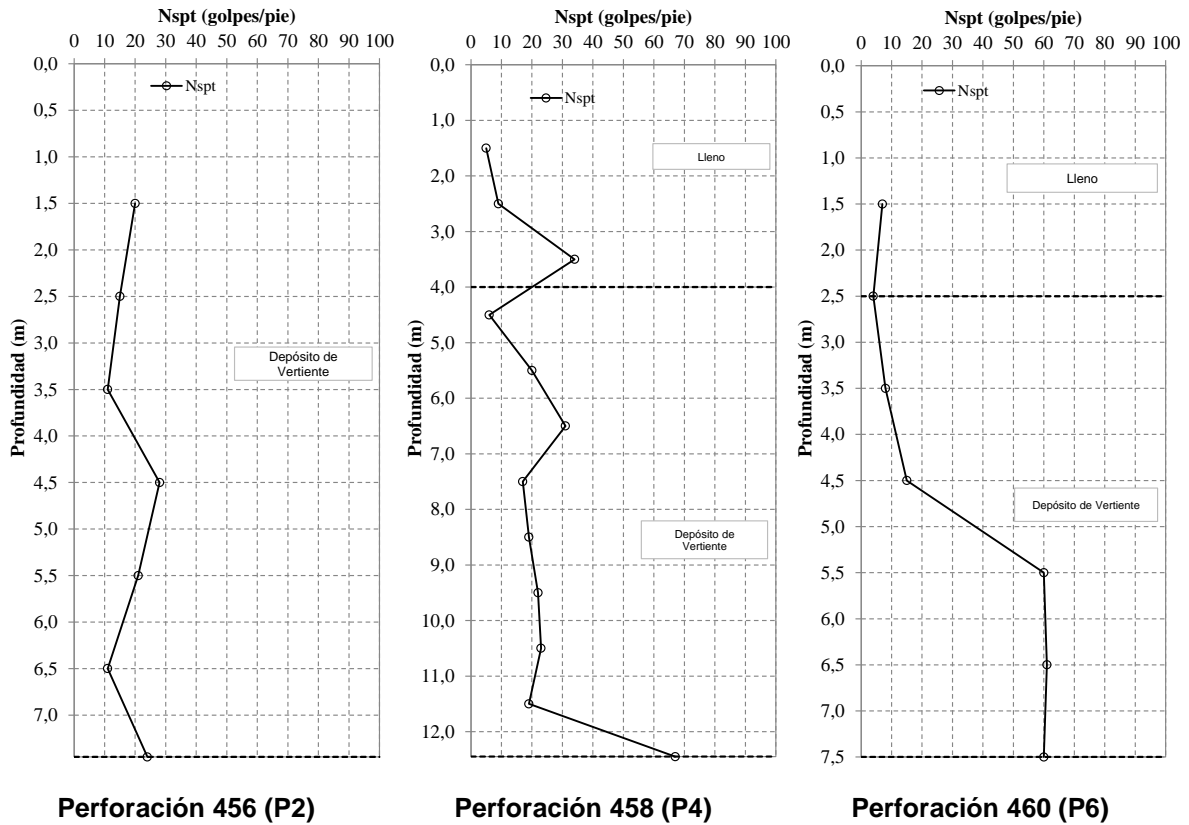
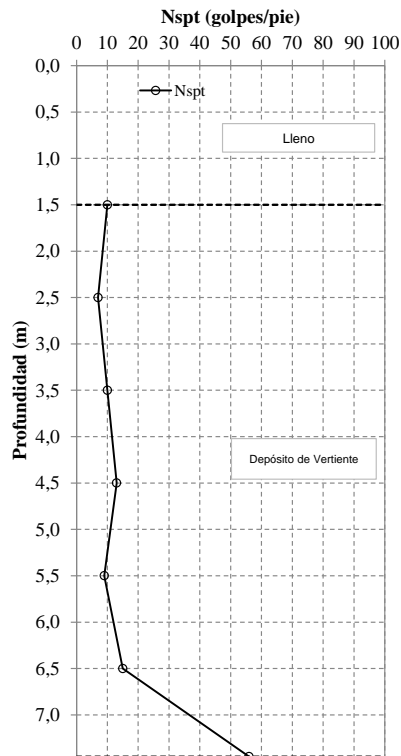


Figura 75. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

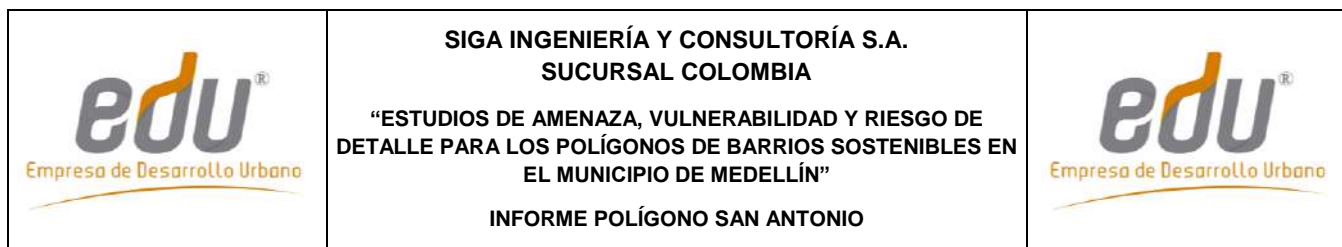


Perforación 461 (P7)

Figura 76. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI San Antonio (Continuación)

En la UMI San Antonio se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 15 m y 100 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.5 m y 10.0 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-16, 085 (PA-PP-01A), 102 (PA-PP-10), 103 (PA-PP-11), 111 (PA-PP-19), 113 (PA-PP-21), 122 (PA-PP-26B), 123 (PA-PP-27), 125 (PA-PP-28A), 131 (PA-PP-32), 132 (PA-PP-34), 151 (PA-PP-04A), 458 (P4), 460 (P6) y 461 (P7), suprayaciendo los suelos residuales de la Dunita de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 4 golpes/pie e incluso 39 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen los 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-SA-PR-13, P-SA-PR-15, P-SA-PR-18, P-SA-PR-20, 085 (PA-PP-01A), 088 (PA-PP-02), 089 (PA-PP-02A), 104 (PA-PP-12), 111 (PA-PP-19), 113 (PA-PP-21), 122 (PA-PP-26B), 123 (PA-PP-27), 125 (PA-PP-28A), 131 (PA-PP-32), 132 (PA-PP-34), 151 (PA-PP-04A), 458 (P4), 456 (P2), 460 (P6) y 461 (P7). La resistencia a la



penetración varía considerablemente entre 2 golpes/pie y 82 golpes/pie, entre la superficie y 16.0 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-SA-PR-13, P-SA-PR-14, P-SA-PR-14A, P-SA-PR-15, P-SA-PR-16, P-SA-PR-18, P-SA-PR-20, U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07. 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 3 golpes/pie y 81 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-SA-PR-14A, U-SA-PP-05 y U-SA-PP-07.

En esta UMI también se registran cuerpos asociados al Batolito Antioqueño en la perforación P-SA-PR-20, localizada en la parte baja del polígono San Antonio, a partir de los 12.5 m de profundidad con resistencias a la penetración estándar entre 26 golpes/pie y 69 golpes/pie. En esta misma perforación se obtuvieron valores de la resistencia a la penetración estándar entre 12 golpes/pie y 17 golpes/pie, en la zona de contacto entre Dunitas de Medellín y cuerpos asociados al Batolito Antioqueño.



10.1.2 Líneas geofísicas

En la zona de estudio se ejecutaron seis líneas geofísicas, en cinco de ellas se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor) para complementar el análisis geológico geotécnico y en la otra se realizó un Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V) para determinar las condiciones hidrogeológicas en el polígono San Antonio. La localización en planta de estos ensayos se muestra en la Mapa 22.

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

 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

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 20 muestra algunos valores teóricos de resistividad de algunos materiales encontrados en la corteza terrestre.

Tabla 20. 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-SA-LG-01, P-SA-LG-02, P-SA-LG-03, P-SA-LG-04 y U-SA-LG-13 y la línea en la que se realizó el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) fue denominada P-SA-SEV-02. Se resalta que la posición de las líneas fue altamente influenciada por la accesibilidad en este sector. Sin embargo, en las zonas donde se ubicaron, por ejemplo las Líneas P-SA-LG-02 y P-SA-LG-03, se requería conocer muy bien el espesor del depósito de flujo de lodos y/o escombros del movimiento Villatina (1987). La Línea U-SA-LG-13 fue fundamental para conocer el espesor de suelo sobre la ladera y con este hacer una proyección sobre la misma.

En la Tabla 21 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los ensayos ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

Tabla 21. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI San Antonio

Nomenclatura	Coordenada inicial	Cota	Coordenada final	Cota
--------------	--------------------	------	------------------	------

	ESTE	NORTE	inicial	ESTE	NORTE	final
P-SA-LG-01	838417	1182037	1770.2	838506	1181954	1770.8
P-SA-LG-02	838394	1182131	1753.6	838400	1182015	1755.8
P-SA-LG-03	838375	1182143	1754.1	838306	1182045	1719.9
P-SA-LG-04	838428	1181924	1744.3	838345	1181908	1734.0
U-SA-LG-13	838552	1182133	1840.1	838665	1182080	1853.5
P-SA-SEV-02	838501	1181898	1768.3	838547	1181859	1770.5

La Figura 77 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 P-SA-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión, se realiza el ajuste presentado en la Figura 78, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 79 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 80 se observa la tomografía obtenida para la línea P-SA-LG-01 en una imagen suavizada. En general, estos resultados ayudan a determinar la siguiente estratigrafía:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 6.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 224 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda, asimilable a un depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/ escombros.
- ✓ Una segunda capa desde los 6.2 m hasta los 29.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S entre 675 m/s a 696 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media, asimilable al Horizonte IB-IC de Dunitas de Medellín.
- ✓ Una capa más profunda desde los 29.4 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 910 m/s, la cual puede definirse como una roca, asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín o estratos de mayor competencia.

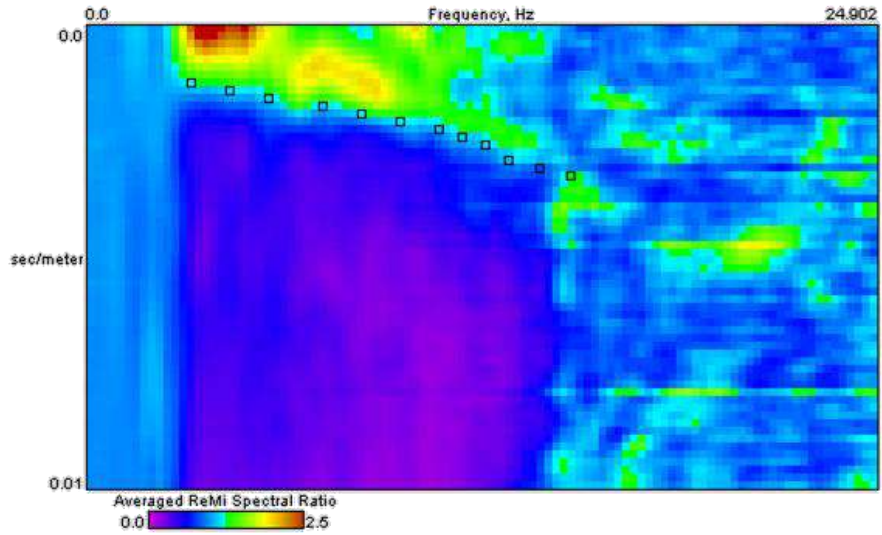


Figura 77. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-01

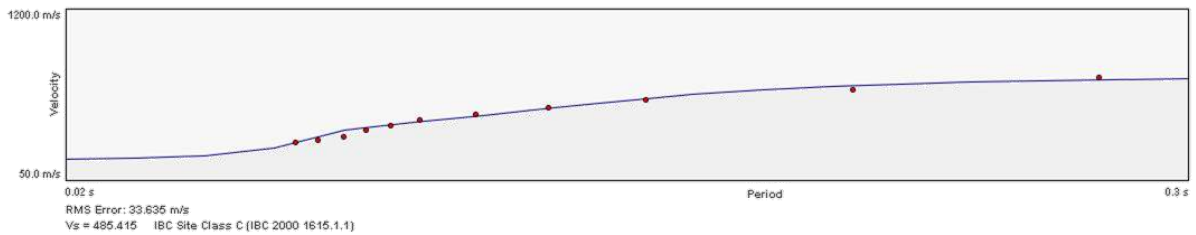


Figura 78. Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-01

	Density	Shear Velocity
6.2 m	1.81 g/cc	223.851 m/s
19.0 m	1.81 g/cc	674.923 m/s
29.4 m	1.81 g/cc	696.067 m/s
40.0 m	1.81 g/cc	909.857 m/s

Figura 79. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-01

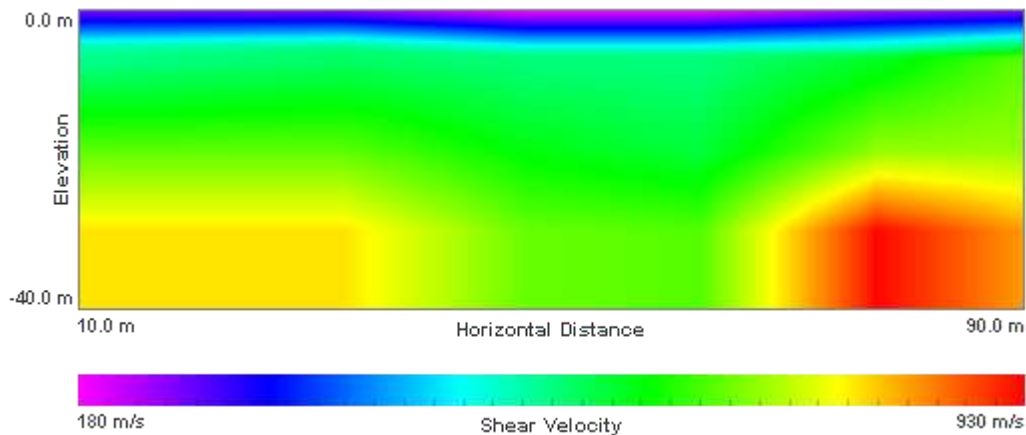


Figura 80. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-01

La Figura 81 presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo la Línea Geofísica P-SA-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 82, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 83 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 84 se observa la tomografía obtenida para la línea P-SA-LG-02 en una imagen suavizada. En general, estos resultados ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 332 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 6.0 m hasta los 29.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 653 m/s a 753 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media, asimilable al Horizonte IB-IC de Dunitas de Medellín.
- ✓ Una capa más profunda desde los 29.4 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 935 m/s, la cual puede definirse como una roca, asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

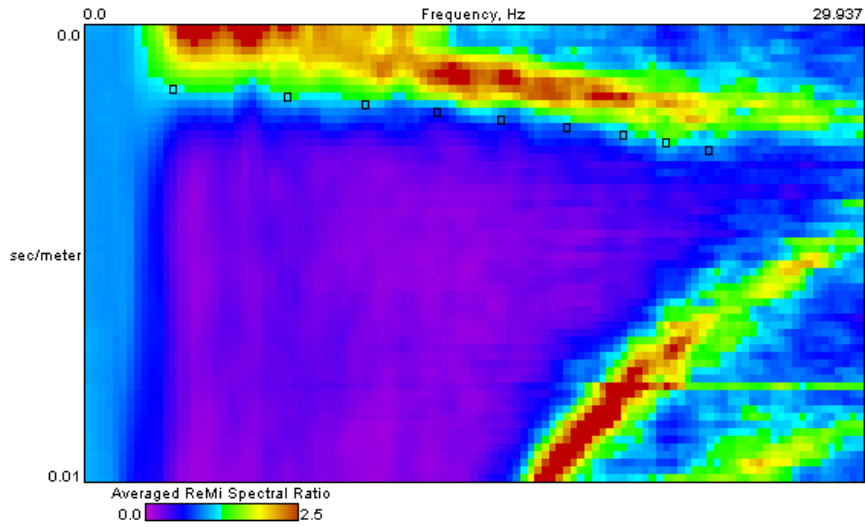


Figura 81. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-02

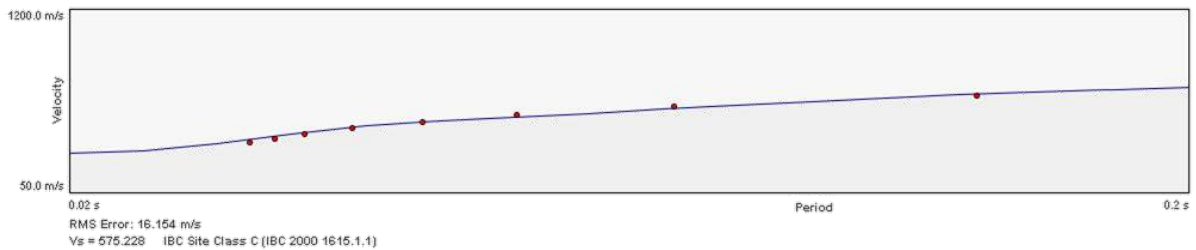


Figura 82. Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-02

	Density	Shear Velocity
5.8 m	1.81 g/cc	931.92 m/s
19.0 m	1.81 g/cc	652.605 m/s
29.4 m	1.81 g/cc	736.006 m/s
40.0 m	1.81 g/cc	934.525 m/s

Figura 83. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-02

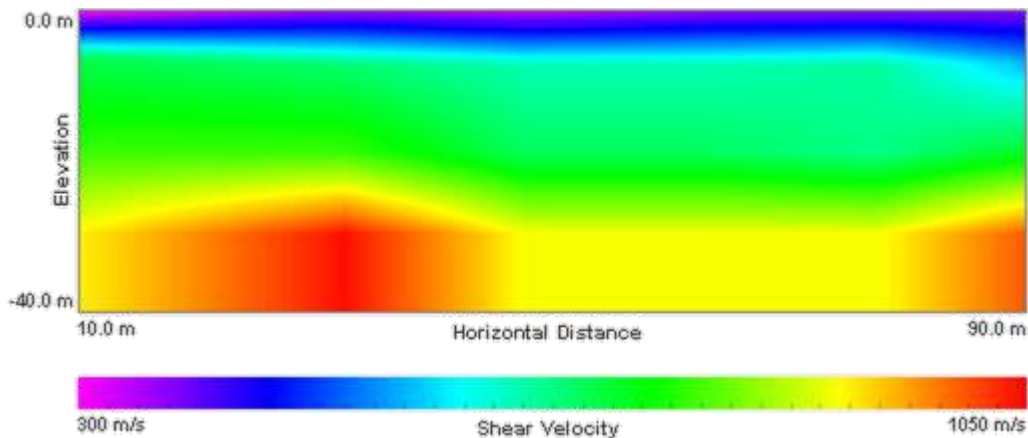


Figura 84. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-02

La Figura 85 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 P-SA-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 86, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. En este caso, debido a las condiciones del terreno fue necesario realizar una corrección por topografía utilizando la disposición geométrica de cada sensor. La cota inicial y final fueron 1760.0 y 1735.0 respectivamente, generando una pendiente de 13.8° respecto a la horizontal. La Figura 87 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 88 se observa la tomografía obtenida para la línea P-SA-LG-03 en una imagen suavizada. En general, estos resultados ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 164 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.0 m hasta los 15.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 508 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media, asimilable a los Depósitos de Vertiente.
- ✓ Una capa intermedia entre 15.8 m y 27.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 723 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia firme, asimilable al Horizonte IB-IC de Dunitas de Medellín.
- ✓ Una capa más profunda desde los 27.0 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 957 m/s, la cual puede definirse como una roca, asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

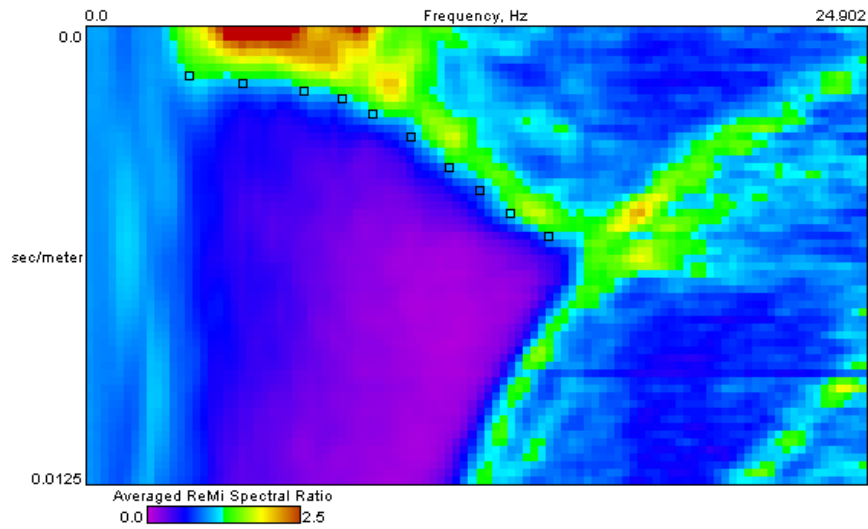


Figura 85. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-03

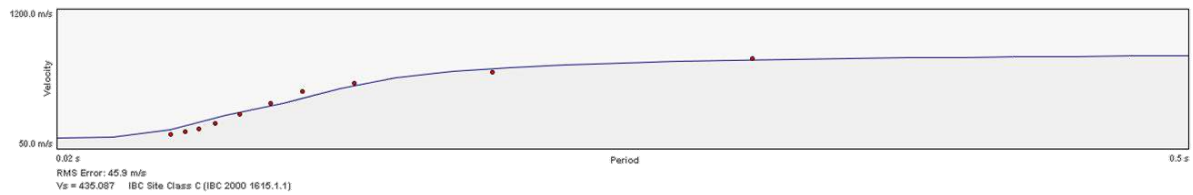


Figura 86. Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-03

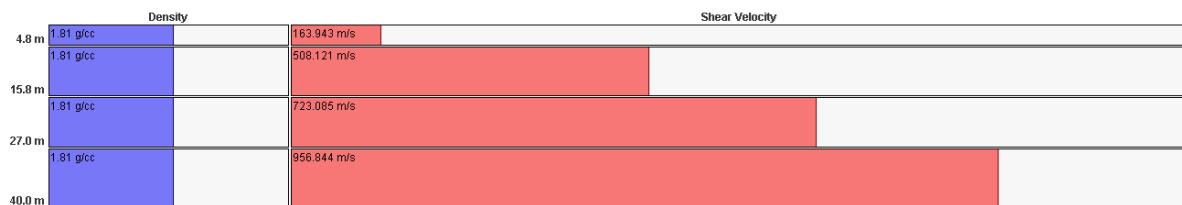


Figura 87. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-03

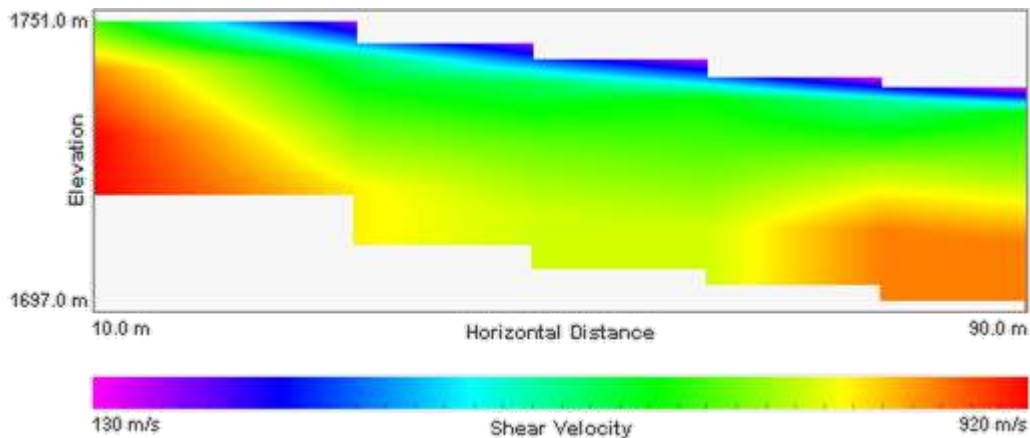


Figura 88. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-03

La Figura 89 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 P-SA-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 90, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 91 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 92 se observa la tomografía obtenida para la línea P-SA-LG-04 en imagen suavizada. En general, estos resultados ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 10.0 m con velocidad de propagación de Ondas S entre 163 m/s y 231 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 10.2 m y 18.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 598 m/s, y entre 18.0 m y 29.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 687 m/s, las cuales pueden definirse como un suelo de consistencia firme, asimilable al Horizonte IB-IC de Dunitas de Medellín.
- ✓ Una capa más profunda desde los 29.8 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 711 m/s, la cual puede definirse como una roca, asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

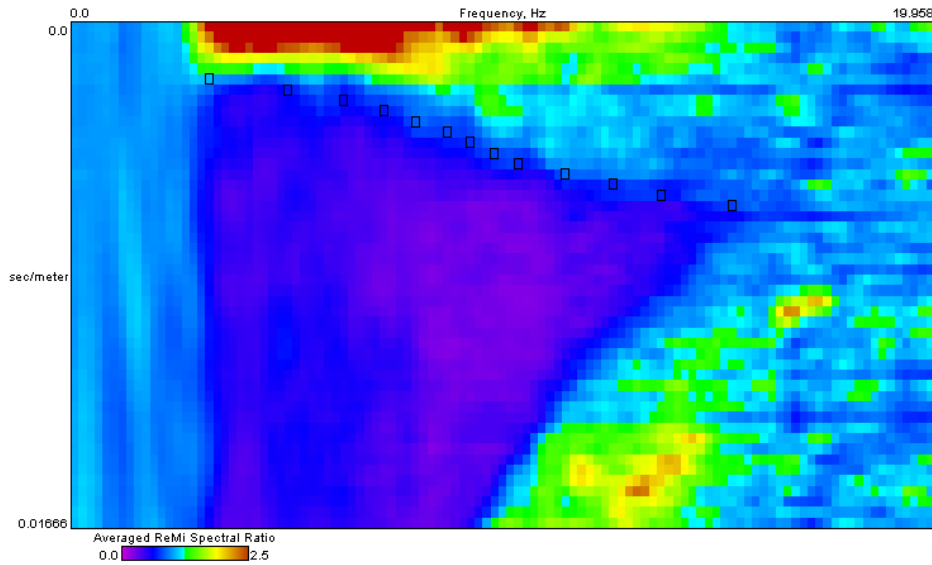


Figura 89. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-SA-LG-04

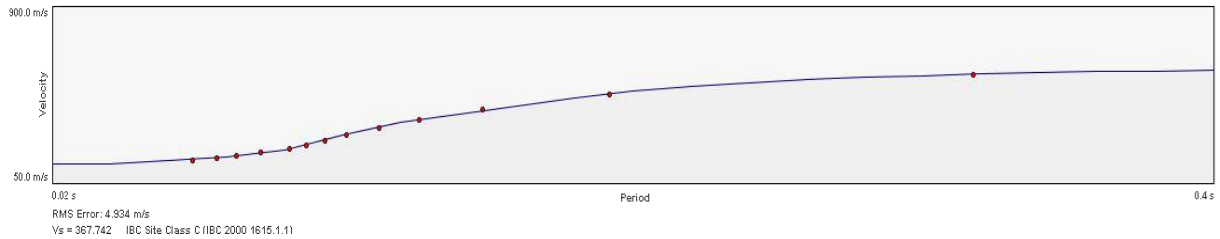


Figura 90. Dispersión y ajuste para la Línea P-SA-LG-04

	Density	Shear Velocity
4.2 m	1.8 g/cc	162.87 m/s
10.2 m	1.8 g/cc	231.461 m/s
18.0 m	1.8 g/cc	597.855 m/s
29.8 m	1.8 g/cc	687.283 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	710.725 m/s

Figura 91. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-04

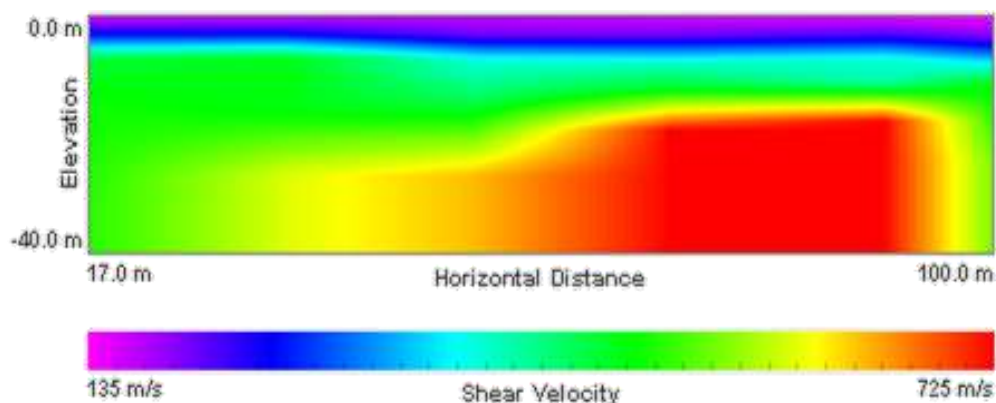


Figura 92. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-SA-LG-04

La Figura 93 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-SA-LG-13. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 94, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 95 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 96 se observa la tomografía obtenida para la línea U-SA-LG13. En general los resultados indican la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 210 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia firme, asimilable al Horizonte IB-IC de Dunitas de Medellín.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S entre 750 m/s hasta 904 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia firme a dura, asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

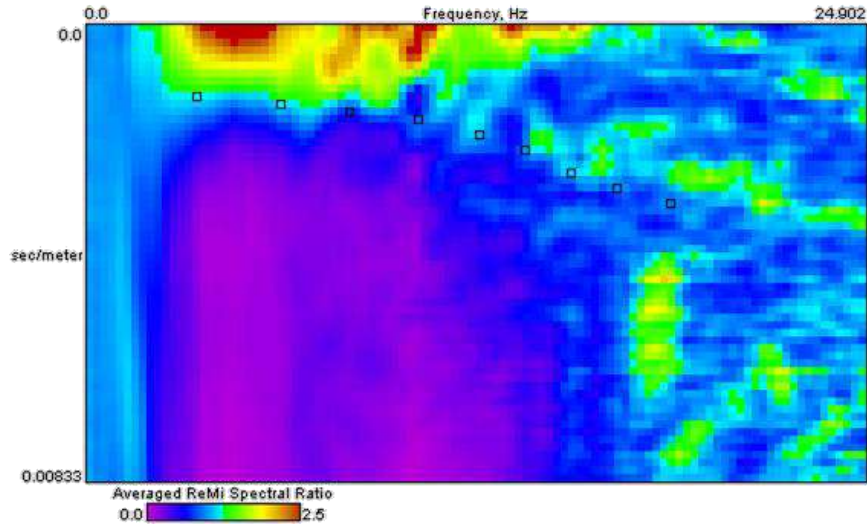


Figura 93. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-SA-LG-13

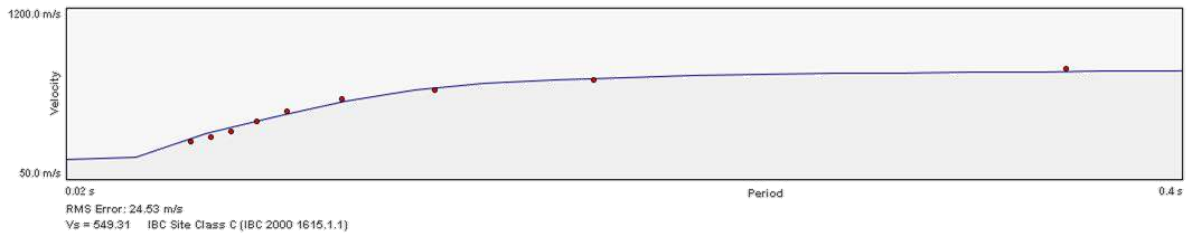


Figura 94. Dispersión y ajuste para la Línea U-SA-LG-13

	Density	Shear Velocity
4.8 m	1.81 g/cc	209.755 m/s
19.0 m	1.81 g/cc	750.102 m/s
29.4 m	1.81 g/cc	833.504 m/s
40.0 m	1.81 g/cc	903.984 m/s

Figura 95. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-SA-LG-13

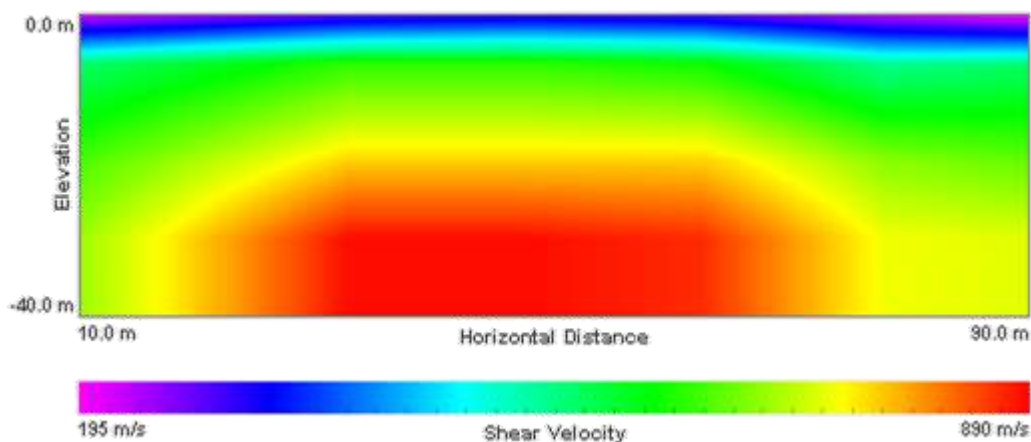


Figura 96. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-SA-LG-13

En la Figura 97 se muestra el resultado del sondeo eléctrico vertical P-SA-SEV-02 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 4.27%. En general, los resultados permiten identificar la siguiente estratigrafía:

- ✓ La primera capa cuenta con un espesor de 0.836 m con resistividad de 1805 Ω .m.
- ✓ La segunda capa tiene un espesor de 4.82 m con resistividad de 3680 Ω .m.
- ✓ La tercera capa tiene un espesor de 5.59 m en el cual existe un cambio de material con valores de resistividad altos de 11476 Ω .m
- ✓ Desde los 11.2 m hasta 30 m de profundidad existe un cambio de material con valores de resistividad de 62.2 Ω .m.

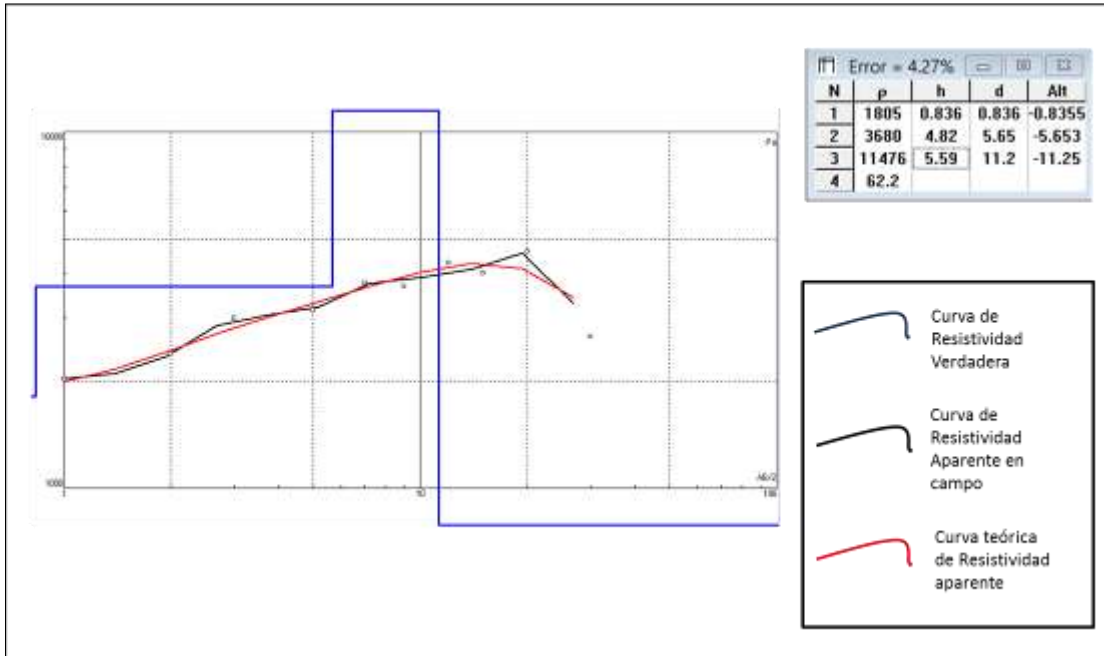


Figura 97. Curva de resistividad vs profundidad (AB/2), P-SA-SEV-02.

En el Sondeo P-SA-SEV-02 se distinguieron cuatro capas asociadas al perfil de meteorización de la Dunita de Medellín, después de los 11.2 m se presenta un valor bajo de resistividad, asociado a una zona de falla de materiales de arcillas y limos húmedos.

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 drenada (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 22 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 23 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

Tabla 22. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	W [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-SA-PR-13	M4	4.5-5.00	Lleno antrópico	24.1	50.0	11.0	2.4	21.0	37.0	41.8	SM
P-SA-PR-14	M1	1.6-2.00	Lleno antrópico (QII)	40.1	60.0	16.0	1.2	1.0	15.0	84.1	MH
P-SA-PR-14	M3	3.6-4.00	Lleno antrópico (QII)	38.5	37.0	7.0	-0.2	34.0	27.0	38.7	GM
P-SA-PR-14	M4	4.6-5.00	Lleno antrópico (QII)	37.7	46.0	7.0	1.2	23.0	15.0	62.4	ML
P-SA-PR-14	M7	7.6-8.00	Lleno antrópico (QII)	20.3	41.0	5.0	4.1	12.0	27.0	61.0	ML
P-SA-PR-14	M9	9.6-10.00	Lleno antrópico (QII)	44.1	47.0	13.0	0.2	0.0	28.0	71.5	ML
P-SA-PR-16	M2	2-2.30	Lleno antrópico (QII)	13.7	32.0	4.0	4.6	38.0	23.0	38.9	GM

Tabla 22. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	W [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-SA-PR-16	M5	4-4.30	Lleno antrópico (QII)	7.7	29.0	4.0	5.3	67.0	25.0	8.3	GP-GM
P-SA-PR-13	M6	6.5-7.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	27.8	46.0	15.0	1.2	20.0	34.0	45.4	SM
P-SA-PR-13	M7	7.5-8.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	36.3	43.0	12.0	0.6	3.0	35.0	61.6	ML
P-SA-PR-15	M2	2-2.50	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	24.6	41.0	10.0	1.6	13.0	39.0	47.5	SM
P-SA-PR-14	M11	11.6-12.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	39.2	55.0	14.0	1.1	2.0	20.0	77.8	MH
P-SA-PR-14	M12-M13	13.6-14.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	27.9	43.0	7.0	2.2	25.0	33.0	41.9	SM
P-SA-PR-14A	M1	1.6-2.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	33.3	51.0	12.0	1.5	0.0	5.0	94.6	MH
P-SA-PR-14A	M3	3.6-4.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	34.4	40.0			0.0	24.0	76.3	ML
P-SA-PR-14A	M7	7.6-8.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	21.4	57.0	28.0	1.3	77.0	16.0	6.7	GP-GC
P-SA-PR-15	M5	4.5-5.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	20.6	33.0	8.0	1.6	14.0	41.0	45.4	SM
P-SA-PR-15	M7	6.5-7.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.2	46.0	13.0	1.1	1.0	26.0	73.4	ML
P-SA-PR-15	M12	10-10.30	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	45.1	47.0	12.0	0.2	23.0	26.0	50.7	ML
U-SA-PP-05	M1-M2	0-0.90	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	34.5	55.0	13.0	1.6	3.0	23.0	74.5	MH
U-SA-PP-05	M3-M4	0.9-1.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	36.8	53.0	10.0	1.6	2.0	21.0	77.0	MH
U-SA-PP-05	M7	2.7-3.20	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.5	51.0	18.0	0.5	7.0	30.0	63.1	MH
U-SA-PP-05	M11-M12	4.5-5.40	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.0	50.0	13.0	1.5	23.0	30.0	47.4	SM
U-SA-PP-05	M14-M15	5.9-6.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	20.2	37.0	6.0	2.8	40.0	30.0	29.6	GM
U-SA-PP-07	M1-M2	0-1.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	44.4	57.0	11.0	1.2	0.0	8.0	92.1	MH
U-SA-PP-07	M4	1.4-1.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	38.6	51.0	10.0	1.2	0.0	9.0	90.6	MH
U-SA-PP-07	M6-M7	2.3-3.20	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	28.4	35.0			0.0	14.0	85.5	ML
U-SA-PP-07	M11-M12	4.5-5.40	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.6	53.0	22.0	1.0	6.0	32.0	61.6	MH
U-SA-PP-07	M14-M15	5.8-6.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	18.2	48.0	14.0	2.1	67.0	15.0	17.9	GM
P-SA-PR-13	M9	9-9.50	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	47.2	65.0	19.0	0.9	13.0	29.0	57.5	MH

Tabla 23. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S [%]
P-SA-PR-13	M4	4.5-5.00	Lleno antrópico	24.10	2.86	1.14	60.61
P-SA-PR-14	M1	1.6-2.00	Lleno antrópico (QII)	40.10	2.80	1.36	82.50
P-SA-PR-14	M3	3.6-4.00	Lleno antrópico (QII)	38.50			
P-SA-PR-14	M4	4.6-5.00	Lleno antrópico (QII)	37.70			
P-SA-PR-14	M7	7.6-8.00	Lleno antrópico (QII)	20.30			
P-SA-PR-14	M9	9.6-10.00	Lleno antrópico (QII)	44.10			
P-SA-PR-16	M2	2-2.30	Lleno antrópico (QII)	13.70			
P-SA-PR-16	M5	4-4.30	Lleno antrópico (QII)	7.70	2.92	0.89	25.22
P-SA-PR-13	M6	6.5-7.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	27.80			
P-SA-PR-13	M7	7.5-8.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	36.30			
P-SA-PR-15	M2	2-2.50	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	24.60			
P-SA-PR-14	M11	11.6-12.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	39.20			
P-SA-PR-14	M12-M13	13.6-14.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	27.90			
P-SA-PR-14A	M1	1.6-2.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	33.30	2.87	1.19	80.02
P-SA-PR-14A	M3	3.6-4.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	34.40			
P-SA-PR-14A	M7	7.6-8.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	21.40			
P-SA-PR-15	M5	4.5-5.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	20.60			
P-SA-PR-15	M7	6.5-7.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.20	2.85	1.14	77.72
P-SA-PR-15	M12	10-10.30	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	45.10			
U-SA-PP-05	M1-M2	0-0.90	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	34.50			
U-SA-PP-05	M3-M4	0.9-1.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	36.80	2.79	1.19	86.39
U-SA-PP-05	M7	2.7-3.20	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.50			
U-SA-PP-05	M11-M12	4.5-5.40	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.00			
U-SA-PP-05	M14-M15	5.9-6.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	20.20	2.93	1.02	57.98
U-SA-PP-07	M1-M2	0-1.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	44.40	2.81	1.33	94.04

Tabla 23. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S [%]
U-SA-PP-07	M4	1.4-1.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	38.60			
U-SA-PP-07	M6-M7	2.3-3.20	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	28.40			
U-SA-PP-07	M11-M12	4.5-5.40	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	31.60			
U-SA-PP-07	M14-M15	5.8-6.80	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	18.20	2.98	1.02	53.15
P-SA-PR-13	M9	9-9.50	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	47.20	2.71	1.48	86.59

Para el análisis de esta información se trazaron las gráficas que se presentan en la Figura 99 hasta la Figura 101. 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.

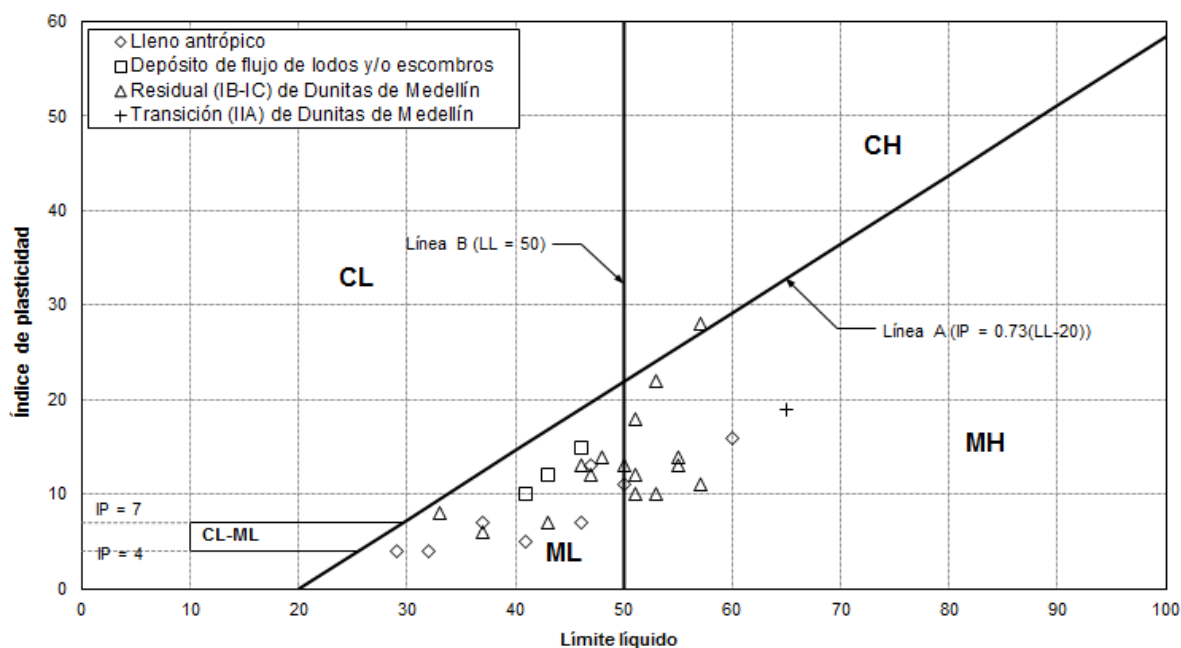


Figura 98. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande

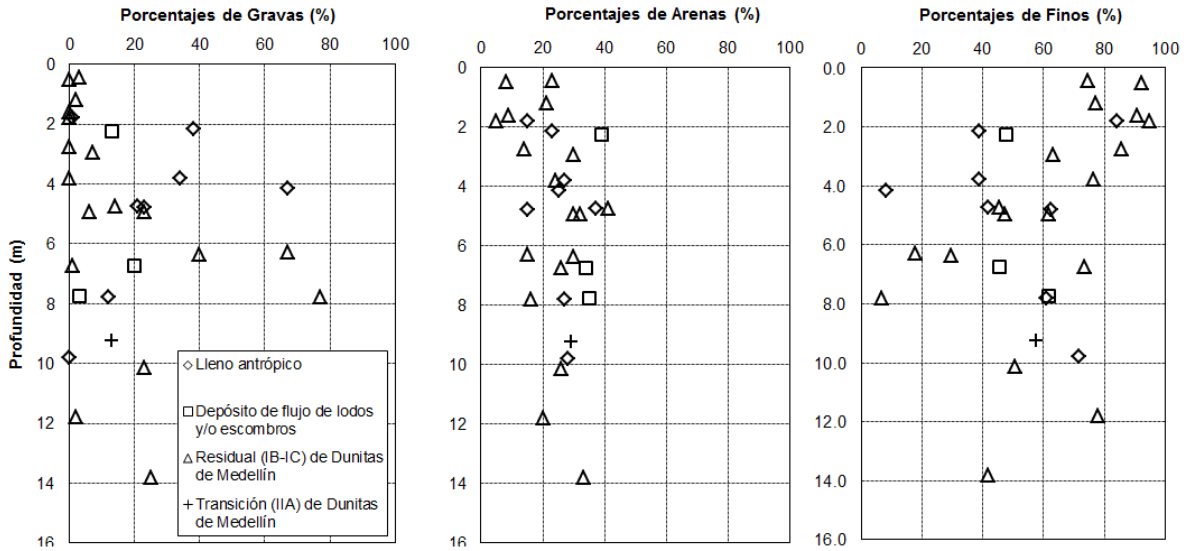


Figura 99. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad

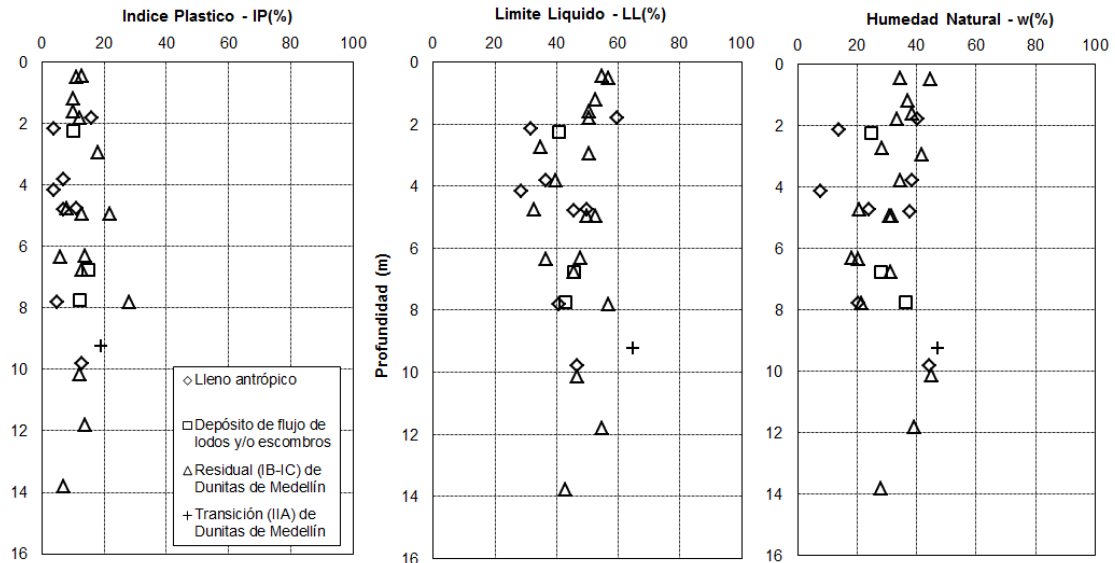


Figura 100. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.

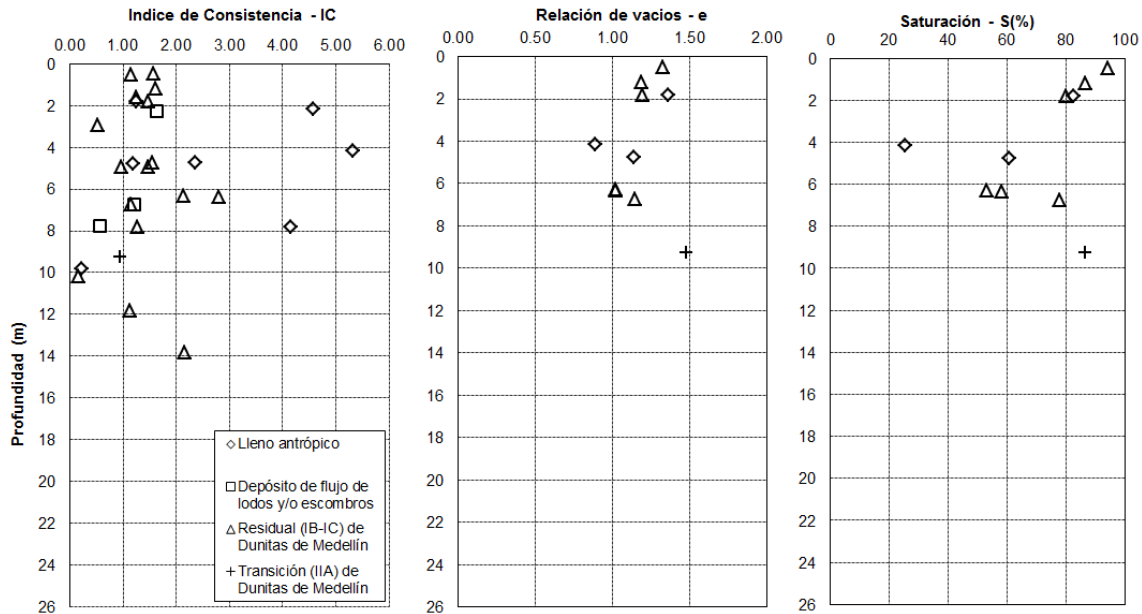
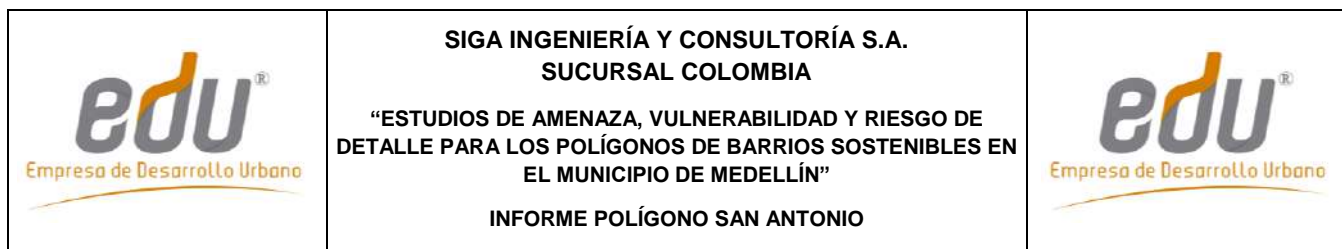


Figura 101. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad

En los llenos antrópicos se tiene alta heterogeneidad en cuanto a la granulometría, considerando que para la mitad de las muestras se tuvo predominancia de la fracción gruesa, mientras que en la restante predominó la fina. De acuerdo con lo anterior, para los llenos el contenido de gravas varía entre 0 % y 67 %, un contenido de arenas variando de 15 % a 37 % y una fracción fina del 8 % al 84 %. En general, la fracción fina de los llenos antrópicos caracterizados presenta límites líquidos por debajo de 50 % (izquierda de la línea B), límites plásticos variando entre 25 % y 44 %, e índices de plasticidad entre 4 % y 16 %, de manera que se está ante materiales poco plásticos. Por su parte, la gravedad específica de estos materiales es en promedio 2.9, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados en la composición del estrato, mientras que la relación de vacíos promedio tuvo un valor de 1.1. Por otra parte, la saturación de los materiales varía entre 25% y 82%. La consistencia de estos materiales varía de blanda a dura.

De acuerdo con lo anterior, los llenos antrópicos se caracterizan por ser materiales granulométricamente heterogéneos (varía de gravas a limos), lo cual es de esperarse debido a su mismo origen. La fracción fina de los mismos tiene un comportamiento parecido, puesto que en la mayoría de los casos clasificó como limo de baja plasticidad ML. Cabe resaltar, que este comportamiento puede relacionarse con algunas muestras de los suelos de depósito y residuales de la zona en cuanto a su plasticidad, lo cual es lógico pues los llenos suelen estar conformados por material de las zonas aledañas con elementos antrópicos como vidrios, adobes y plástico.

En los depósitos de flujos de lodos y/o escombros predominó la fracción gruesa, con un contenido del 3 % al 30 % de gravas, del 34 % al 39 % de arenas, y entre 45 % y 62 %



para los finos. La fracción fina de las muestras se caracterizó por tener un límite líquido promedio de 43 % (izquierda de la línea B), un límite plástico medio de 31 %, y un índice de plasticidad promedio de 12 %, quedando por debajo de la línea A. De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron como limos de baja plasticidad (ML), según el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos.

En los suelos residuales (IB-IC) de Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido entre 7 % y 95 % de finos, 5 % a 41 % de arenas y 0 % a 77 % de gravas. La fracción fina de la mayoría de las muestras presentó límites líquidos variando de 33 % a 57 % (ambos lados de la línea B), límites de plasticidad entre 25 % y 46 %, e índices de plasticidad variando de 6 % a 28 % (debajo de la línea A). De acuerdo con lo anterior, la mayoría de las muestras analizadas clasificaron como limos de alta plasticidad (MH) y baja plasticidad (ML), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos. La gravedad específica de los materiales varía de 2.8 a 3.0, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, se tienen relaciones de vacíos entre 1.0 y 1.3, mostrando que se tienen materiales porosos, con saturaciones medias de 75%, así como consistencias duras en la mayoría de los casos.

En la matriz de la Transición IIA de Dunitas predominó la fracción fina con un 57% de finos, 29% de arenas y 13% de gravas. El límite líquido tiene un valor de 65 (a la derecha de la línea B), el límite plástico es de 46, obteniendo un índice plasticidad de 19 (debajo de la línea A), de manera que el material clasifica como un limo de alta plasticidad (MH), de acuerdo con el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos.



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. En el Polígono San Antonio se pudieron ejecutar siete ensayos de corte directo modalidad CD.

- ✓ Una muestra P-SA-PR-16-M1, a 1.45 m de profundidad en lleno antrópico.
- ✓ Una muestras P-SA-PR-13-M8, a 8.80 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.

 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

- ✓ Una muestra P-SA-PR-18-M2, a 3.30 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Una muestra U-SA-02-M1, a 0.80 m de profundidad, extraída de la estación KGL-01-SA en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Una muestra P-SA-PR-15-M6, a 6.00 m de profundidad en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.
- ✓ Una muestras U-SA-PP-05-M6, a 2.70 m de profundidad en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.
- ✓ Una muestra U-SA-01-M1 a 1.0 m de profundidad, extraída de la estación KGL-08-SA en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.

En la Tabla 24 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 102 a la Figura 108 se presentan las envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras tomadas en la UMI San Antonio.

Tabla 24. Resultados ensayos de corte directo modalidad CD

Sondeo - Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	γ_h [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	G _s	e	S [%]	c' [kPa]	ϕ' [°]
P-SA-PR-16-M1	1.45	Lleno Antrópico	36.7	16.0	11.7	2.90	1.44	74.00	47.00	23.00
P-SA-PR-13-M8	8.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	29.0	17.4	13.2	2.71	0.99	82.00	26.00	22.00
P-SA-PR-18-M2	3.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	34.0	17.6	12.8	2.93	1.12	85.00	17.00	24.00
U-SA-02-M1 (KGL-01-SA)	0.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	30.0	17.2	13.2	2.92	1.15	75.00	34.00	26.00
P-SA-PR-15-M6	6.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	18.5	20.2	17.2	2.85	0.64	83.00	33.00	24.00
U-SA-PP-05-M6	2.70	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	45.0	16.3	11.2	2.79	1.43	89.00	28.00	24.00
U-SA-01-M1 (KGL-08-SA)	2.50	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	36.0	15.0	10.8	3.12	1.76	77.00	35.00	25.00

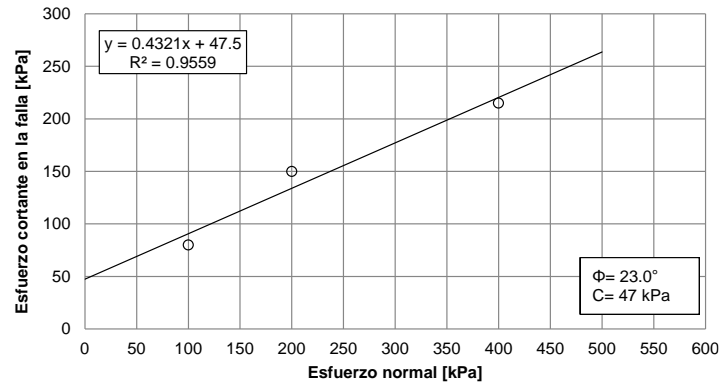


Figura 102. Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-16-M1a 1.45 m de profundidad

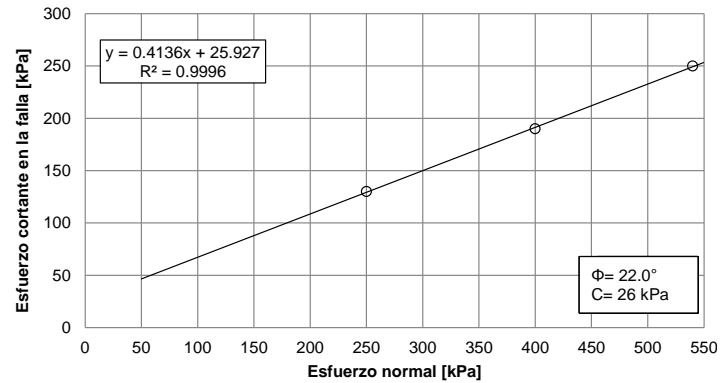


Figura 103. Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-13-M8 a 8.80 m de profundidad

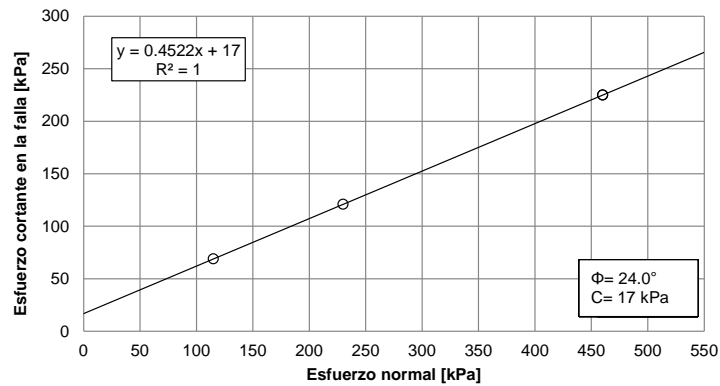


Figura 104. Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-18-M2 a 3.30 m de profundidad

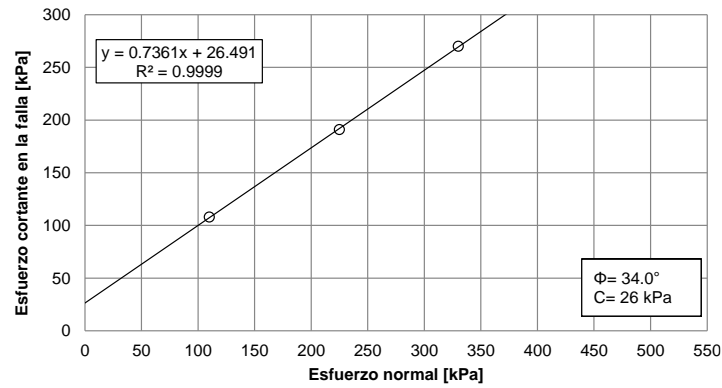


Figura 105. Resultados corte directo Muestra U-SA-02-M1 a 0.80 m de profundidad

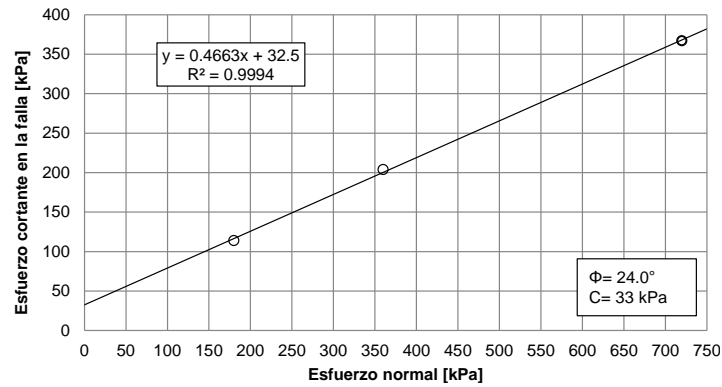


Figura 106. Resultados corte directo Muestra P-SA-PR-15-M6 a 6.00 m de profundidad

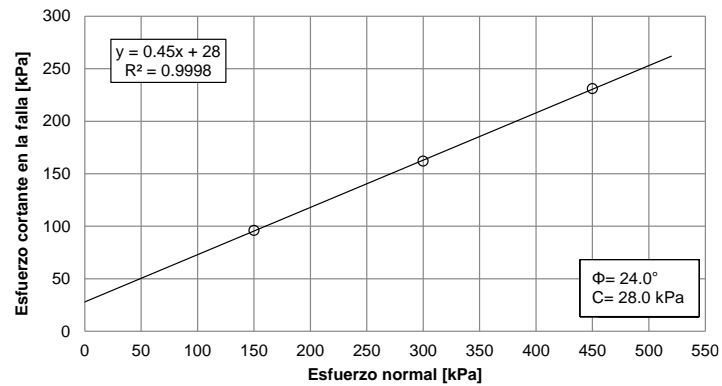


Figura 107. Resultados corte directo Muestra U-SA-PP-05-M6 a 2.70 m de profundidad

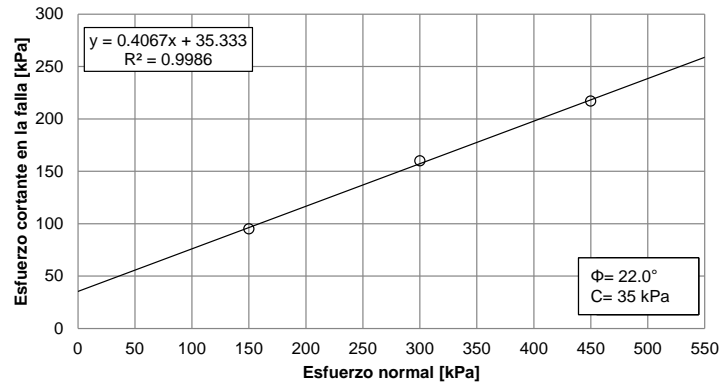


Figura 108. Resultados corte directo Muestra U-SA-01-M1 a 1.00 m de profundidad

10.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES

10.3.1 Aspectos generales

Como parte del proceso de caracterización de los materiales, fueron recopilados todos los ensayos de resistencia al corte realizados en la zona de interés. Los ensayos de resistencia al corte considerados de los diferentes estudios, fueron aquellos ejecutados bajo modalidad drenada o en su defecto no drenada con medición de presiones de poros, de tal forma que se pudieran obtener los parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas. Los estudios de los consultores que cumplieron las características anteriores fueron los de las empresas DEACIVIL (2014), GEOCING S.A.S (2012) y además los ensayos de resistencia al corte ejecutados por el Poryecto en proyectos cercanos a la zona de estudio y ensayos propios del proyecto.

Los resultados de los ensayos de laboratorio recopilados y compilados fueron inicialmente clasificados al interior de la base de datos de acuerdo con la formación geológica asociada. La base de datos presenta adicionalmente información como localización, sitio al cual se le podría asociar para este proyecto, identificación y profundidad de la muestra y finalmente los parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas (cohesión efectiva, ángulo de fricción interna efectiva y peso unitario húmedo).

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.

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 110.

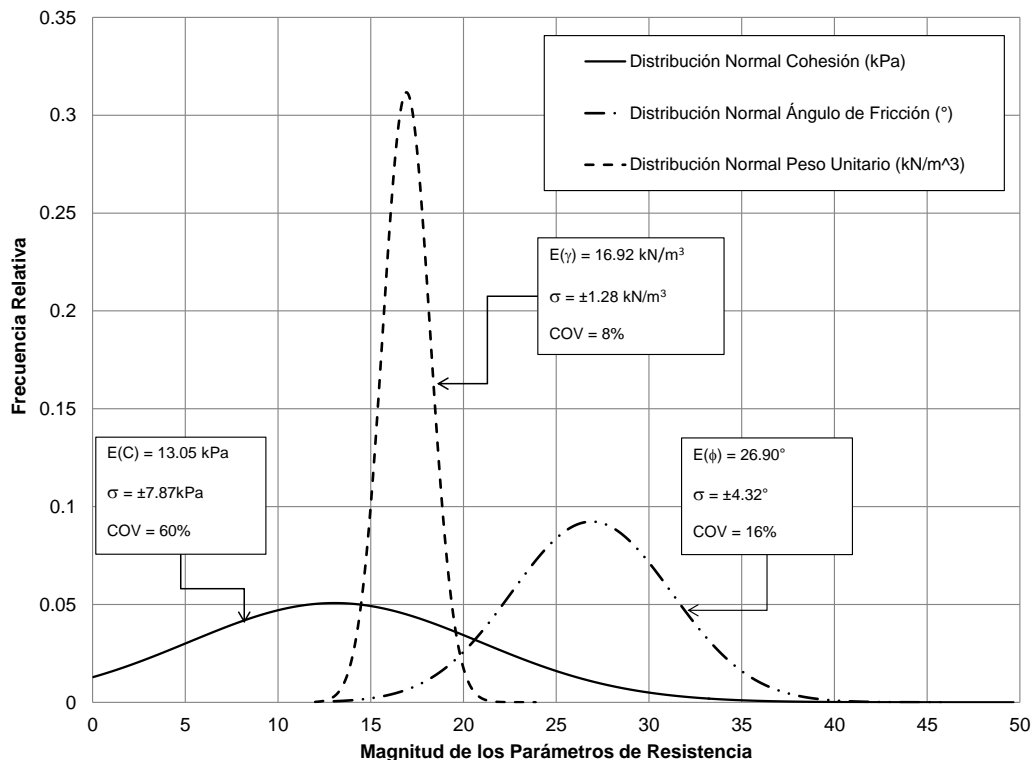




Figura 109. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico

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 $\pm 7.87 \text{ kPa}$. 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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

- ✓ 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 .

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 110.

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 $\pm 13.87 \text{ kPa}$. 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 .

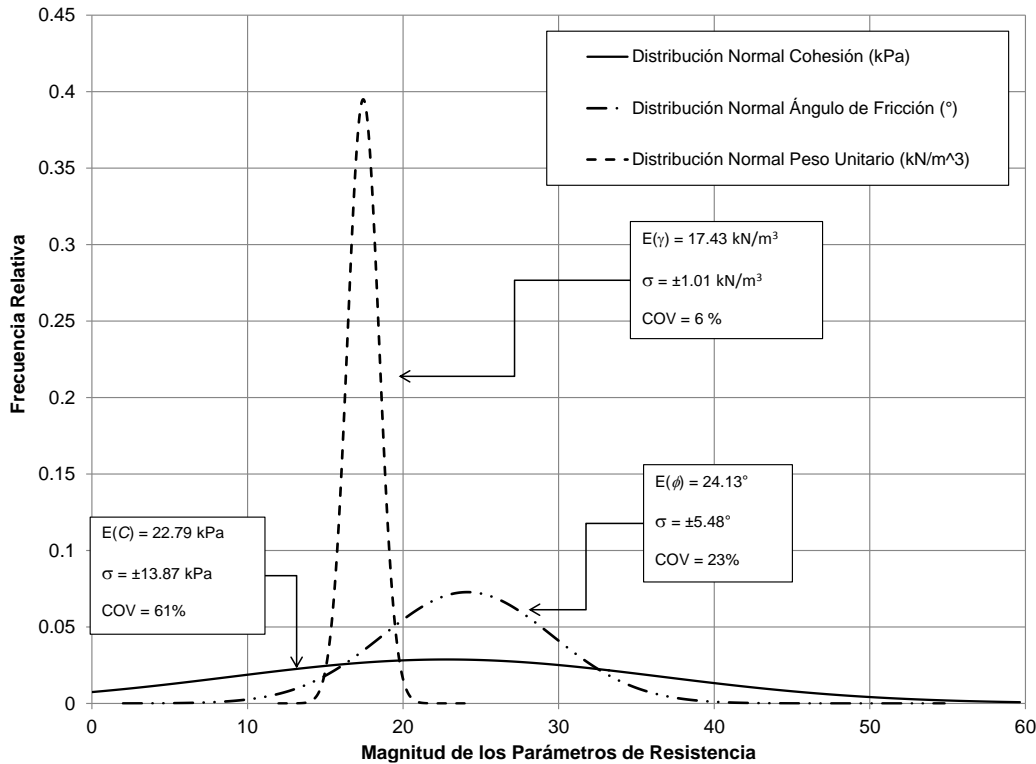


Figura 110. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente

10.3.4 Depósitos de deslizamiento

Para determinar los parámetros de resistencia al corte de este material, se optó en primera instancia por tener en cuenta los resultados de los ensayos de resistencia al corte de los estudios realizados por el Proyecto, determinando para estos ensayos los parámetros de resistencia residual. Se obtuvo así un valor de ángulo de fricción interna promedio de 24° y una cohesión promedio de 16 kPa.

A partir de esta información se hicieron análisis de tipo regresivo. Para el análisis se consideró una sección donde aflora el depósito de deslizamiento. Se establece que presenta condiciones de estabilidad bajas representadas por factores de seguridad no mayores que 1.2. Los resultados de los análisis de estabilidad efectuados se presentan en la Figura 111.

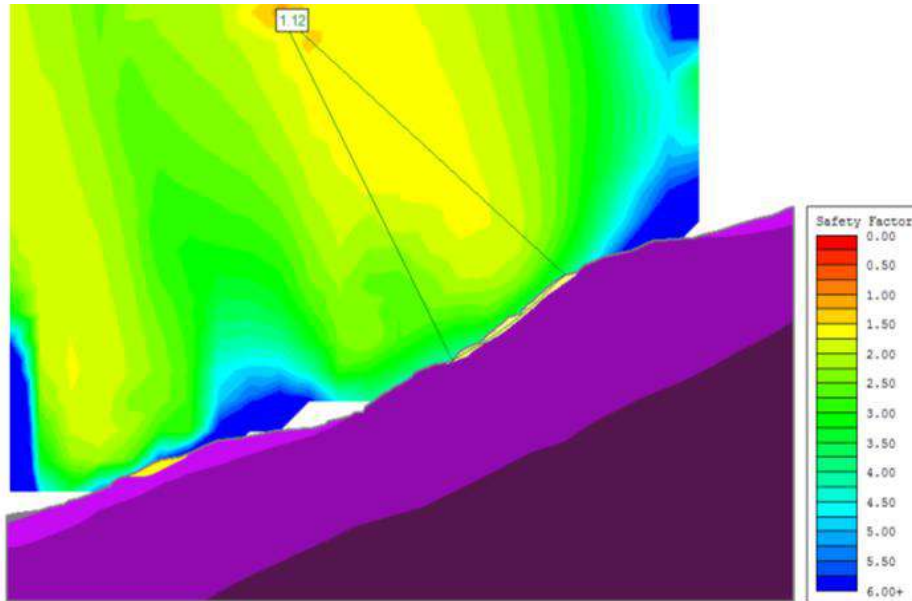


Figura 111. Análisis de estabilidad de talud estable

Para estos análisis de estabilidad se utilizó el programa SLIDE V6 (Rocscience, 2006). El programa resuelve problemas bidimensionales por el método del equilibrio límite, utilizando entre otros métodos los propuestos por Bishop, Spencer y Morgenstern-Price, para superficies de falla circulares y no circulares. Permite considerar variaciones de los niveles piezométricos (construyendo las redes de flujo por el método de los elementos finitos), distribuciones de presión de poros y variación de los coeficientes de la relación de presión de poros. Adicionalmente, permite estimar la probabilidad de falla al asignar valores promedio y desviación estándar a cada una de las propiedades de los materiales asociados a la superficie de deslizamiento. Se empleó la teoría de Spencer asumiendo una función de fuerza interdovelas de constante a media altura, debido a que esta satisface todas las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos.

Se puede observar que efectivamente, el factor de seguridad para la superficie de falla más crítica tiene un valor cercano a 1.1. Por lo tanto se concluye que los parámetros obtenidos representan las condiciones de campo.

10.3.5 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 110.

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/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

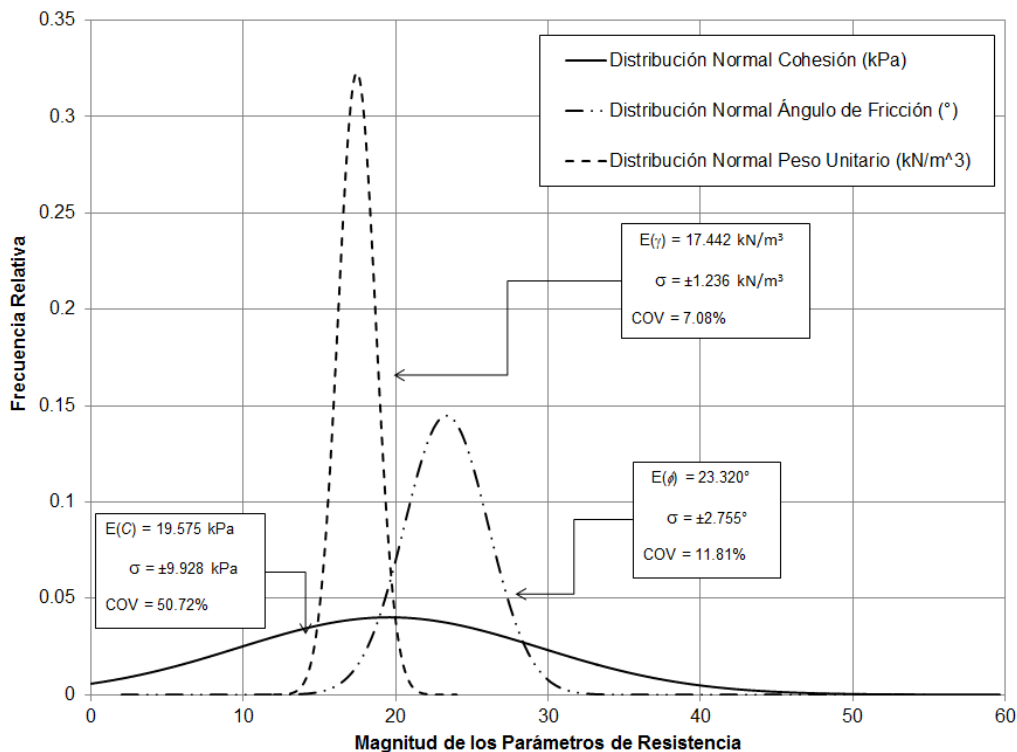


Figura 112. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos

10.3.6 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 113.

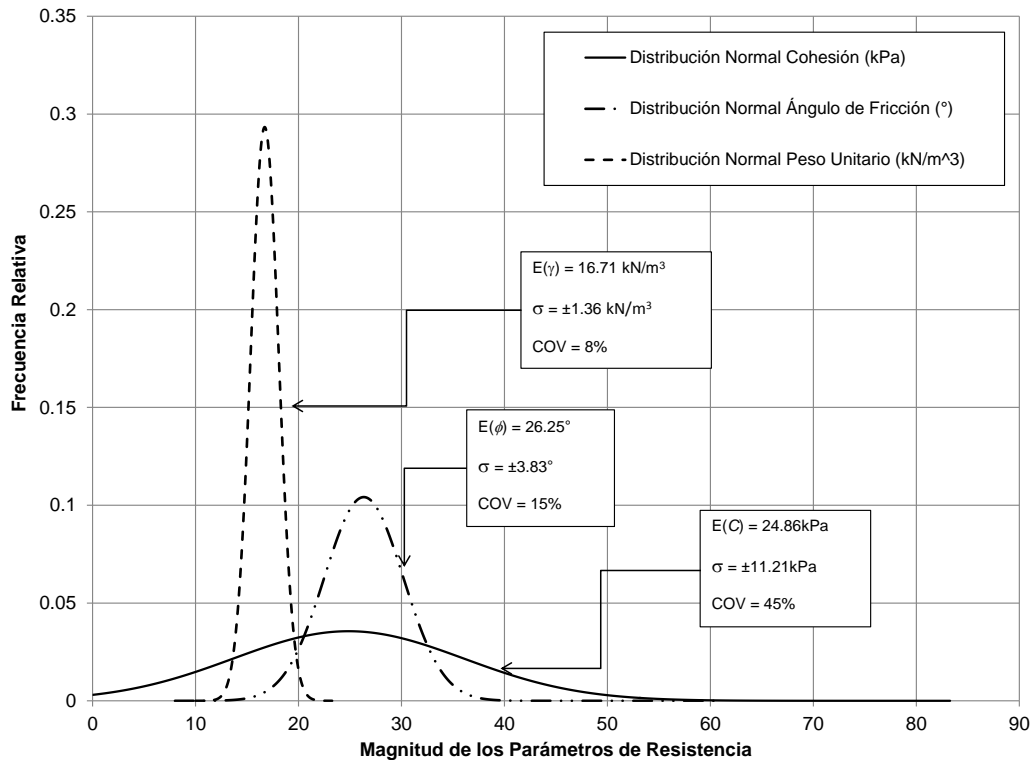


Figura 113. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas

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 ±11.21kPa. 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 ±3.83°. 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.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del residual de la Dunita de Medellín presentó una media de 16.7 kN/m³ con una desviación estándar asociada de ±1.43 kN/m³. 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/m³ hasta 21 kN/m³.

10.3.7 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el Batolito Antioqueño se presenta en la Figura 114.

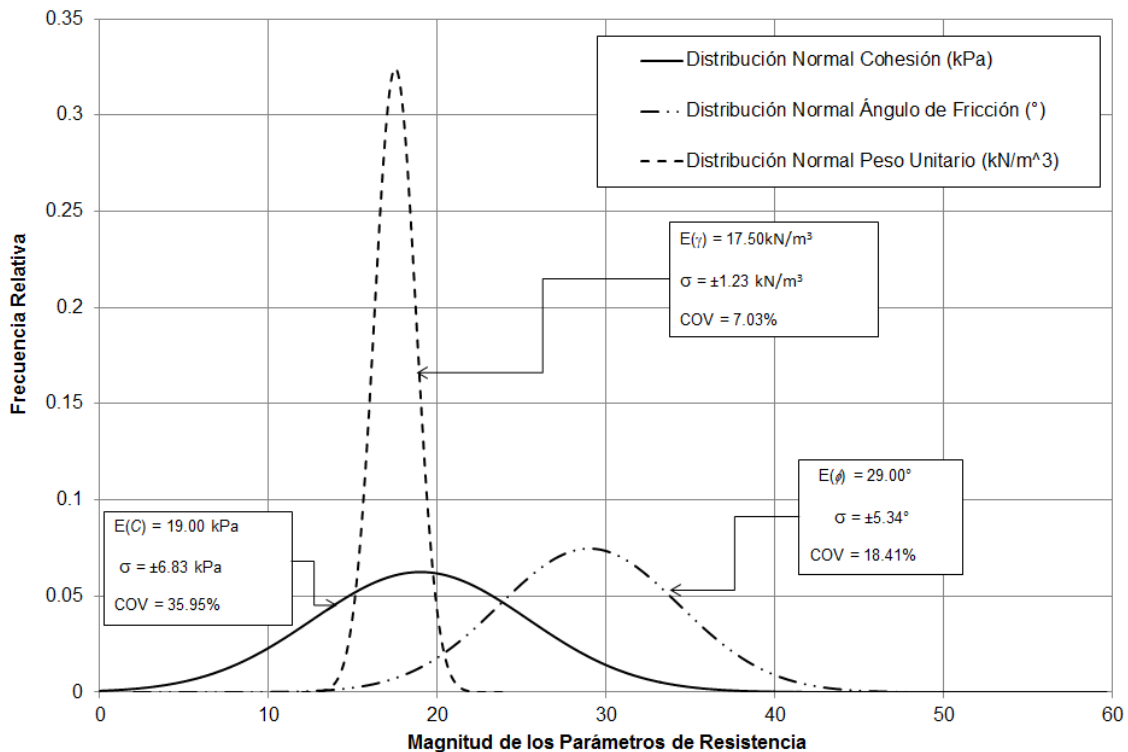


Figura 114. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados del Batolito Antioqueño

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 ± 6.83 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/m³ con una desviación estándar asociada de ±1.23 kN/m³. El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.03%.

10.3.8 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte



En la Tabla 25 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

Tabla 25. 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 (%)
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
Batolito Antioqueño	19.00	6.83	36	29.00	5.34	18	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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 describe y caracteriza desde el punto de vista hidrológico las cuencas de drenaje natural que tienen influencia sobre el Polígono San Antonio, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la Unidad Morfodinámica Independiente San Antonio. 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.
- ✓ Topografía de detalle levantada a lo largo de los ejes de los cauces en Abril de 2015.

Las zonas cubiertas por cada una de las cartografías empleadas en el estudio se pueden observar en el Mapa 23. 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
--	---	--

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.

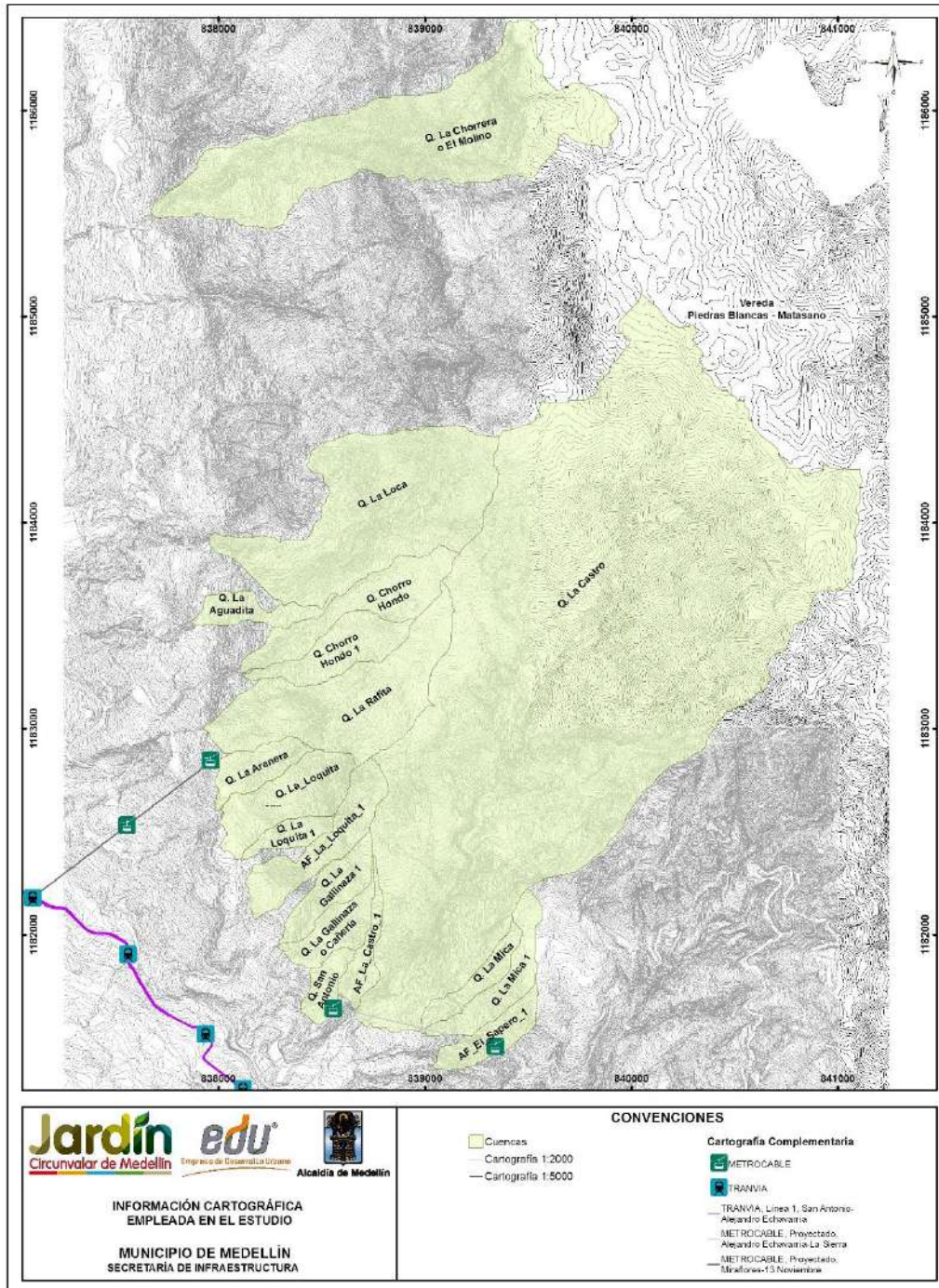
Adicionalmente, se recopiló información de las estaciones hidrometeorológicas de las estaciones pluviométricas y pluviográficas que se encuentran ubicadas en la zona de estudio o cerca de ella. En particular, se recopiló la siguiente información:

- ✓ 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.



Mapa 23. Información cartográfica empleada en el estudio
(SATInformacionCartograficaEmpleadaenelEstudio_Medellin_C)

11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

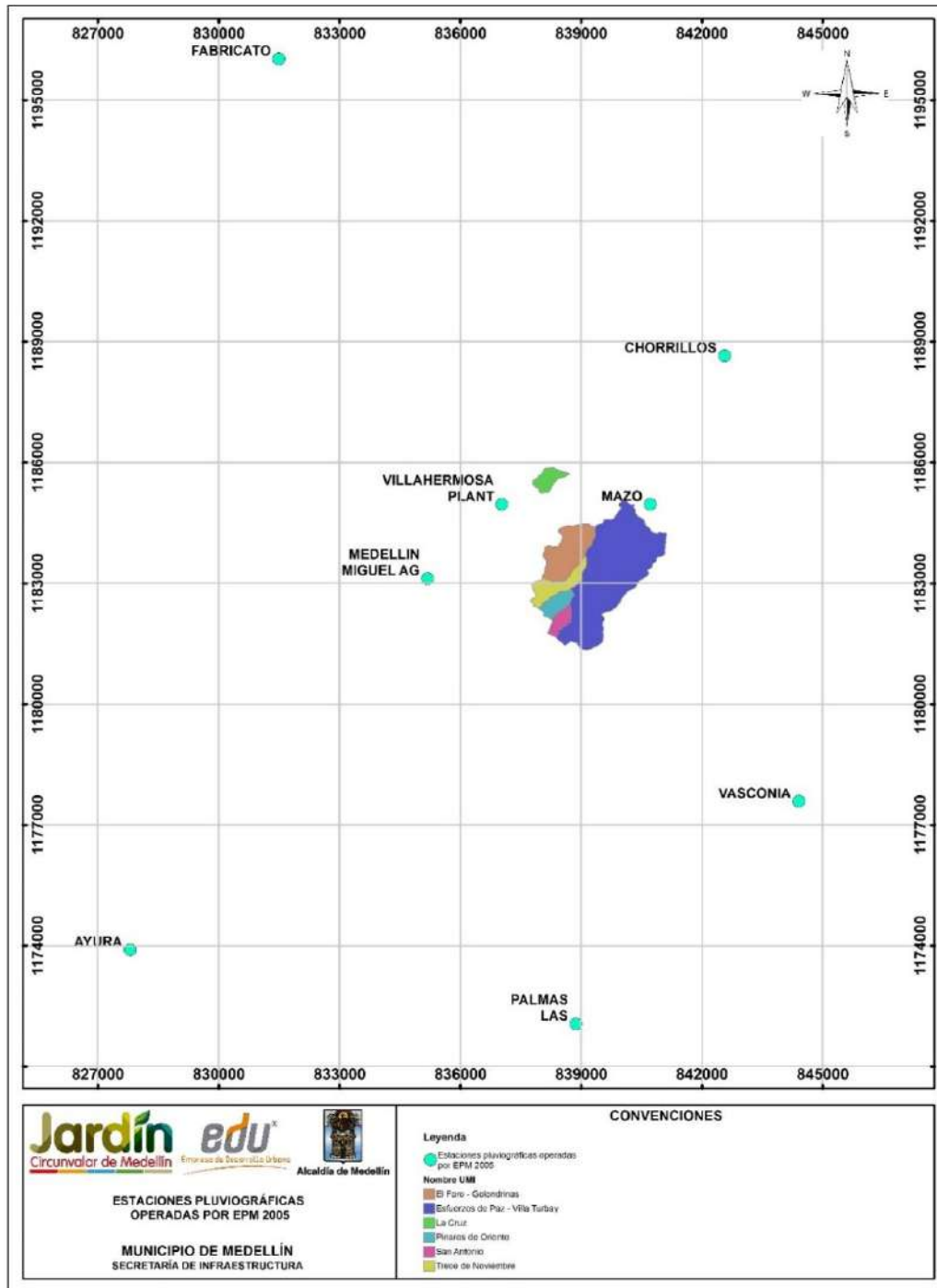
En la zona de estudio o cerca de ella se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 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 26 se presenta un listado de las estaciones consideradas y en el Mapa 24 se muestra la ubicación de estas con respecto a la zona de estudio.

Tabla 26. 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 26). En el Anexo 3 (Figura 1) se muestra el mapa con la variación de la precipitación media multianual.



Mapa 24. Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005
(SATEstacionesPluviograficasOperadasEPM2005_Medellin_C)

11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 115 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 115 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.

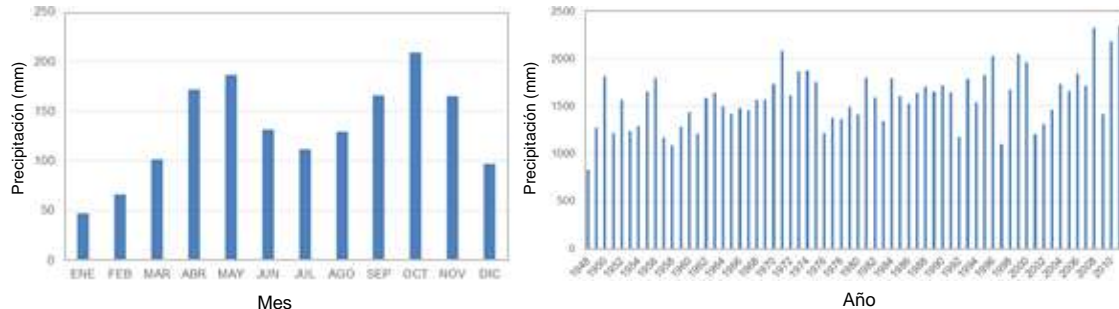


Figura 115. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa

11.3.2 Estación Mazo

En la gráfica a la izquierda de la Figura 116 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Mazo para el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella 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 116 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 de 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 116, se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Miguel de Aguinaga para el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella 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 117, 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, durante ese año se presentó el fenómeno de La Niña.

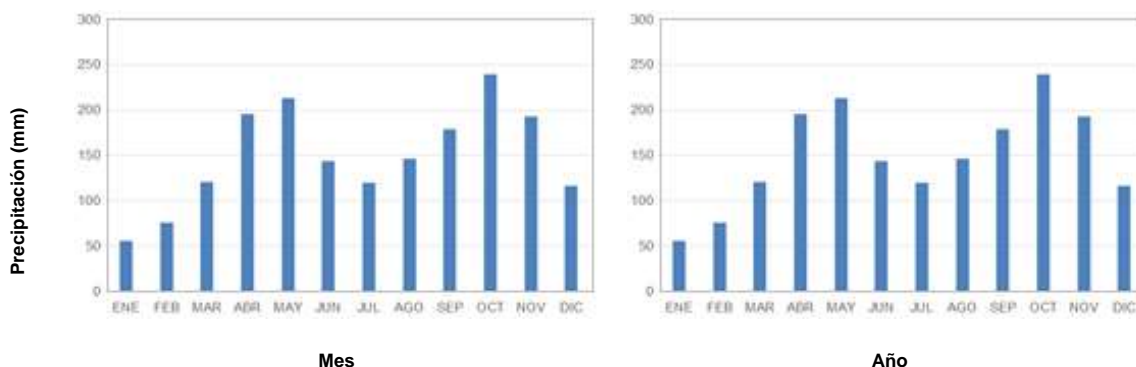


Figura 116. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo

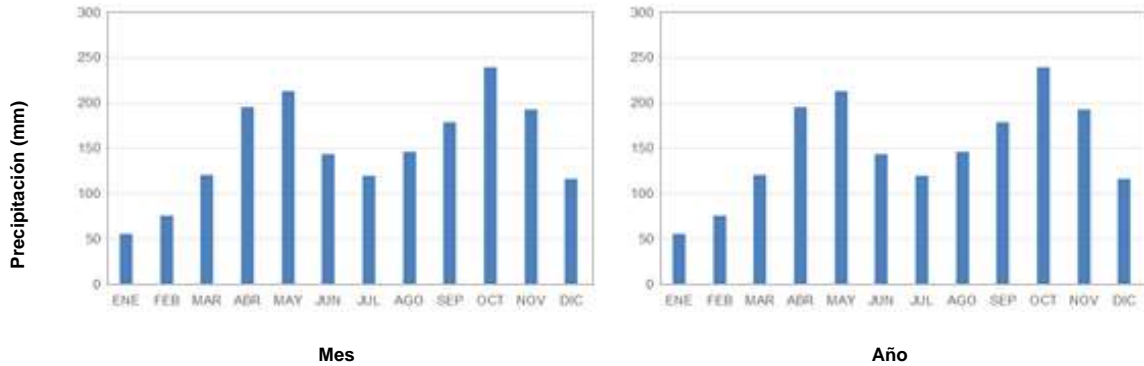


Figura 117. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga

A partir del análisis de las estaciones citadas, puede concluirse que 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.

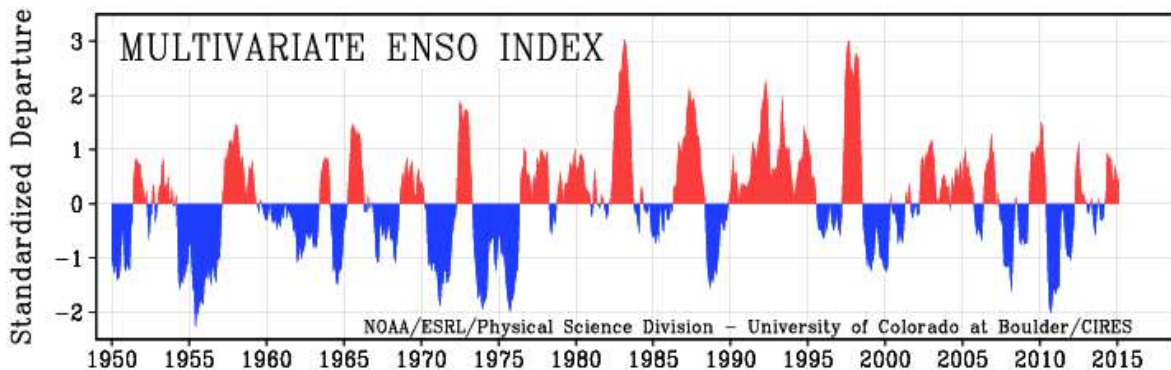




Figura 118. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)

11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

En el Mapa 25 se presenta la red hídrica de la UMI San Antonio y en el Mapa 26 se presenta esta misma red de drenaje de la zona de estudio y las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el polígono.

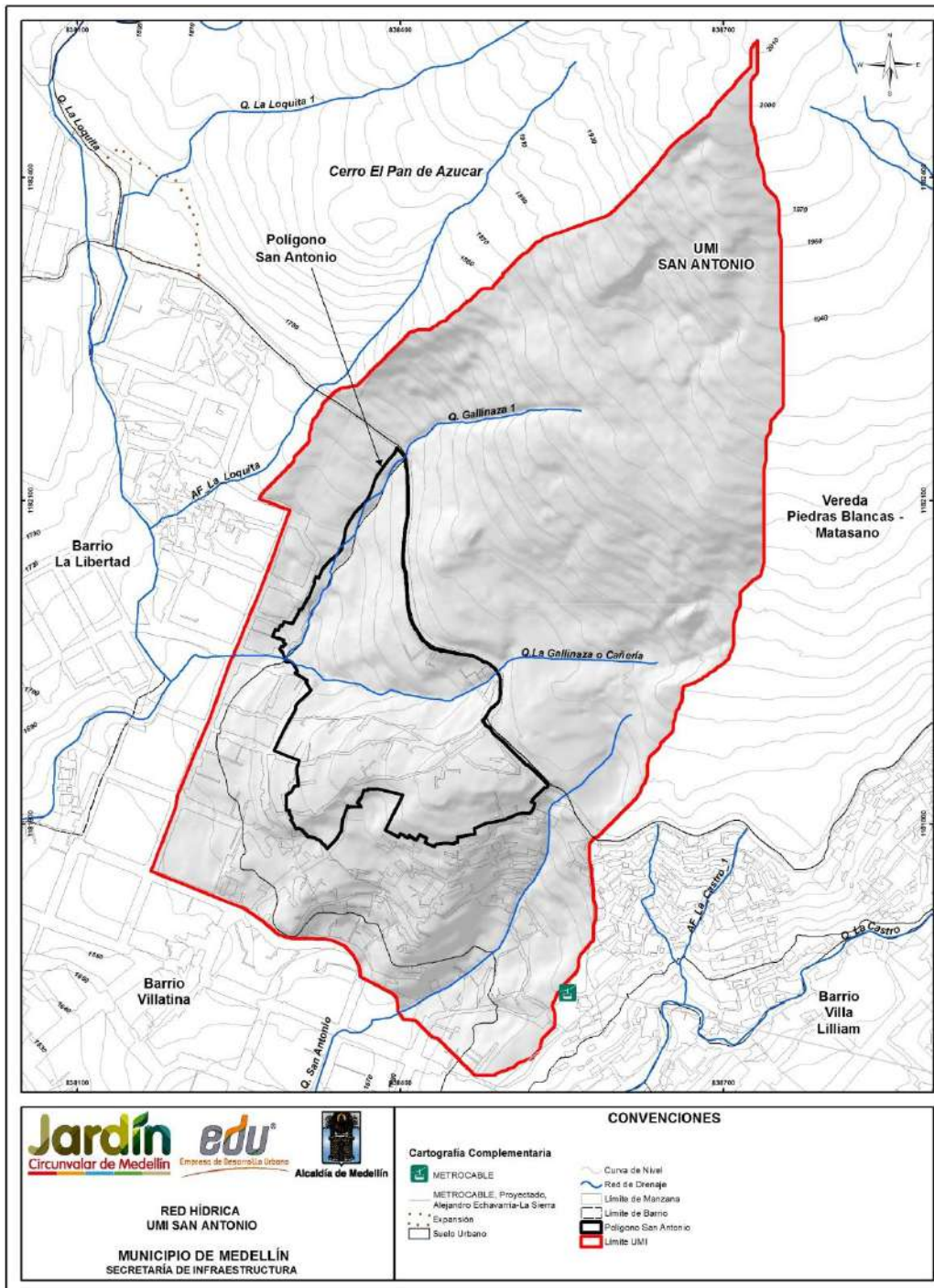
Esta red fue establecida a partir del modelo digital del terreno generado con la información cartográfica, incluyendo los cauces naturales que tienen influencia sobre cada uno de los ocho polígonos de interés para el presente estudio. Se sometió a revisión y validación con respecto a la red hídrica del 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

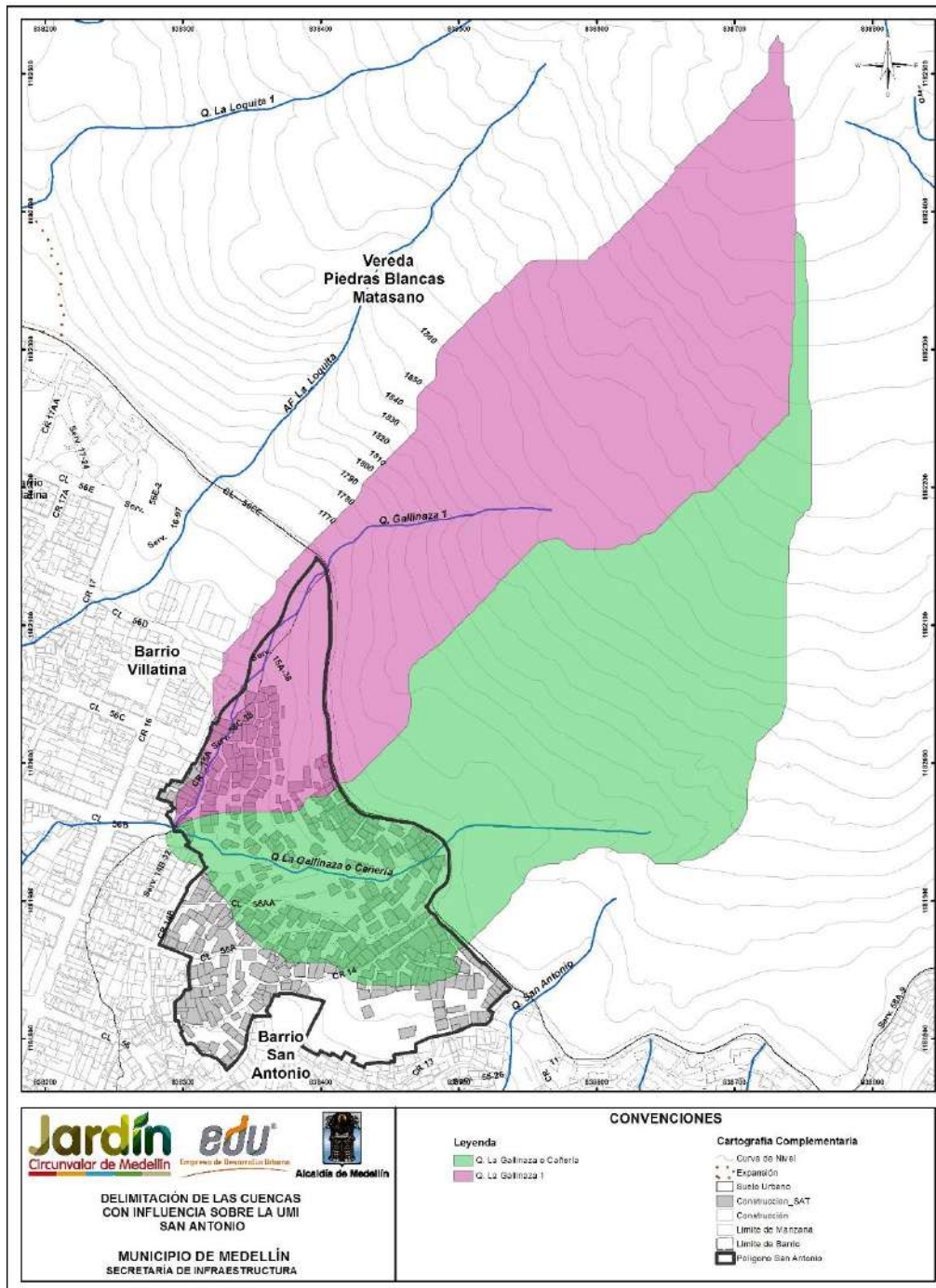
estudio. Por esta razón se decide adoptar la red hídrica del POT como base para la elaboración del presente estudio.

En particular para el Polígono y para la UMI de San Antonio, las corrientes naturales que tienen influencia corresponden a la Quebrada Gallinaza y la Quebrada Gallinaza 1. La primera corre por la zona central del polígono, y la segunda corre por la zona norte del polígono.

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 San Antonio, las cuales fueron nombradas de acuerdo con la corriente a la cual pertenecen. El punto de delimitación de las cuencas corresponde al punto más bajo de la corriente al interior de la UMI.



Mapa 25. Red hídrica de la UMI San Antonio
 (20_SATRedHidricaUMI_Medellin_C y 20_SATRedHidricaUMI_Medellin_T)



Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI San Antonio (SATDelimitacionCuencasUMI_Medellin_C)

Para el trazado de la cuenca de la Quebrada La Gallinaza, se tiene en cuenta un trasvase hecho desde la quebrada San Antonio hacia esta, el cual se hace mediante una red de canales localizados en el extremo oriental del Jardín Circunvalar (Figura 119).



Figura 119. Red de canales (Trasvase Quebrada La Gallinaza) (Fuente Google Earth)

El trasvase hecho desde la cuenca de la Quebrada San Antonio hacia la Quebrada La Gallinaza se hace por una red de canales cuyo alineamiento se muestra en la Figura 119, estos canales transportan el agua a un sistema de alcantarillado el cual descarga sus aguas en la obra de cruce localizada sobre la Carrera 56 EE.

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. En la Tabla 28 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 27. Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	X	Y
7	San_Antonio	Q. La Gallinaza o Cañería	838282.50	1181960.14
8	San_Antonio	Q. Gallinaza 1	838288.67	1181970.14

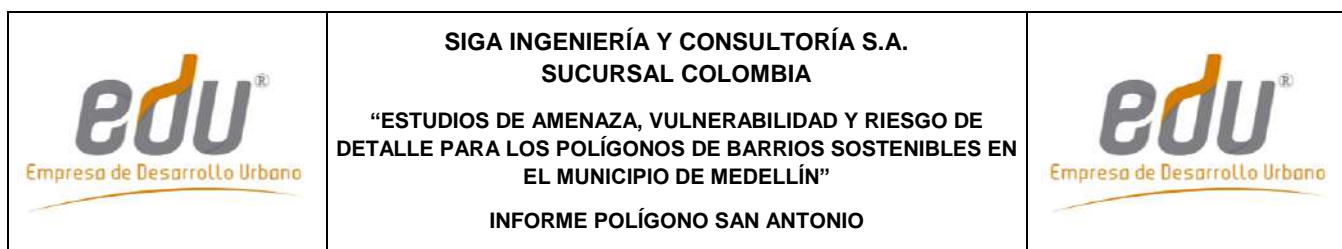


Tabla 28. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en San Antonio

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 Gallinaza	89324.30	45.67	1741.85	1807.24	1975.92	1696.26	628.01	138.13	850.69	31.50
Q. Gallinaza 1	88394.82	53.92	1648.26	1873.75	2011.67	1699.07	712.14	124.13	849.57	35.61

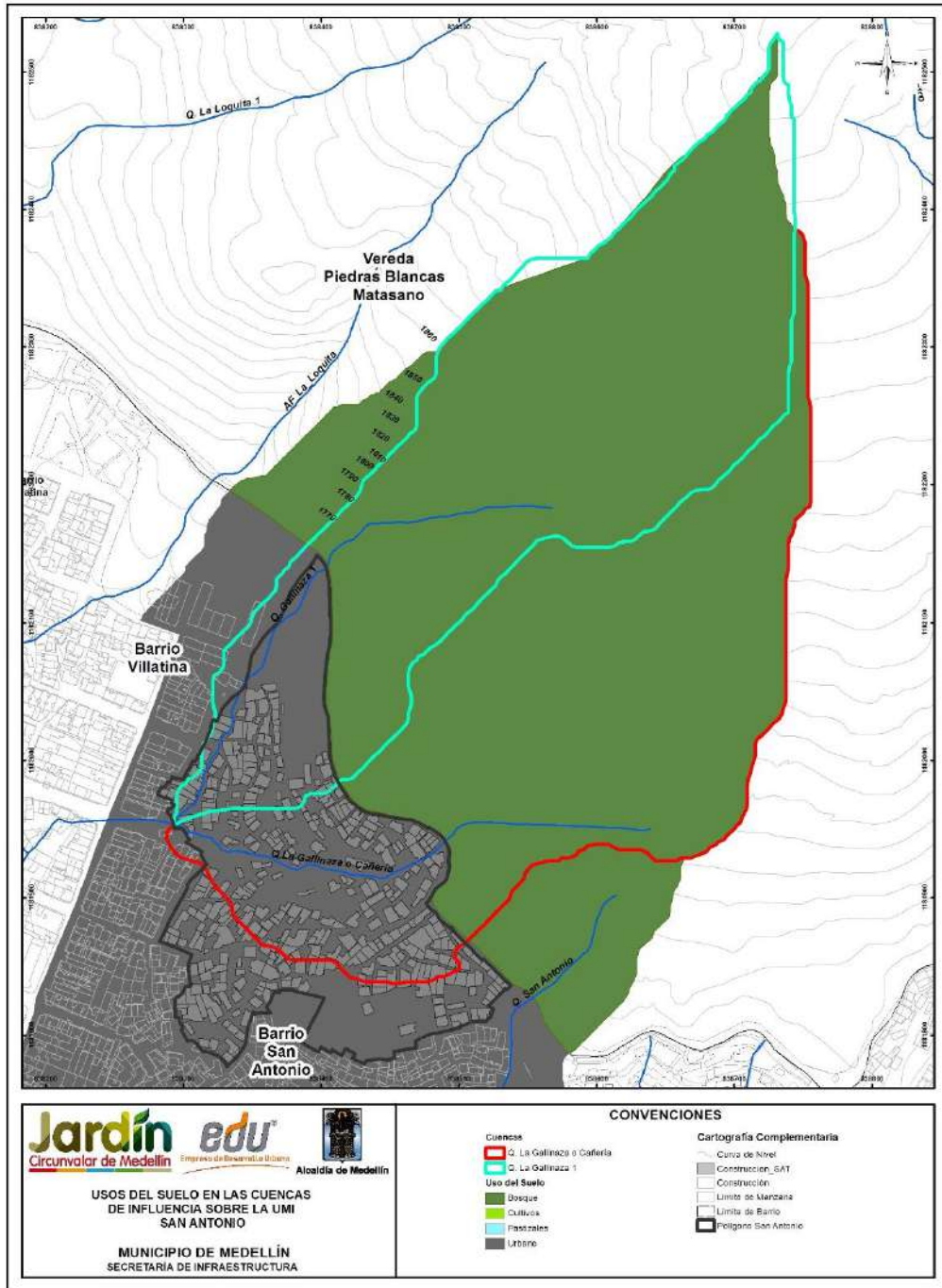
Para determinar la pendiente media de la cuenca se generó un mapa de pendientes a partir del MDT de la zona de estudio, teniéndose así un mapa en formato raster en el cual se tiene un valor de pendiente para cada pixel. La pendiente media de la cuenca será determinada como el promedio de los valores 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 que es indicada en el POT (2014) y la cual es presentada en los Mapas del Atlas 14_SATClasificaciondelSuelo_Medellin_T al 17_SATUsosdelSueloRural_Medellin_T para la UMI San Antonio. Esta información es retomada en este apartado en el Mapa 27, en el cual se ha realizado una reclasificación en términos de los tipos de coberturas o usos del suelo con fines del cálculo hidrológico. 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 que al respecto es indicada en el POT (2014). En la Tabla 29 se 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 (2010). Pudo constatar que en la zona rural existen algunas diferencias de asignación al uso del suelo entre la ortofoto (2010) y el POT (2014), pero todas las 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 fuente 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 que para las corrientes analizadas una relativa baja intervención antrópica de las cuencas, aspecto que se puede ver en la Tabla 29 ya que para las cuencas de las quebradas La Gallinaza o Cañería, y Gallinaza 1 se tienen áreas urbanas del 23% y el 15% sobre el total del área de cada cuenca respectivamente.



Mapa 27. Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI San Antonio Modificado del POT (2014) (SATUsosSuelosCuencasUMI_Medellin_C)

Tabla 29. Usos del suelo en las cuencas de influencia en San Antonio

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Cultivos	Pastizales	Bosques	Urbano
	Forestal productor	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. La Gallinaza o Cañería	0.00%	0.00%	76.9%	23.1%
Q. Gallinaza 1	0.00%	0.00%	85.2%	14.8%

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 modelos propuestos por diferentes autores, los cuales se encuentran en función de los características morfológicas de la cuenca.

En la Tabla 30 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 31 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono San Antonio.

Tabla 30. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parametros
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)

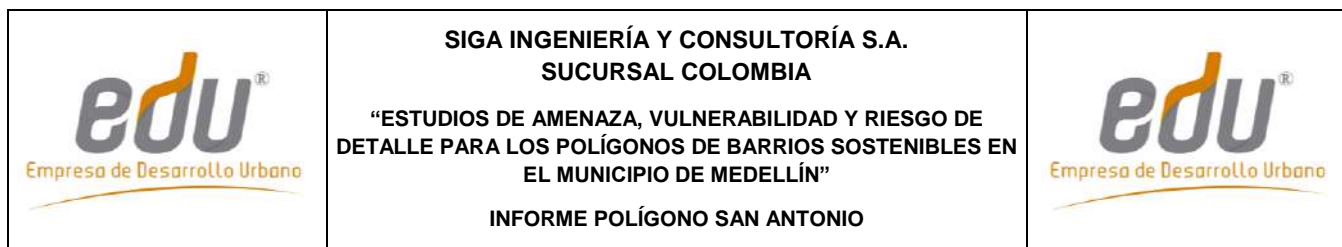


Tabla 31. Tiempos de concentración calculados para las cuencas

Nombre cuenca	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrin	Clark	California Culvert Practice	Passini	California USBR	Giandotti	Promedio	Desv. Est.	Lim Sup.	Lim. Inf.	Promedio	Tc tomado
Q. La Gallinaza o Cañería	5.5	8.3	18.4	18.0	6.6	3.8	4.8	5.5	11.2	9.1	5.6	14.7	3.6	6.5	6.5
Q. Gallinaza 1	5.2	8.2	17.6	18.1	6.5	4.2	4.6	5.2	10.6	8.9	5.5	14.4	3.5	6.4	6.4

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 32 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 3 (Tabla 1).

Finalmente, en la Tabla 33 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono.

Tabla 32. 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 33. Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR 2.33	TR 10	TR 50	TR 100
Q. La Gallinaza o Cañería	97.35	153.82	209.75	233.24
Q. Gallinaza 1	97.88	154.80	211.24	234.95

11.5.2 Método Racional

Este método es uno de los de mayor empleo debido a su sencillez. Presenta validez para para cuencas de área pequeña, inferior a 3 km², ya que uno de sus supuestos es que la intensidad de la precipitación es uniforme sobre toda la cuenca. 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 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 03 (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 34.

Tabla 34. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca

Nombre Cuenca	Coeficientes de Escorrentía (Adimensional)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Gallinaza o Cañería	0.44	0.51	0.58	0.62
Q. Gallinaza 1	0.41	0.47	0.55	0.55

11.5.3 Hidrogramas sintéticos

Dentro de las metodologías propuestas se tienen las de Williams y Hann, 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 San Antonio 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 Williams y Hann

J. R. Williams y R. W. Hann propusieron en la década de los 70 un modelo para calcular el hidrograma unitario de una cuenca. El modelo emplea las principales características geomorfológicas de la cuenca y las representa mediante dos parámetros, K y T_p , constante de recesión y tiempo al pico respectivamente, parámetros que fueron obtenidos mediante una regresión sobre una muestra de 34 cuencas ubicadas en los Estados

Unidos, la cuales tienen áreas que varían entre 0,5 y 25 millas cuadradas. Las expresiones empleadas para calcular estos parámetros son las siguientes:

$$T_p = 4.63 \cdot A^{0.422} \cdot SLP^{-0.46} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.133} \quad K = 27 \cdot A^{0.231} \cdot SLP^{-0.777} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.124}$$

$$Q_p = \frac{(B \cdot A \cdot R)}{896.99} T_p$$

Donde T_p es el tiempo al pico (horas), A es el área de la cuenca (km^2), SLP es la relación entre la diferencia de cotas en la microcuenca y la longitud del cauce principal (pie/milla), L/W es la relación longitud/ancho de la microcuenca, equivalente a la relación entre la longitud al cuadrado y el área (L^2/A), Q_p es el caudal máximo del hidrograma unitario (m^3/s) y R es la profundidad unitaria efectiva asociada con la hidrógrafa, igual a 1 mm.

El Parámetro B empleado para el cálculo del caudal máximo es función de una constante n , la cual depende de la relación entre la constante de recesión (K) y el tiempo al pico (T_p) (Vélez y Smith, 1997).

$$n = 1 + \left\{ \frac{1}{2(K/T_p)} + \left[\frac{1}{4(K/T_p)^2} + \frac{1}{4(K/T_p)^2} \right]^{1/2} \right\}^2$$

Las expresiones propuestas por Williams y Hann para determinar la forma del hidrograma unitario son las siguientes, donde U es el caudal unitario y T_p es el tiempo al pico.

$$U = U_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{n-1} e^{\left[(1-n) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) \right]} \quad \text{Para } t \leq t_0$$

$$U = U_0 e^{\left[\frac{t_0 - t}{K} \right]} \quad \text{Para } t_0 < t \leq t_1$$

$$U = U_1 e^{\left[\frac{t_0 - t}{3K} \right]} \quad \text{Para } t > t_1$$

11.5.3.2 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:

$$T = 0.133 T_C$$

11.5.3.3 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%.

11.5.3.4 Pérdidas hidrológicas

Para simular las pérdidas de precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por intercepción 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:

$$P_e = \frac{(P_{tacum} - I_a)^2}{P_{tacum} - I_a + S} \quad I_a = 0.2 * S \quad S(mm) = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4$$

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.



11.5.3.5 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.

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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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, y 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.

En el Anexo 03 (Tabla 3) 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:

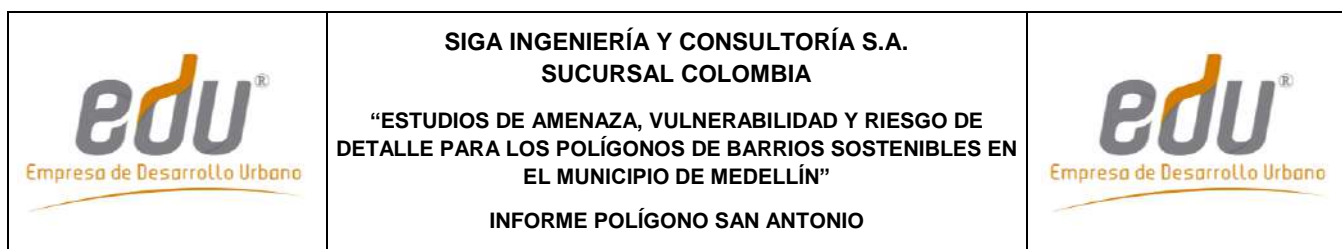
$$CN(III) = \frac{23 \times CN}{10 + 0.13 \times CN}$$

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:

$$Q = \alpha \cdot A^\theta$$

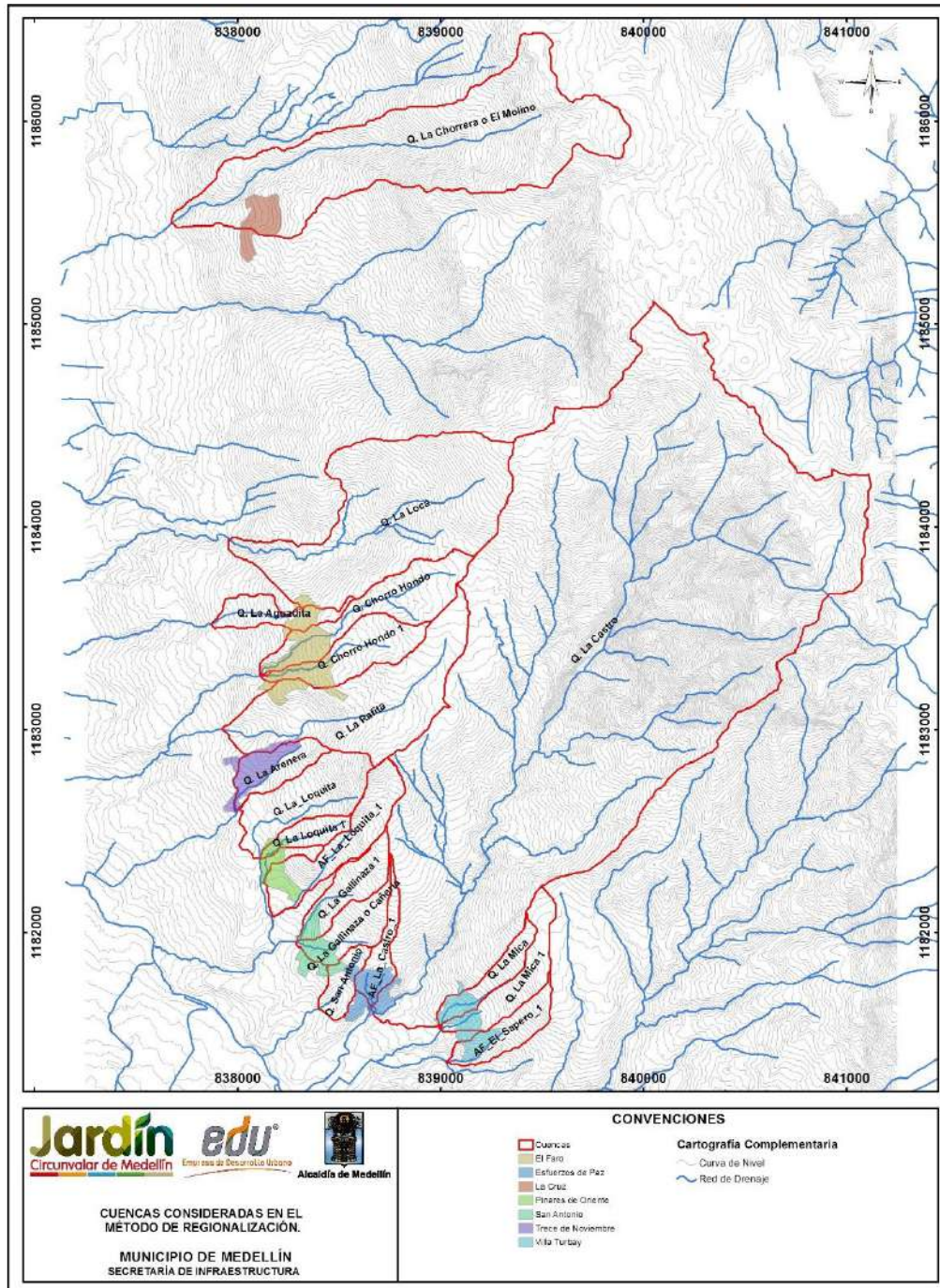
Las cuencas consideradas para el análisis de regionalización corresponden a todas las que componen los ocho polígonos de estudio en el presente contrato. Es decir, se consideraron las cuencas de las quebradas Chorro Hondo, San Antonio, La Rafita, La Arenera, La Gallinaza, La Loquita, El Molino, entre otras. En la Tabla 35 se puede observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.

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.

Tabla 35. 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

En la Tabla 35 y en el Mapa 28 se muestran las cuencas tenidas en cuenta para la regionalización. 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 36 junto con el coeficiente de correlación.



Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización (SATCuencasConsideradasenelMetododeRegionalizacion_Medellin_C)



 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 36. Resultados de regionalización de caudales máximos

Parámetro	Coeficientes de Regionalización			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
α	7.95	13.43	20.35	24.00
Θ	0.78	0.75	0.74	0.74
R2	0.96	0.96	0.96	0.97

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 37 a la Tabla 40. 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. Para estas cuencas pequeñas se cumplen satisfactoriamente las hipótesis de esta metodología. 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 37. Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Gallinaza o Cañería	0.15	0.13	0.15	1.07	0.88	1.19
Q. Gallinaza 1	0.09	0.08	0.09	0.98	0.90	1.21

Tabla 38. Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Gallinaza o Cañería	0.61	0.59	0.62	1.94	1.46	2.13
Q. Gallinaza 1	0.48	0.44	0.48	1.80	1.49	2.16



 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 39. Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Gallinaza o Cañería	1.32	1.26	1.32	3.03	2.23	3.30
Q. Gallinaza 1	1.10	1.03	1.09	2.83	2.27	3.34

Tabla 40. Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Gallinaza o Cañería	1.66	1.58	1.66	3.61	2.60	3.91
Q. Gallinaza 1	1.42	1.32	1.39	3.38	2.64	3.96

En la regionalización hecha por INGEOCILCON mediante el contrato de consultoría 338 de 2013 no se cubre la zona donde se localizan las quebradas la Gallinaza y Gallinaza 1 pero al realizarse para cuencas localizadas en cercanías a estas se toma este valor. En la Figura 120 se muestran las cuencas consideradas por INGEOCILCON para construir la regionalización.

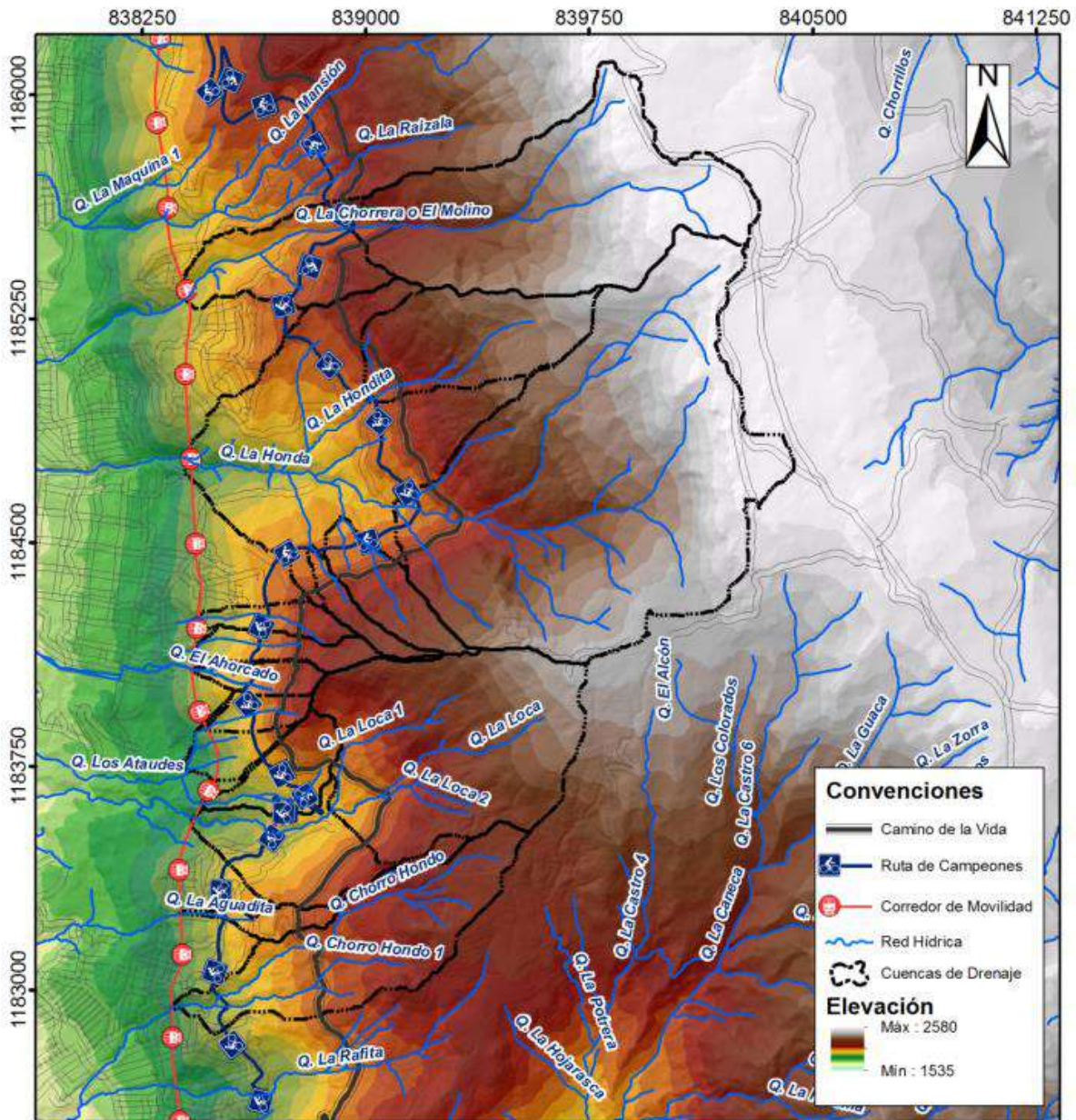




Figura 120. Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILÓN (2014) (Fuente Anexo C del estudio. Parámetros Regionalización Hidrología)

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 San Antonio. 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 Empresa de Desarrollo Urbano que fueron ejecutados por CÓNCAVAS (2013).

Para el caso particular del Polígono San Antonio fue necesario levantar información topográfica en los cauces de las Quebrada La Gallinaza o Cañería y Quebrada Gallinaza 1, dado que la información de referencia no contiene levantamientos topográficos de detalle actualizada en estos cauces.

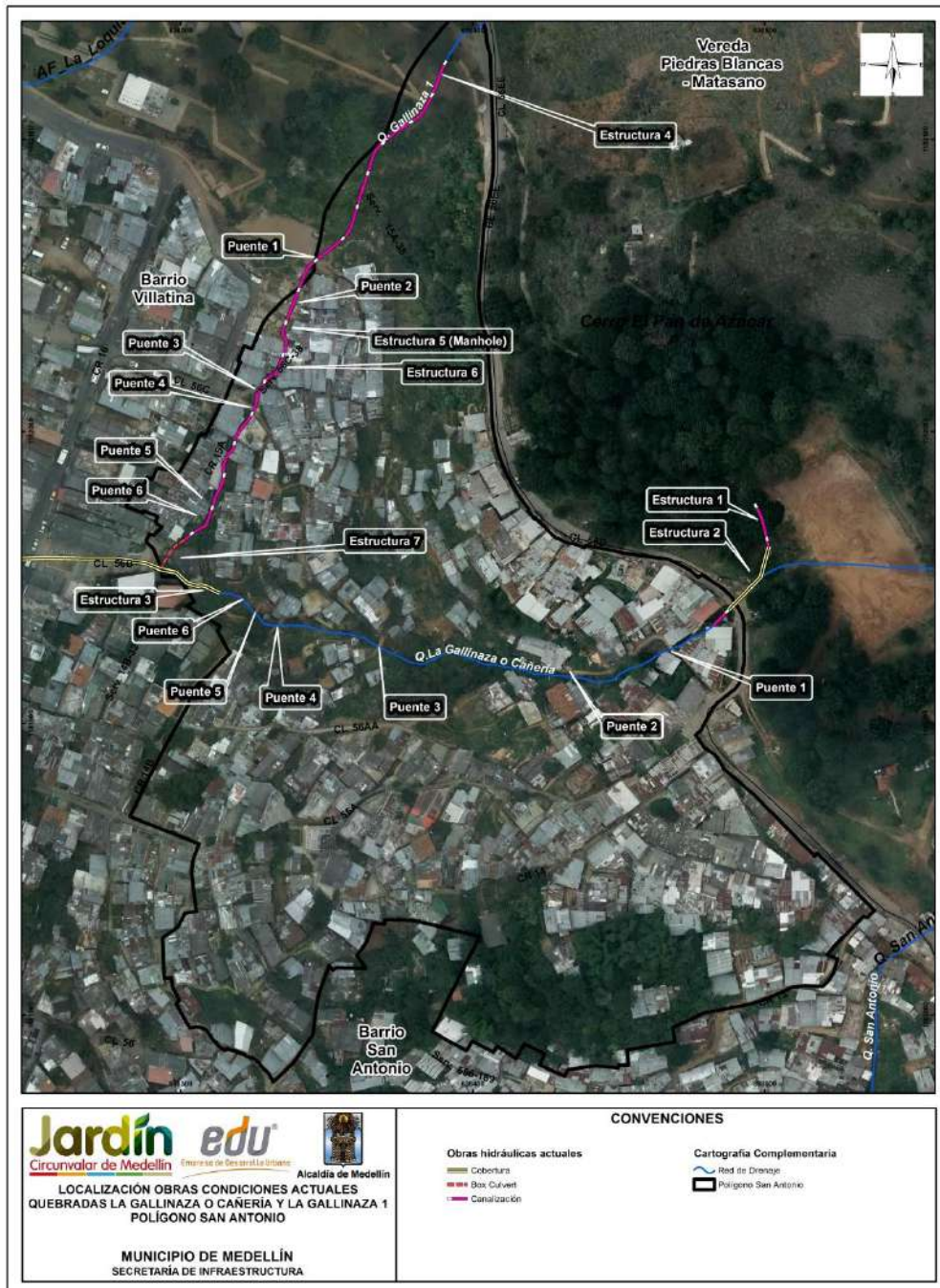
Dentro de la información básica también se cuenta con las observaciones realizadas durante la visita al sitio, en la cual se determinaron las condiciones actuales de las quebradas, sus características y algunos parámetros.

Se contó también con la información topográfica general del Polígono San Antonio que fue levantada por la Empresa de Desarrollo Urbano.

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 hace referencia a la dinámica fluvial de los drenajes asociados a la UMI San Antonio, citándose que a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas en las márgenes de los drenajes, los cuales pueden estar asociados a la dinámica del cauce de las Quebradas La Gallinaza y San Antonio.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI San Antonio (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 de los principales cauces (Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1). En el Mapa 29, se muestran los drenajes asociados al Polígono San Antonio.



Mapa 29. Localización obras hidráulicas y puentes. Condiciones Actuales. Polígono San Antonio
(SATLocalizacionObrasPoligonoSAT_Medellin_C)

12.2.1 Quebrada La Gallinaza

El tramo a describir de la Quebrada La Gallinaza o Cañería comprende una longitud total de 235 m, el tramo inicia en el costado oriental en los límites con el Polígono San Antonio. Este drenaje cruza de oriente a occidente por la zona central del polígono. En el Mapa 29 se muestra en planta la localización y se indica en ella las zonas que corresponden al cauce natural y las que corresponden a las estructuras antrópicas.

12.2.1.1 Subtramo 1 Canal escalonado (Estructura 1)

En este subtramo se tiene un canal escalonado de una sección de 1.40 m de ancho por 2.10 m de alto (Estructura 1) con escalones de huella 1.5 m y contrahuella de 1m. El canal tiene una longitud de 16 m y empalma con cobertura localizada en el cruce con la Calle 56EE (Estructura 2).



Figura 121. Encole, descole y canal escalonado (Estructura 1) en la salida de la cobertura de la calle 56EE (Estructura 2)

La margen derecha del canal está compuesta por pastos bajos y la margen izquierda por terrazas en las cuales se observan algunas plantas que han sido sembradas en ellas (Figura 122).

En la Figura 121 se observa que los baffles de fondo localizados en la entrada de la cobertura de la calle 56EE (Estructura 2) no tienen una dirección de 45° con respecto a la dirección de flujo lo que no permite que haya una adecuada condición de auto limpieza.



Figura 122. Subtramo 1 Márgenes y canal escalonado

12.2.1.2 Subtramo 2 Canal natural

Este subtramo comienza con la cobertura de la Calle 56EE (Estructura 2), estructura que comienza con una sección rectangular de 1.44 m de ancho por 1.80 m de alto y termina con una tubería de 48” de diámetro. Esta obra tiene una longitud total de 22 m. La Estructura 2 cuenta con la siguiente configuración:

- ✓ El encole está compuesto por un pequeño tramo de canal con pantallas deflectoras con una sección de 1.44m de ancho por 1.80m de alto que empalma con la obra de cruce.
- ✓ El descole está compuesto por una tubería de 48” de diámetro que descarga a un tramo de canal escalonado de 6.70m de largo y sección rectangular de 1.3m de ancho por 1.6m de alto, con escalones de 1.80m de huella y una contrahuella de 0.5m.
- ✓ La Cota batea de la tubería de salida de la obra, y el fondo del canal, tienen un desnivel de aproximadamente 1m, estando esta primera por encima.

El canal natural en este sector presenta un ancho que varía entre 1.0 m y 2.5 m y una pendiente que varía entre el 15% y 35%. En el Anexo 05 se presenta un perfil del cauce. En las márgenes se observa vegetación compuesta por pastos altos, arbustos y maleza (Figura 123), se observa además presencia de viviendas a menos de 1 m del cauce, cuyos muros actúan como márgenes. En algunos puntos localizados se presentan

procesos menores de socavación. En el fondo del cauce predomina la presencia de materiales gruesos; de acuerdo con la clasificación de Rosgen, el cauce natural de la Quebrada La Gallinaza o Cañería en el Subtramo 2 puede catalogarse como de Tipo A3a+.



Figura 123. Subtramo 2 Presencia de vegetación en las márgenes del cauce

En el Subtramo 2 se encuentran varias estructuras que pueden alterar las condiciones del flujo, entre estas se encuentran seis puentes o pasos peatonales, cuyas localizaciones se muestran en el Mapa 29. De estas estructuras las que tienen posibilidad de alterar las condiciones de flujo de la Quebrada La Gallinaza o Cañería son los Puentes No 1 y No 2, cuyas configuraciones se exponen a continuación:

Paso Peatonal o Puente No 1: Puente construido en concreto, permite el flujo a través de este mediante dos tuberías de concreto de 16” de diámetro, por lo que esta estructura tiene una baja capacidad y puede obstruirse fácilmente. Este puente se usa como cruce peatonal (Figura 124).

Paso Peatonal o Puente No 2: Puente construido en concreto y madera usado como cruce peatonal, el flujo pasa bajo este puente a través de una pequeña sección transversal, que por su configuración es muy susceptible a obstrucciones. Este puente cuenta con un galibo seco de 1.6 m (medidos desde el fondo del cauce hasta la parte inferior del tablero) (Figura 125).



Figura 124. Paso peatonal o Puente No 1. Quebrada La Gallinaza



Figura 125. Paso peatonal o Puente No 2. Quebrada La Gallinaza



Figura 126. Pasos Peatonales o Puentes No 3 (arriba), 4,5 y 6 (abajo) Quebrada La Gallinaza

El Puente No 3 está construido en madera y se usa como cruce peatonal, cuenta con un galibo seco de 1.65 m, la sección del canal bajo este es irregular debido a las condiciones naturales del cauce. Por otro lado los puentes No 4, 5 y 6 los cuales están hechos de manera rudimentaria con elementos de madera simplemente apoyados sobre el cauce, se usan como cruces peatonales y estos no representan un control para el flujo (Figura 126).

Tabla 41. Coordenadas puentes y obras y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Gallinaza

PUENTE-OBRA	ESTE	NORTE	LUZ (m)	MATERIAL	APOYOS
Cobertura (Estructura 2)	838334.67	1182033.72			
Puente 1	838468.89	1181925.76	3.50	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 2	838434.9	1181915.55	3.00	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 3	838368.45	1181925.92	2.50	Madera	Simples y Superficiales
Puente 4	838334.73	1181933.86	5.60	Madera	Simples y Superficiales
Puente 5	838324.36	1181938.99	3.50	Madera	Simples y Superficiales
Puente 6	838316.14	1181944.76	4.50	Madera	Simples y Superficiales
Cobertura (Estructura 3)	838307.64	1181947.43			

En el Mapa 29 se muestra la localización de las obras sobre la Quebrada La Gallinaza 1 en el tramo de estudio, en la Tabla 41 se muestran las coordenadas donde se ubican dichas obras y en la Tabla 42 se presenta un resumen de las principales características de estas obras.

Tabla 42. Resumen de estructuras hidráulicas en la Quebrada La Gallinaza

Estructura	Ubicación	Tipo Estructura	Tipo Sección	Tipo Fondo	Material Paredes	Material Fondo	Dimensiones				
							Ancho (m)	Alto (m)	z	Diam	Longitud (m)
Estructura 1	Aguas arriba del Cruce con Calle 56EE	Canalización	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	1.4	2.1			16
Estructura 2	Cruce con Calle 56EE	Cobertura	Rectangular-Circular	Uniforme	Concreto-PVC	Concreto-PVC	1.45	1.8		48" en salida	22
Estructura 3	Cruce Calle 56 B y Carrera 16	Cobertura	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	1.25	1.72			20.73

12.2.2 Quebrada La Gallinaza 1

El tramo analizado de la Quebrada La Gallinaza 1 comprende una longitud total de 203 m, este tramo inicia en la esquina norte del Polígono San Antonio, en la zona que conforma el campo santo de Villatina cerca de la Calle 56EE y termina cerca del cruce de la quebrada con la Calle 58B. En el Mapa 29 se muestra en planta el tramo de quebrada analizado, pudiéndose observar que se encuentra totalmente canalizado y entrega sus aguas a una estructura tipo box culvert a la que también llegan las aguas de la Quebrada La Gallinaza o Cañería, este box culvert descarga sus aguas cerca del cruce la Carrera 16 con la Calle 58B.

12.2.2.1 Subtramo 1 Canal escalonado (Estructura 4)

En este subtramo las sección del canal es de tipo rectangular con unas dimensiones aproximadas de 1m de ancho por 1.50 m de alto y cuenta con escalones de 0.55m de contrahuella y 1.30m de huella aproximadamente, este canal está conformado con piedra pegada. En este subtramo se tienen pendientes que varían entre el 15% y 38%. En el Anexo 05 se presenta un perfil del cauce. En el canal se observó la presencia de escombros y basuras.

La vegetación de las márgenes que conducen el flujo hacia el canal está conformada por pastos altos, bajos y maleza (Figura 127). El tramo finaliza en el empalme del canal con una estructura de tipo Manhole (Estructura 5).

No se observa flujo en el canal, situación que indica que la corriente es de tipo efímera, presentando flujo solo cuando se presentan precipitaciones.



Figura 127. Canal escalonado de la Quebrada La Gallinaza 1 (Estructura 4)

A lo largo del canal se tiene dos puentes en concreto que funcionan como cruces peatonales. La configuración a la entrada y salida de estos puentes se muestra en la Figura 128 y en la Figura 129.

El Puente No 1 y No 2 se usan como cruces peatonales y tienen un galibo seco de 1.4 m y 1.0 m respectivamente, los cruces del canal bajo estos puentes no presentan variaciones en el ancho del canal y cuentan con un fondo continuo.



Figura 128. Configuración a la entrada y la salida Puesto No 1



Figura 129. Configuración a la entrada y la salida del cruce Puesto No 2

12.2.2.2 Subtramo 2 Manhole (Estructura 5)

Este tramo inicia con una estructura tipo manhole (Estructura 5) a la cual ingresan las aguas del subtramo 1 mediante una tubería de 34” de diámetro, en esta estructura se da

un cambio de dirección del flujo mediante una tubería de 34” de diámetro y se descarga el caudal en un canal trapezoidal de fondo continuo (Estructura 6), el cual está construido en concreto.

La configuración de la descarga de la estructura tipo Manhole (Estructura 5) en el canal trapezoidal es la siguiente:

- ✓ Hay un desnivel entre la cota batea de la tubería de descarga y el fondo del canal, estando esta primera 0.5m por encima del fondo del canal (Figura 131).
- ✓ Entre la tubería del descarga del manhole (Estructura 5) y el fondo del canal hay un tubo de menor diámetro que hace una descarga continua de aguas domiciliarias servidas (Figura 131), se observa además varios tubos que descargan en el canal, los cuales provienen de casas adyacentes al canal (Figura 130).
- ✓ No se observa caudal en la salida, por lo cual se puede establecer que dicha estructura no recibe aguas a parte de las entregadas por el canal del subtramo1 (Estructura 4).



Figura 130. Estructuras de entrada y salida del Manhole (Estructura 5)



Figura 131. Entrega de aguas residuales al canal trapezoidal (Estructura 6)

Tabla 43. Coordenadas puentes y obras y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Gallinaza 1

PUENTE-OBRA	ESTE	NORTE	LUZ (m)	MATERIAL	APOYOS
Manhole (Estructura 5)	838334.67	1182033.72			
Puente 1	838346.07	1182058.52	2.50	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 2	838337.2	1182040.11	3.00	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 3	838327.78	1182015.73	2.40	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 4	838325.23	1182007.87	2.70	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 5	838310.77	1181973.91	2.20	Concreto	Simples y Superficiales
Puente 6	838309.2	1181968.93	1.50	Concreto	Simples y Superficiales
Box Culvert Final Tramo (Estructura 7)	838299.35	1181961.73			

En el Mapa 29 se muestra la localización de las obras sobre la quebrada la Gallinaza 1 en el tramo de estudio, en la Tabla 43 se muestra las coordenadas donde se ubican dichas obras y en la Tabla 44 se presenta un resumen de las principales características de estas obras.

Los pasos peatonales o puentes No 3, 4, 5 y 6 localizados en este tramo se usan como cruces peatonales y cuentan con gálibos secos (desde el fondo del cauce hasta la parte inferior del tablero) de 0.95 m, 0.92 m, 1.53 m y 1.55 m respectivamente. Los cruces del canal bajo estos puentes no presentan variaciones en el ancho del canal y cuentan con un fondo continuo.

Tabla 44. Resumen de estructuras hidráulicas en la Quebrada La Gallinaza 1

Estructura	Ubicación	Tipo Estructura	Tipo Sección	Tipo Fondo	Material Paredes	Material Fondo	Dimensiones				
							Ancho (m)	Alto (m)	z	Diam	Longitud (m)
Estructura 4	Campo Santo	Canalización	Rectangular	Escalonado	Piedra pegada	Piedra pegada	1.00	1.50			114
Estructura 5	Sector Cancha Campo santo	Alcantarilla (Manhole)	Circular	Uniforme	PVC	PVC	1.00	0.80		34"	6.7
Estructura 6	Sector Cancha Campo santo a Calle 56 B	Canalización	Trapezoidal	Uniforme	Concreto	Concreto	0.35	0.45	0.39		79
Estructura 7	Cruce Calle 56 B y Carrera 16	Alcantarilla	Rectangular	Uniforme	Concreto	Concreto	0.70	0.84			12.33

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 San Antonio, se procedió a realizar el modelo hidráulico, cuyo objetivo 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 las cuales se delimitarán finalmente las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno y los 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 de 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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

- ✓ 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

Considerando que los cauces que tienen influencia sobre el polígono San Antonio no son susceptibles a generar fenómenos de avenida torrencial como se describe en el Capítulo 15, no es necesaria una mayoración del 40% sobre el caudal de acuerdo con lo que establece el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012. Así las cosas los caudales considerados en la modelación hidráulica son directamente los estimados en el Apartado 11.5 de hidrología por el método racional (Tabla 37 a Tabla 40).

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:



$$Q_{pico} / A_{celda} < 3m/s$$

Esta relación implica tamaños de celda entre 0.7 m y 1.4 m de lado para los caudales de diseño. Para para garantizar un equilibrio entre una buena representatividad y un buen detalle en los resultados del modelo se empleó un tamaño de celda de 1.0 m de lado.

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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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.

12.3.7 Condiciones de estabilidad numérica

El modelo FLO2D 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 el Anexo 04 (Tabla 1) 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 San Antonio está dada por control en la entrada.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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. En el caso particular de las estructuras hidráulicas existentes en los cauces del Polígono San Antonio se ha considerado un 30% de obstrucción, con excepción de la Estructura 2 y el denominado Puente N0.1, ambas sobre la Quebrada La Gallinaza, en las cuales se ha considerado un 50% y un 100% de obstrucción respectivamente dada la mayor probabilidad de ocurrencia.

12.3.10 Resultados en la Quebrada La Gallinaza (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Gallinaza se presentan en el Mapa 30 y el Mapa 31, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. Dadas las altas pendientes del cauce, el flujo tiene altas velocidades y las profundidades son bajas. En esta quebrada juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes en el cauce, tales como canales y alcantarillas, dado que actúan como un control al flujo en sus encoles

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada La Gallinaza, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones reales del sitio.

A continuación se describen los resultados de la modelación hidráulica en la Quebrada La Gallinaza de manera para cada subtramo. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados. En la geodatabase presentada en el Anexo 12 se incluyen los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo.

12.3.10.1 Subtramo 1 Canal escalonado (Estructura 1)

En el Mapa 30 se observa que para este subtramo debido a la configuración topográfica y la obra existente no se presentan vertimientos hacia la vía para crecientes que van hasta un período de retorno de 100 años.

Para este subtramo las profundidades máximas varían entre 0.44 m y 1.05 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 1.17 m y 3.51 m para 100 años de periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 1.57 m/s y 5.53 m/s y entre 1.65 m/s y 7.90 m/s para un periodo de retorno de 100 años (Tabla 45).

Las profundidades en las llanuras son de un rango menor debido a las pequeñas láminas de flujo. Las velocidades que se presentan en las llanuras son bajas debido a las altas rugosidades de estas zonas las cuales están conformadas principalmente por vegetación.



 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 45. Qda. La Gallinaza: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 1 Canal Escalonado (Est.1)

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.44	1.05	0.81	1.53	1.01	2.4	1.17	3.51
Profundidad Llanuras	--	--	--	--	0.01	0.03	0.01	0.64
Velocidad en el canal	1.57	5.53	1.65	6.25	1.65	7.33	1.65	7.9
Velocidad en Llanuras	--	--	--	--	0.06	0.24	0.01	0.29

12.3.10.2 Subtramo 2 Canal natural

En el Mapa 30 se observa que para este subtramo debido a la configuración encañonada del cauce no se presentan grandes vertimientos que originen una extensión de la mancha de inundación, además los vertimientos ocasionados por controles hidráulicos presentes en el flujo regresan al cauce.

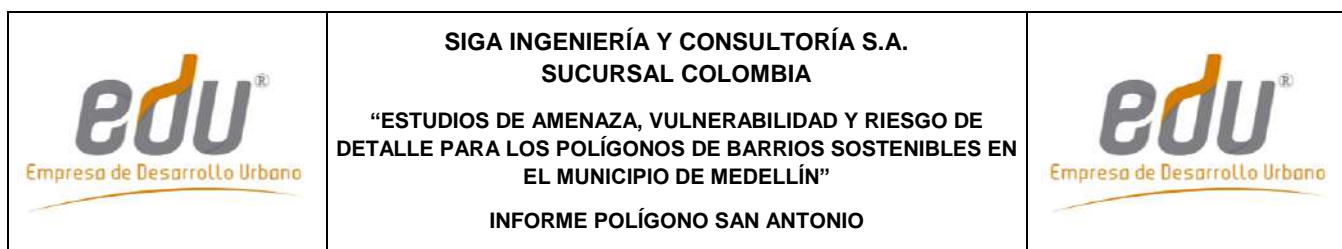
Para este subtramo las profundidades máximas varían entre 0.25 m y 2.19 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.38 m y 3.65 m para 100 años de periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 0.54 m/s y 6.59 m/s y entre 0.54 m/s y 7.65 m/s para un periodo de retorno de 100 años (Tabla 46).

Las profundidades en la llanura son de un rango menor, debido a las pequeñas láminas de flujo, mientras que las velocidades presentan valores altos debido que estas son medidas en zonas donde la rugosidad es baja como lo son losas de concreto y vías (Tabla 46).

Tabla 46. Qda. La Gallinaza: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 2 Canal natural

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.25	2.19	0.33	2.84	0.34	3.13	0.38	3.65
Profundidad Llanuras	0.02	0.03	0.01	0.93	0.01	0.03	0.01	0.95
Velocidad en el canal	0.54	6.59	0.54	6.7	0.54	7.33	0.54	7.65
Velocidad en Llanuras	0.13	5.41	0.08	5.43	0.03	5.43	0.08	5.48

En la Tabla 47 se presentan los niveles obtenidos en las zonas donde se ubica cada uno de los pasos peatonales o puentes localizados en el tramo estudiado. Puede observarse que a excepción de los puentes 1 y 2 los niveles de la superficie del agua se encuentran por debajo de la elevación del tablero del puente. En este caso, solo el puente 1 tiene una influencia directa sobre la mancha de inundación y la amenaza, ya que este ejerce un control al flujo al no tener capacidad suficiente para la creciente considerada, ocasionando un pequeño derrame que puede observarse en el Mapa 30. Los puentes 2 a 6 no tienen una incidencia directa sobre la mancha de inundación bajo condiciones actuales tal como se observa en el Mapa 30. De igual forma, los apoyos de los pasos peatonales o puentes



1 y 2 quedan inmersos en la zona inundada, y el paso peatonal 1 facilita el atrapamiento de elementos como basuras dado el tipo de estructura y sus dimensiones.

Tabla 47. Evaluación hidráulica de los pasos peatonales o puentes ubicados en la Qda. La Gallinaza

PUENTE	Cota Inferior del tablero (m.s.n.m)	Cota Superficie de Agua (m.s.n.m)	Gálibo Disponible (m)
Puente 1	1752.85	1755.35	N/A
Puente 2	1744.30	1744.75	N/A
Puente 3	1724.09	1723.23	0.86
Puente 4	1711.78	1711.06	0.72
Puente 5	1709.41	1707.64	1.77
Puente 6	1707.40	1704.90	2.50

12.3.11 Resultados en la Quebrada La Gallinaza 1 (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada Gallinaza 1 se presentan en el Mapa 30 y Mapa 31, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. Dadas las altas pendientes del cauce, el flujo tiene altas velocidades y las profundidades son bajas. En esta quebrada juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes en el cauce, tales como canales y alcantarillas, dado que actúan como un control al flujo en sus encoles.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la quebrada Gallinaza 1, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones reales del sitio.

A continuación se describen los resultados de la modelación hidráulica en la quebrada Gallinaza 1 de manera separada por tramos. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados. En la geodatabase presentada en el Anexo 12 se incluyen los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo.

12.3.11.1 Subtramo 1 Canal Escalonado (Estructura 4)

Para el subtramo del canal escalonado las profundidades máximas varían entre 0.56 m y 1.82 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.54 m y 3.07 m para 100 años de periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 1.58 m/s y 6.75 m/s y entre 1.58 m/s y 7.66 m/s para un periodo de retorno de 100 años.

Las profundidades en la llanura son de un rango menor, debido a las pequeñas láminas de flujo, mientras que las velocidades presentan valores muy similares a la del canal dado que estas son medidas en la vía y por tanto la rugosidad en estas zonas es más baja y facilitan el aumento de este parámetro (Tabla 48).

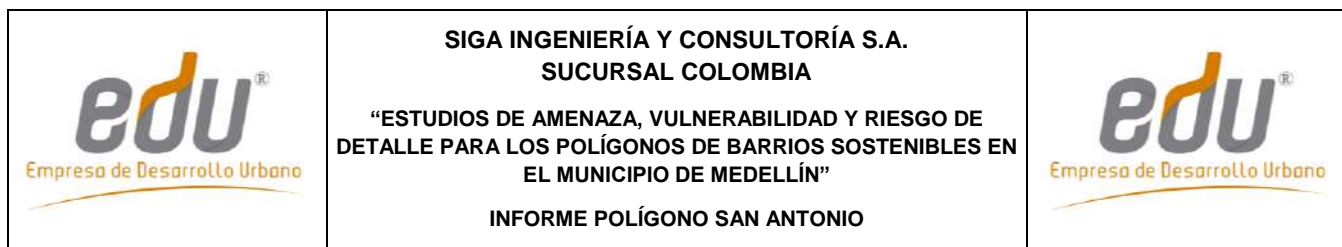
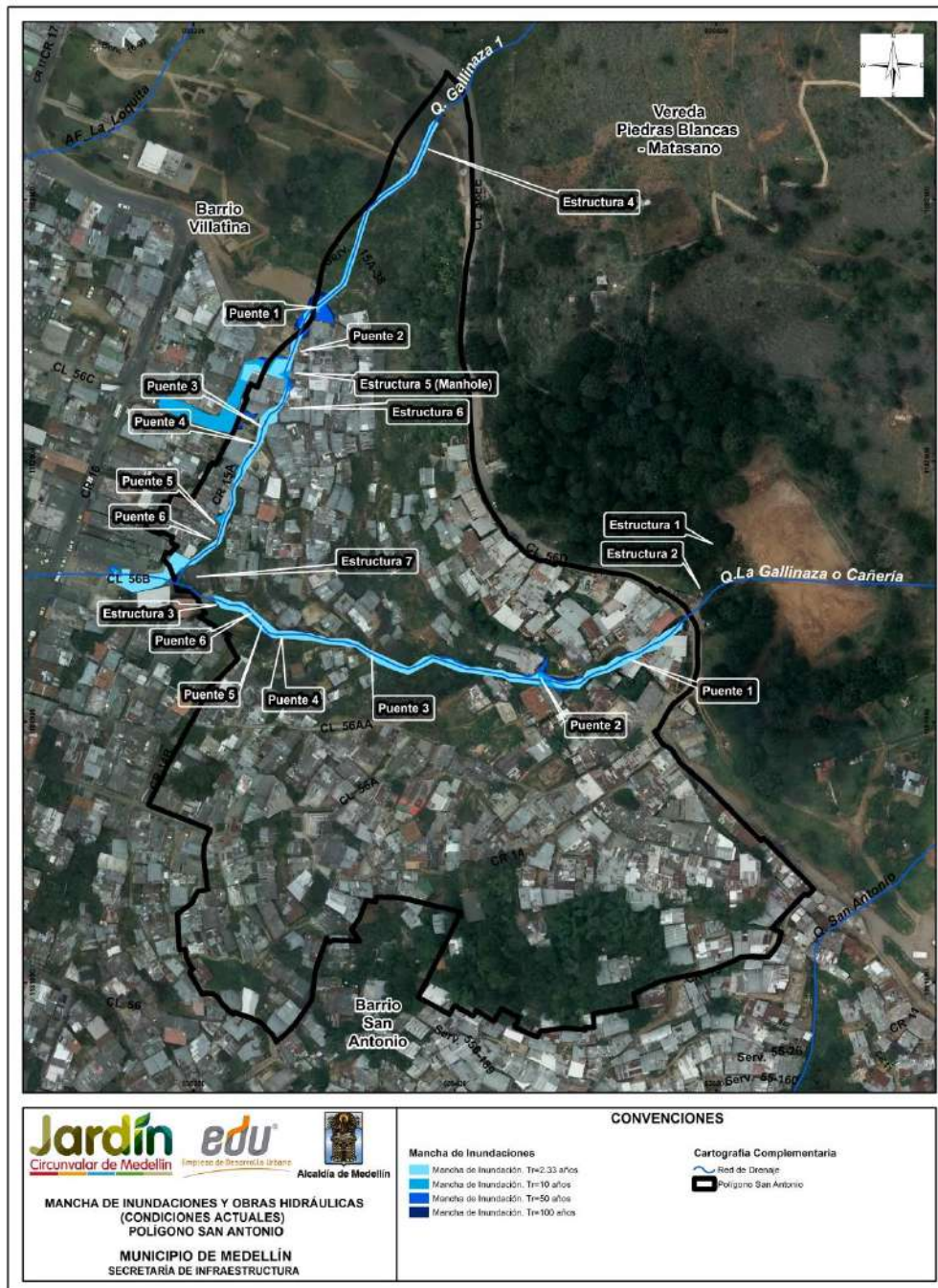


Tabla 48. Qda. La Gallinaza 1: velocidades y profundidades de flujo en el subtramo 1 (Canal escalonado)

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.56	1.82	0.54	1.79	0.63	2.62	0.54	3.07
Profundidad Llanuras	0.01	0.20	0.01	0.20	0.01	0.19	0.01	0.33
Velocidad en el canal	1.58	6.75	1.58	7.17	1.58	7.45	1.58	7.66
Velocidad en Llanuras	0.01	1.05	0.01	3.00	0.01	4.05	0.02	4.43



Mapa 30. Manchas de inundación para las Quebradas La Gallinaza o Cañería y Gallinaza 1 en condiciones actuales (SATManchasObrasCondiActualesMedellin_C)

12.3.11.2 Subtramo 2 Manhole (Estructura 5)

En el Mapa 30 se observa que hay vertimientos al inicio y al final de este subtramo los cuales se deben a la incapacidad hidráulica de la sección en el manhole (Estructura 5) y en el Box Culvert del final del tramo (Estructura 7) respectivamente.

Como se puede observar en este subtramo no hay una extensión de la mancha de inundación, situación que se debe a que las viviendas limitan las márgenes del cauce y a la configuración topográfica de la zona.

Para este subtramo las profundidades máximas varían entre 0.41 m y 2.64 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.57 m y 2.92 m para 100 años de periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años en este tramo varía entre 1.36 m/s y 7.78 m/s y entre 1.36 m/s y 9.96 m/s para un periodo de retorno de 100 años.

Las profundidades en la llanura son de un rango menor, debido a las pequeñas láminas de flujo, mientras que las velocidades presentan valores muy similares a la del canal dado que estas son medidas en zonas donde la rugosidad es baja como lo son losas de concreto y vías (Tabla 49).

Tabla 49. Qda. La Gallinaza 1: velocidades y profundidades máximas de flujo en el subtramo 2 Manhole (Estructura 5)

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.41	2.64	0.4	2.9	0.39	2.96	0.57	2.92
Profundidad Llanuras	0.01	0.09	0.01	0.09	0.02	0.42	0.01	0.55
Velocidad en el canal	1.36	7.78	1.36	7.89	1.36	8.98	1.36	9.96
Velocidad en Llanuras	0.07	2.71	0.05	3.54	0.02	4.25	0.03	3.57

En la Tabla 50 se presentan los niveles obtenidos en las zonas donde se ubica cada uno de los pasos peatonales o puentes localizados en el tramo estudiado. Puede observarse que a excepción del puente No 2 los niveles de la superficie del agua se encuentran por encima de la elevación del tablero del puente haciendo que este genere una pequeña extensión de la mancha de inundación y de la amenaza cerca del sector de la cancha. Los puentes 2 a 6 no tienen una incidencia directa de sobre la mancha de inundación bajo condiciones actuales tal como se observa en el Mapa 30 y el Mapa 31, lo que se debe básicamente a lo bien definido que está el cauce de la corriente. En el caso de la quebrada la Gallinaza 1 la extensión de la mancha se debe a incapacidad hidráulica de la estructura 5.

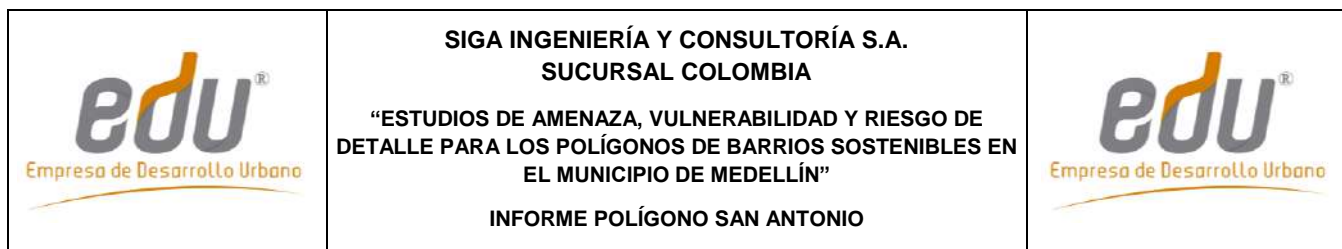
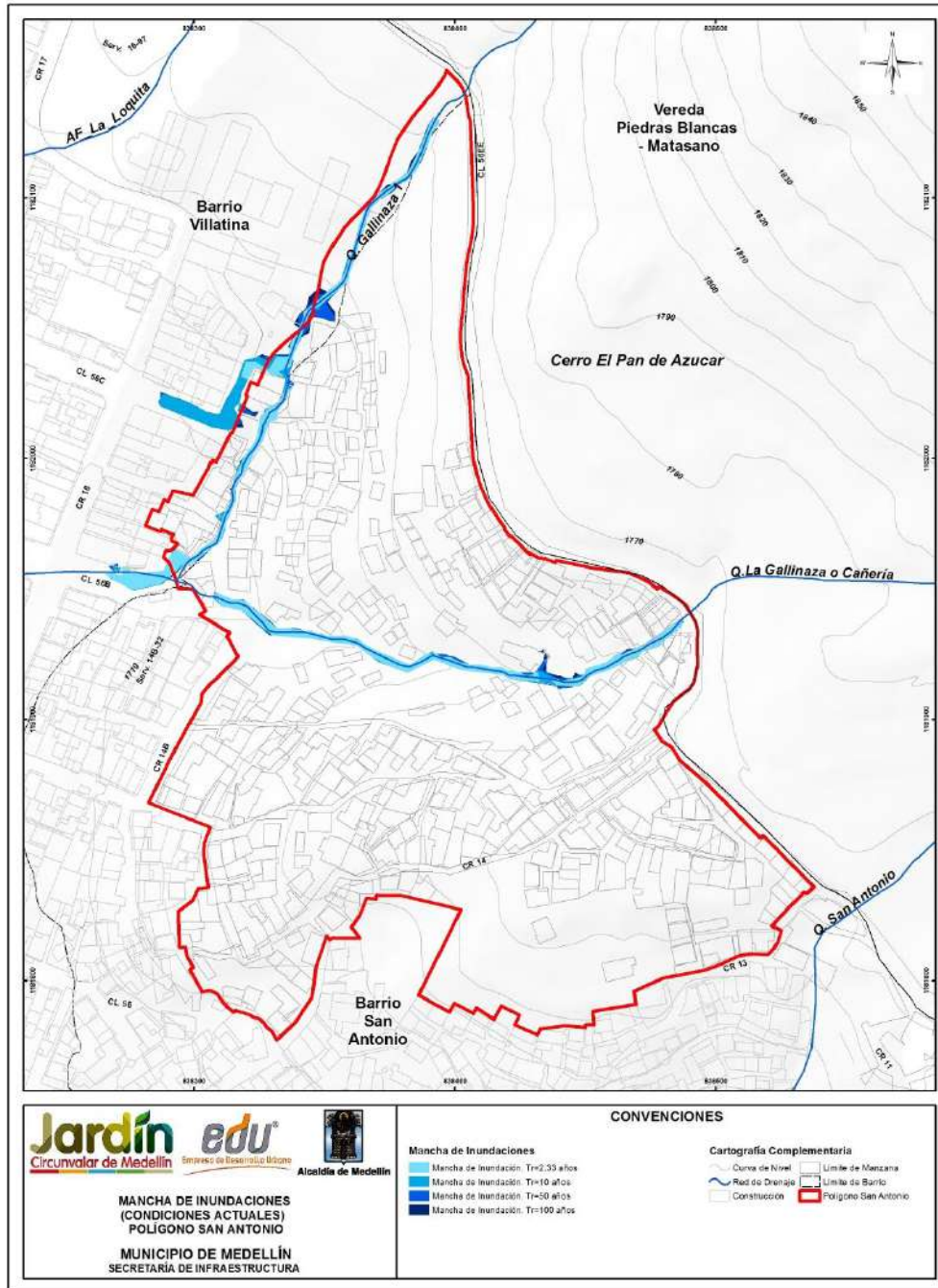




Tabla 50. Evaluación hidráulica de los pasos peatonales o puentes ubicados en la Qda. La Gallinaza 1

PUENTE	Cota Inferior del tablero (m.s.n.m)	Cota Superficie de Agua (m.s.n.m)	Gálibo Disponible (m)
Puente 1	1729.21	1730.10	N/A
Puente 2	1723.11	1722.63	0.48
Puente 3	1715.61	1716.03	N/A
Puente 4	1713.04	1713.59	N/A
Puente 5	1703.46	1704.03	N/A
Puente 6	1702.45	1701.59	0.86



Mapa 31. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono San Antonio.

(21_SATManchalnundaciones_Medellin_C y 21_SATManchalnundaciones_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 lo encontrado a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas. Esto porque para efectos de los cálculos solo con uno de los piezómetros de esta UMI fue posible interceptar el nivel de aguas subterráneas y este se encuentra profundo, en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, sin que afecte entonces los cálculos de estabilidad.

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 San Antonio, 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 un nivel de aguas subterráneo profundo, según los registros de perforaciones y el seguimiento de la instrumentación se puede hablar de un nivel de aguas subterráneo entre 17.4 m e incluso por debajo de los 26.5 m de profundidad (Numerales 8.6.1 y 8.6.2).

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI San Antonio se presentan pendientes en el terreno mayores que 30° y la presencia de dos drenajes naturales que funcionan como sistemas de canalización de las aguas de escorrentía. Análisis de infiltración/escorrentía mostrados en el Capítulo 11, muestran coeficientes de escorrentía hasta de 44% para el caso de las lluvias más probables (TR 2.33 años) y de 62% para el caso de las lluvias más críticas (TR 100 años). Los tiempos de concentración asociados a estas condiciones de pendiente son muy bajos, en promedio de 6.4 min, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

En cuanto a los usos del suelo, la UMI San Antonio se caracteriza por poseer aproximadamente un 60% en uso forestal y el otro 40% en uso urbano. No obstante, en las zonas forestales apenas el 10% posee zonas boscosas y el resto corresponde a zonas desprovistas de vegetación espesa lo que acelera más los procesos de evaporación y escorrentía y disminuye lo efectos de infiltración desde la superficie.

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 San Antonio, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) donde sus índices de plasticidad no superan 22 %, los límites líquidos están entre 51% y 65% y los porcentajes de saturación son en promedio del 86%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
--	--	--

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.

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 8 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 132).

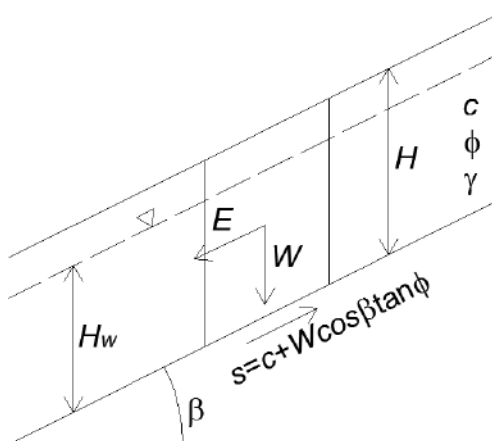


Figura 132. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar

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 seudoestáticas 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 seudoestático 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 (Qcv), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos coluviales y, 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 geológicos geotécnicos que atraviesan la UMI San Antonio 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 mucho menores 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 limite.

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 pseudo 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 extremadamente grande de cálculos, que no podrían ser ejecutados sin el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).



	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

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 morfológicos 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

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 132) 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 133). Finalmente, 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.

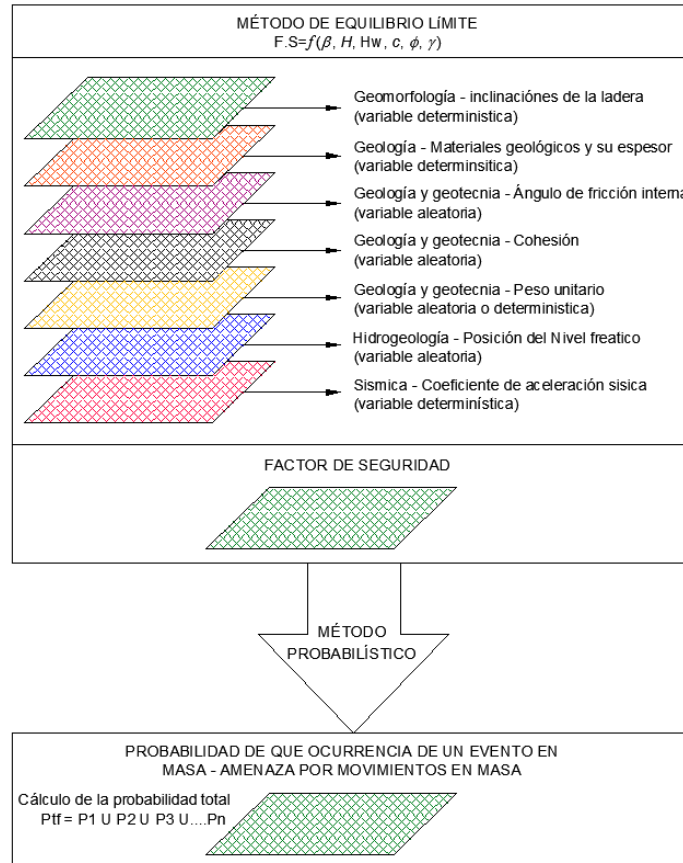


Figura 133. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa

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 manifiestan 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 51. En la Tabla 52 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 51. 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



Tabla 52. 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 32 y el Mapa 33 presentan los respectivos análisis de factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas, se puede ver que la mayor parte del polígono presenta 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° .
- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones pseudoestáticas, representativas del escenario con sismo, se puede ver que la mayor parte del polígono presenta valores de FS menores o iguales que 1.2. Vale la pena aclarar

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

que factores de seguridad pseudoestático mayores de 1.1 pueden considerarse aceptables, de tal manera que los FS considerados bajos en este polígono realmente alcanzan, en algunos puntos, valores que pudieran ser adecuados.

Por otro lado, el Mapa 34 muestra los resultados de los análisis de probabilidad de falla en caso estático 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 35). Se evidencia la afectación de casi la totalidad de la zona con probabilidades de falla aproximadamente en un 80%. Es importante aclarar que este escenario es considerando que el sismo de periodo de retorno de 475 años podría actuar de forma inmediata.



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 35 por el respectivo periodo de retorno de 475 años. Esto permitió obtener el Mapa 36 que muestra la probabilidad de falla anualizada considerando la afectación del sismo de la zona.

Finalmente, en el Mapa 37 se presenta la zonificación de la amenaza total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años.

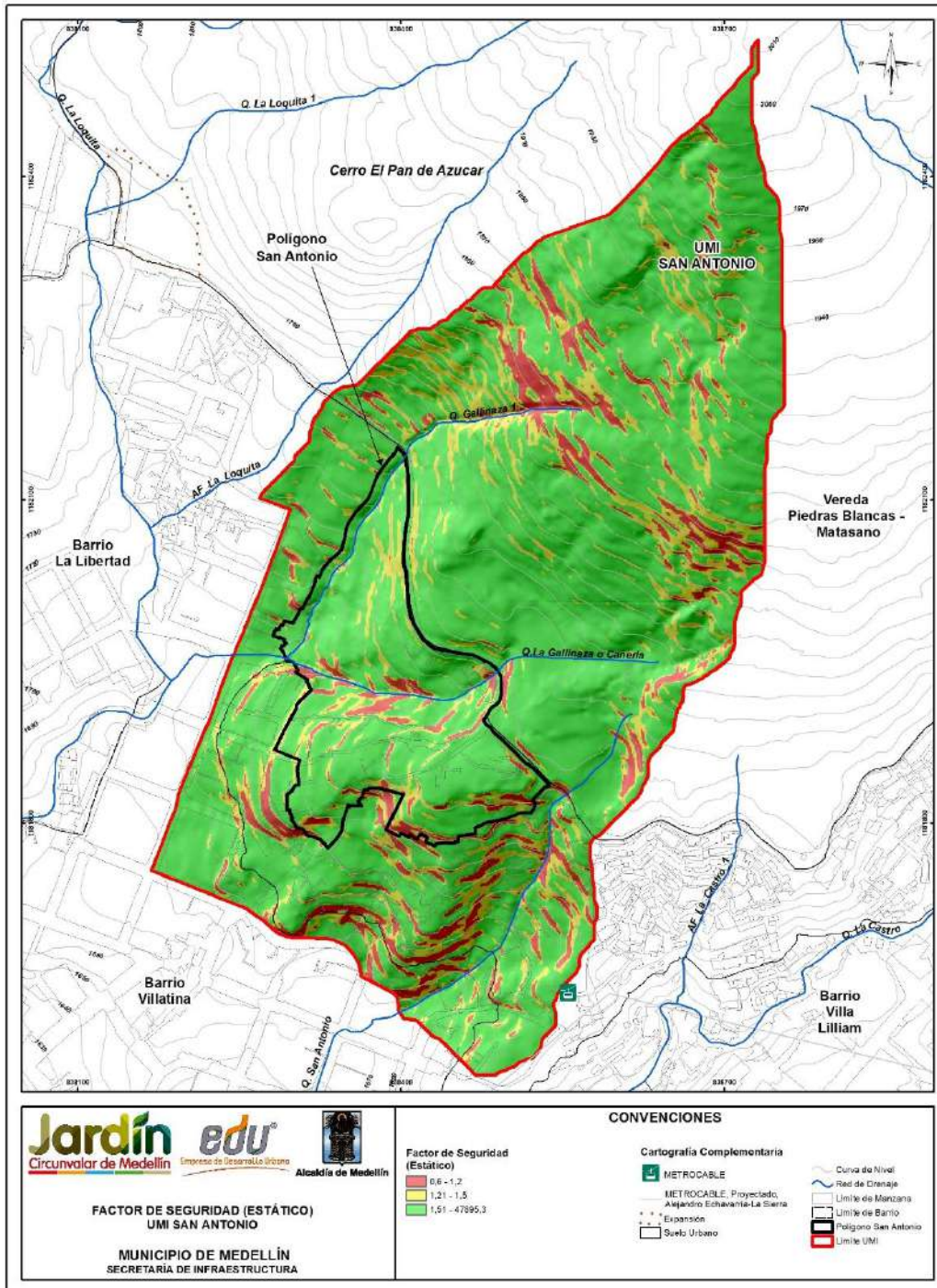
Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa (Mapa 37) en conjunto con el mapa de pendiente (Mapa 11) y el de procesos morfodinámicos (Mapa 13) se observa que los sitios de mayor inestabilidad y que representan mayor afectación al polígono se localizan en la parte alta y baja del polígono, ubicados en una ladera de alta pendiente y desarrollada superficialmente en los Horizontes IIA y IC de Dunitas de Medellín, respectivamente. También se presentan otros focos en la parte alta de la UMI, por fuera del polígono, en laderas con pendientes muy altas, mayores que 30° y desarrolladas superficialmente en el Horizonte IC de Dunitas de Medellín y depósitos de flujo y/o escombros. En la zona se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos. 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 general, las áreas con probabilidad de falla baja predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI San Antonio.

Los resultados mostrados en el Mapa 37 como más críticos implican entonces 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.

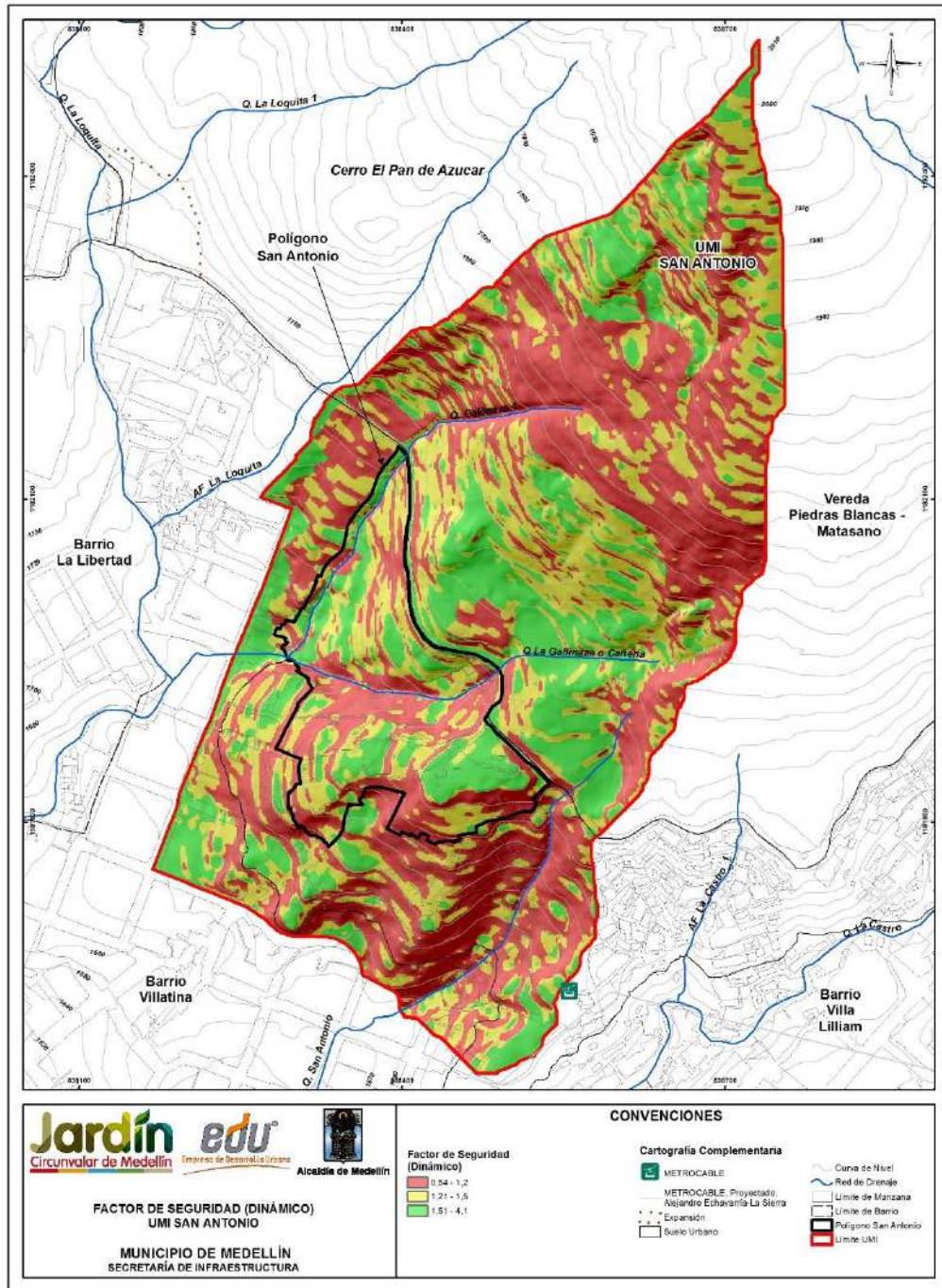
El resultado de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa (Mapa 37) se relaciona con el resultado de la zonificación de la aptitud geológica (Mapa 18). Esto se evidencia en el hecho de que las zonas de amenaza alta y media por movimientos en

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

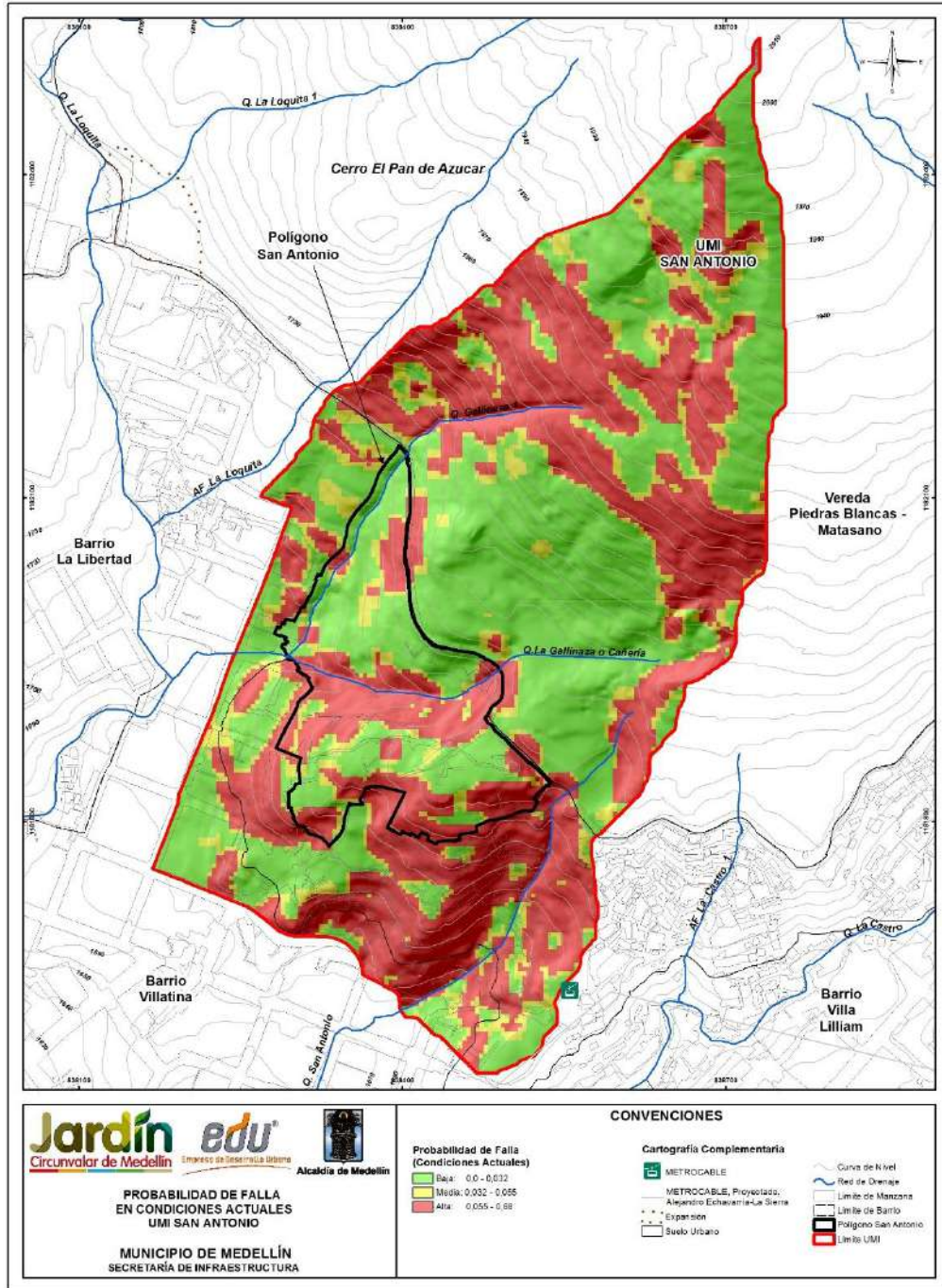
masa corresponden a las zonas catalogadas en la aptitud geológica como zonas no aptas y zonas aptas con restricciones altas. De igual manera, las zonas clasificadas con amenaza baja por movimientos en masa se correlacionan con las zonas aptas y zonas aptas con restricciones moderadas.



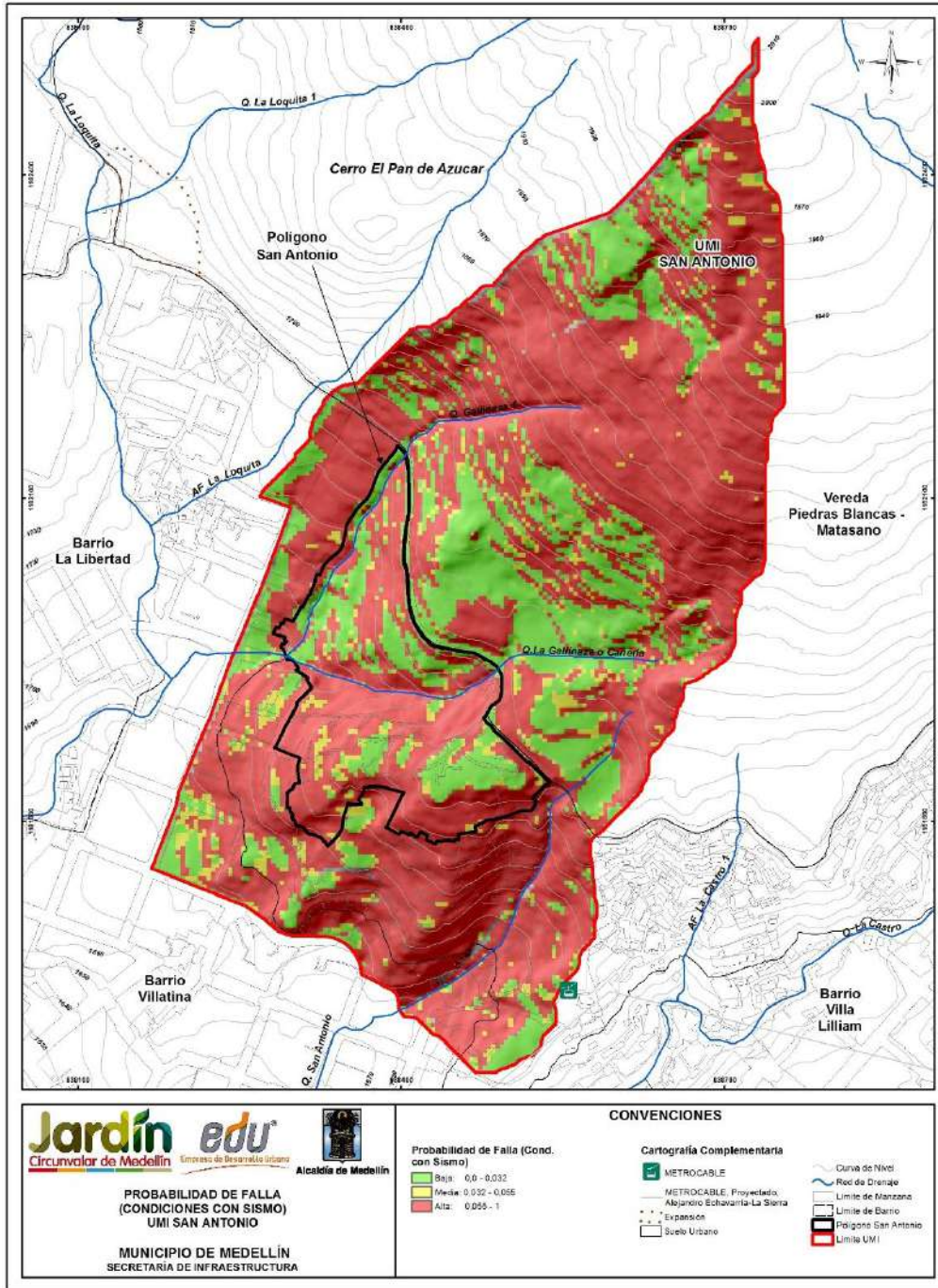
Mapa 32. Análisis del factor de seguridad de la UMI San Antonio en condiciones estáticas (SATFactorSeguridadEstaticoUMI_Medellin_C)



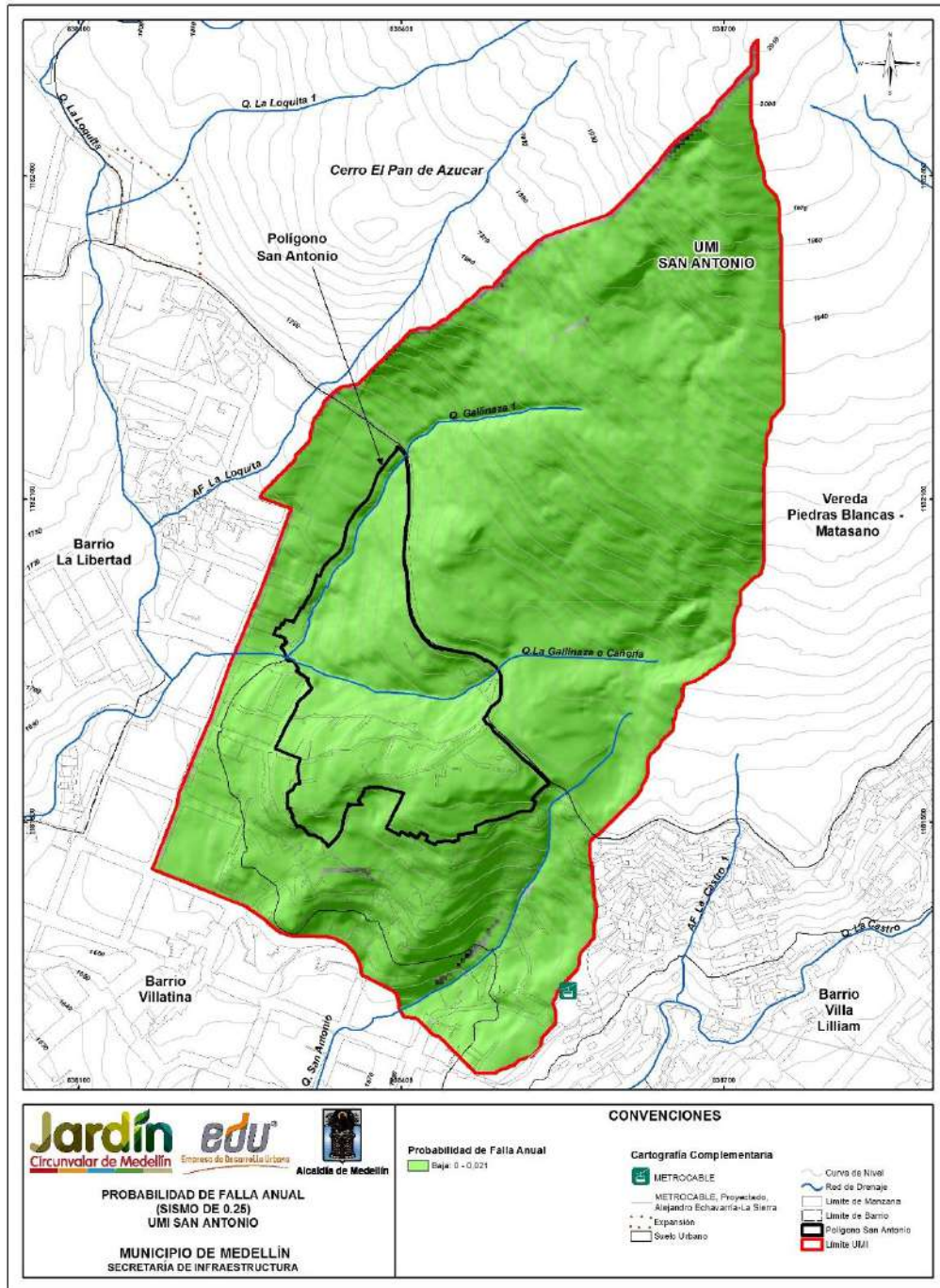
Mapa 33. Análisis del factor de seguridad de la UMI San Antonio en condiciones pseudoestáticas con sismo de 0.25g (SATFactorSeguridadDinamicoUMI_Medellin_C)



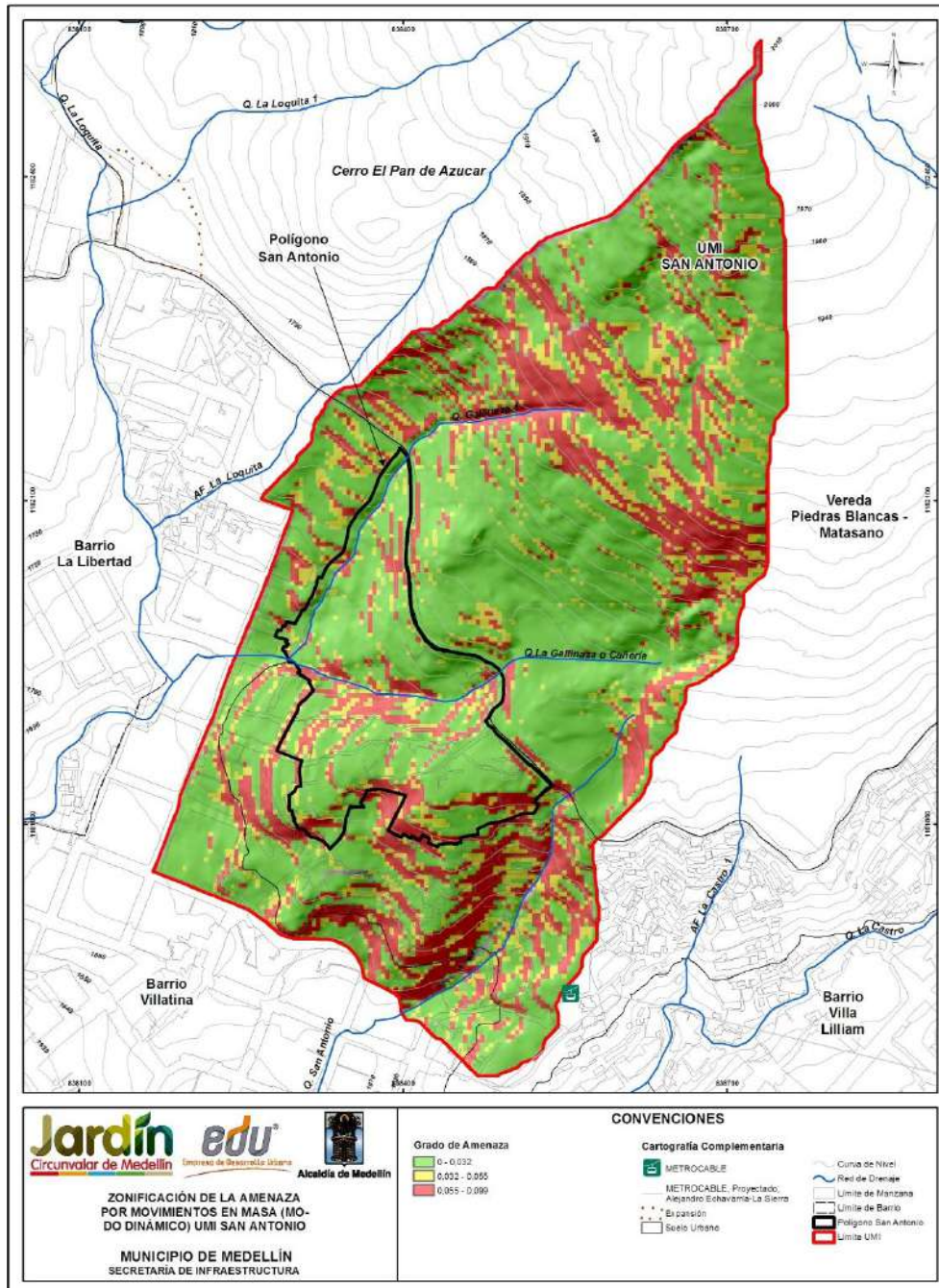
Mapa 34. Análisis de probabilidad de falla de la UMI San Antonio en condiciones actuales y naturales (SATProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI_Medellin_C)



Mapa 35. Análisis probabilidad de falla de la UMI San Antonio en condiciones seudoestático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (SATProbabilidadFallaTotalUMI_Medellin_C)



Mapa 36. Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI San Antonio en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g (SATProbabilidadFallaAnualUMI_Medellin_C)



Mapa 37. Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (19_SATAm amenaza Movimientos en Masa_Medellin_C y 19_SATAm amenaza Movimientos en Masa_Medellin_T)

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. La Figura 134 muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó los valores máximos de socavación.



Figura 134. Esquema de localización en planta de la sección analizada

El perfil mencionado fue analizado teniendo en cuenta el proceso de socavación y la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. La Figura 135 exhibe los resultados del análisis de estabilidad efectuado. El valor de probabilidad de falla incluida

en la figura hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años.

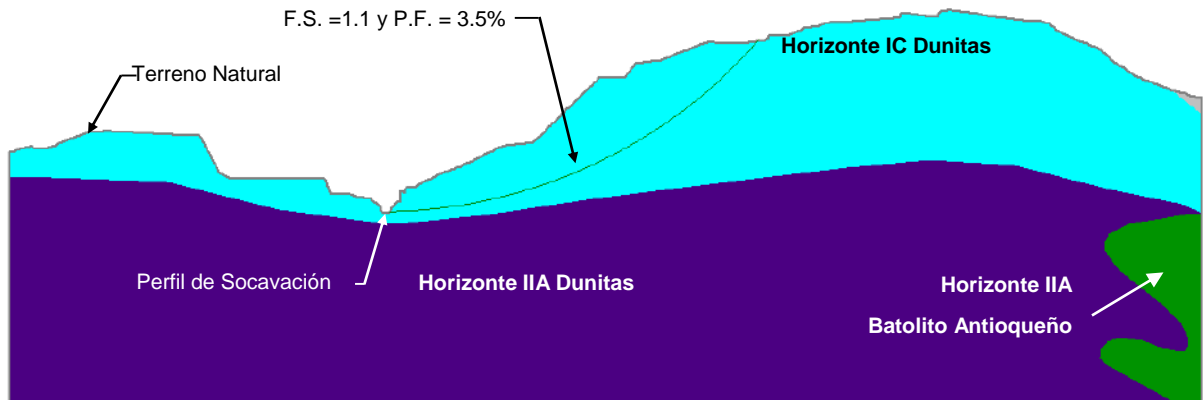




Figura 135. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera

Se observa que la probabilidad de falla es ligeramente mayor que la considerada dentro del rango de amenaza baja y el factor de seguridad en caso seudoestático de 1.1, puede considerarse aceptable. Estos resultados ratifican que el proceso de socavación no implica afectación en la estabilidad de la ladera.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

14. AMENAZA POR INUNDACIONES

14.1 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 San Antonio, 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 de los cauces en el tramo de influencia.

14.2 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 Fiebigger (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 136). 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.

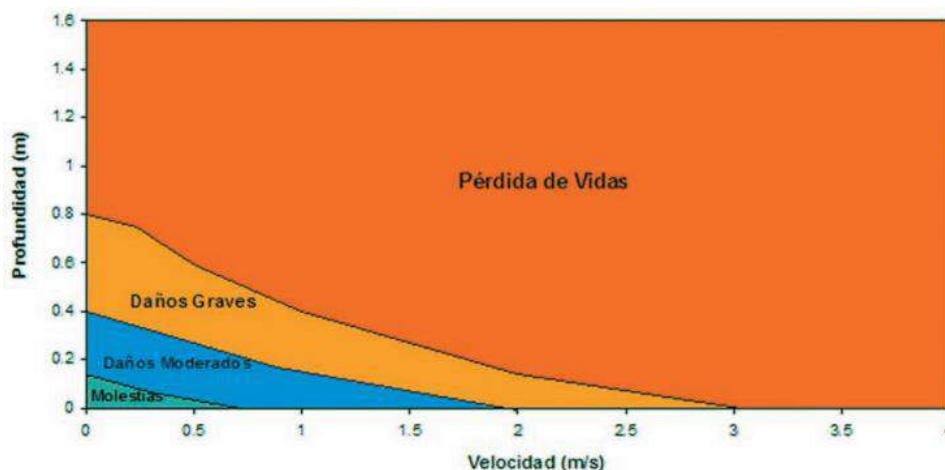


Figura 136. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)

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 53 y en la Tabla 54 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

Tabla 53. 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 54. 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 137 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad, de acuerdo con metodologías de.

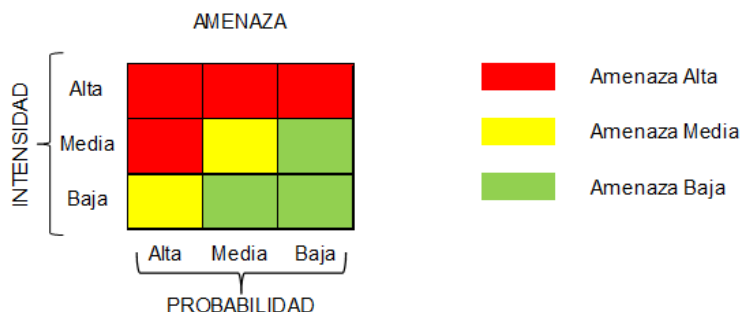




Figura 137. Asignación de la amenaza por Inundación a partir de la Intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al. (1997 y Fiebigger (1997) en López y Courtel 2006)

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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

contacto parcial o total con las manchas de inundación tengan en su perímetro de 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.

14.3 RESULTADOS

La evaluación de la amenaza por inundaciones generadas por las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1, principales drenajes del Polígono San Antonio, 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.

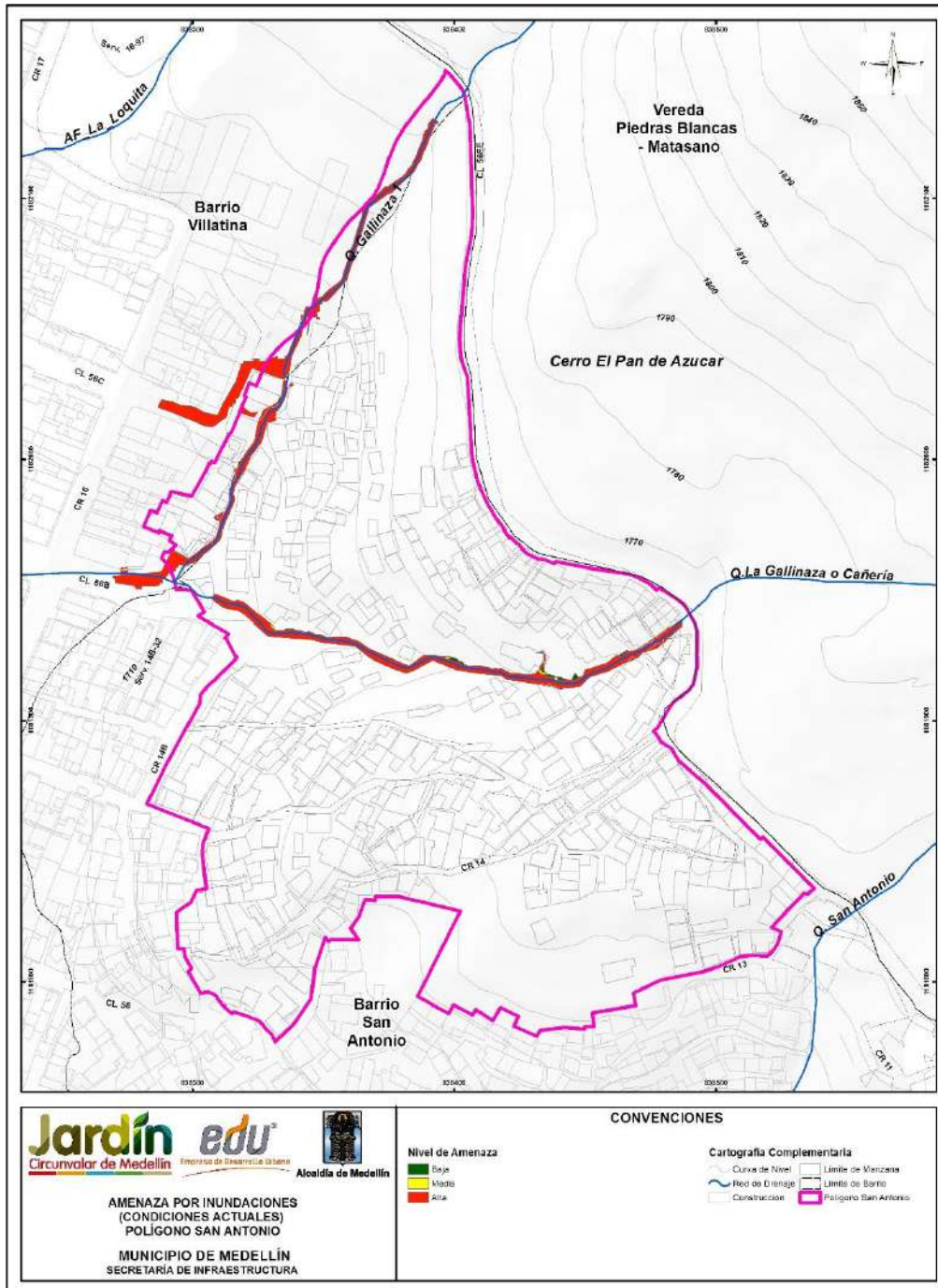
Sobre el costado centro oriental, la Quebrada La Gallinaza tiene como márgenes varias viviendas, colocando estas en situación de amenaza alta. En la zona central del polígono, la Quebrada La Gallinaza coloca en situación de amenaza baja y media algunas viviendas situación debida al alto grado de encajonamiento del cauce.

En el costado noroccidental del polígono se encuentra concentrada la amenaza alta, debido a que esta zona se encuentra directamente influenciada por la Quebrada La Gallinaza 1. En esta zona la mancha de inundación tiene contacto directo con las edificaciones de la zona dado que algunos de sus paramentos actúan como una margen para el flujo.

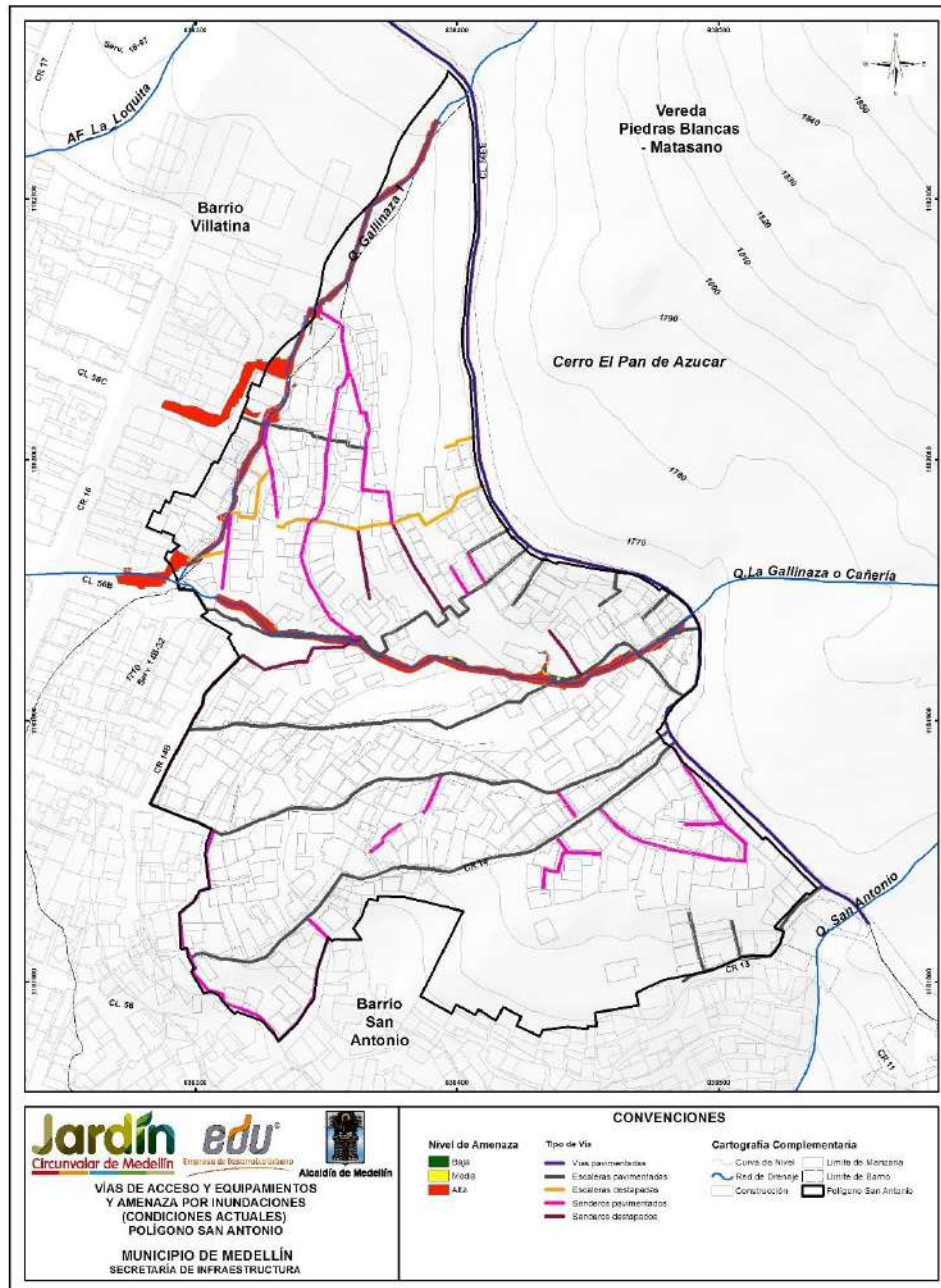
El flujo que no alcanza a ingresar a las obras fluye sobre la Carrera 16 y sobre la Calle 56B poniendo en situación de amenaza alta la pequeña plaza ubicada cerca del cruce de la Carrera 16 y la Calle 56B al igual que a estas vías.

En el Mapa 38 se presenta la amenaza por inundaciones para ambas quebradas en el Polígono San Antonio.



En el Mapa 39 se presenta la superposición de la amenaza por inundaciones con las líneas vitales asociadas a tramos de vías o andenes. Dada la ausencia de equipamientos para este polígono no se presenta la superposición de la amenaza con este tipo de infraestructura.



Mapa 38. Amenaza por Inundaciones Quebradas La Gallinaza y Gallinaza 1 del Polígono San Antonio en condiciones actuales.
(23_SATAmenzasInundaciones_Medellin_C y 23_SATAmenzasInundaciones_Medellin_T)



Mapa 39. Amenaza por Inundaciones, Vías de Acceso y Equipamientos del Polígono San Antonio en condiciones actuales (SATAmenazalInundacionAccesosEquipamiento_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 periodo de retorno hasta el 39.5% para las crecientes de 100 años periodo de retorno, considerando también un periodo de análisis de 50 años.

De acuerdo con los resultados del análisis de movimiento en masa ambos eventos pueden considerarse estadísticamente independientes, y 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.

En adición a la baja probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos tipo deslizamiento y de crecientes en los cauces, la capacidad que presentan las corrientes del polígono de estudio para movilizar grandes volúmenes de material es baja al considerar que los caudales máximos que transitan a través de ellos son inferiores a 5 m³/s para todos los periodos de retorno considerados, implicando con ello una baja capacidad erosiva.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

Con base en lo anterior, es posible afirmar que los eventos tipo avenidas torrenciales con origen en deslizamientos presentan una muy baja probabilidad de ocurrencia en el polígono de estudio. Este resultado es consistente con lo registrado en las actividades de exploración geológica donde no se detectaron depósitos de material torrencial a lo largo de los cauces investigados. Es consistente también con lo reportado en Desinventar.

15.3 AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN Y TRANSPORTE DEL MATERIAL 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. 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.

$$\tau_r = g \cos \theta \{ C_* (\sigma - \rho) a \} \tan \varphi + c$$

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

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):

$$\tau = \gamma R_H \sin \theta$$

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. 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 fueron presentados en el Numeral 10.3 de este informe y los cuales se resumen en la Tabla 55 para el cauce de la Quebrada la Gallinaza. En la Quebrada La Gallinaza 1 no se realiza este análisis dado que su cauce actualmente se encuentra cubierto con estructuras tipo canales y coberturas que eliminan la posibilidad de generarse en ellos procesos de remoción del lecho.

En la Tabla 55 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).

El esfuerzo ejercido por el flujo sobre el lecho en cada sección a lo largo de La Quebrada La Gallinaza se presenta en la Figura 138. En esta figura también se ha ubicado la menor cohesión existente de los materiales presentes en el cauce, y 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.

El análisis realizado permite por tanto concluir que no es factible la ocurrencia de la remoción desde el lecho de un volumen de material suficiente para ocasionar una avenida torrencial en el polígono de estudio.

Tabla 55. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el Polígono San Antonio

SAN ANTONIO	ϕ'	C'	γ
Qda La Gallinaza	[°]	[KPa]	[kN/m3]
Lleno Antrópico	26,90°	13,05	17,43
Depósitos de flujo y escombros	24,13°	22,79	17,43
Dunitas de Medellín (JKuM)	26,50°	24,20	16,71

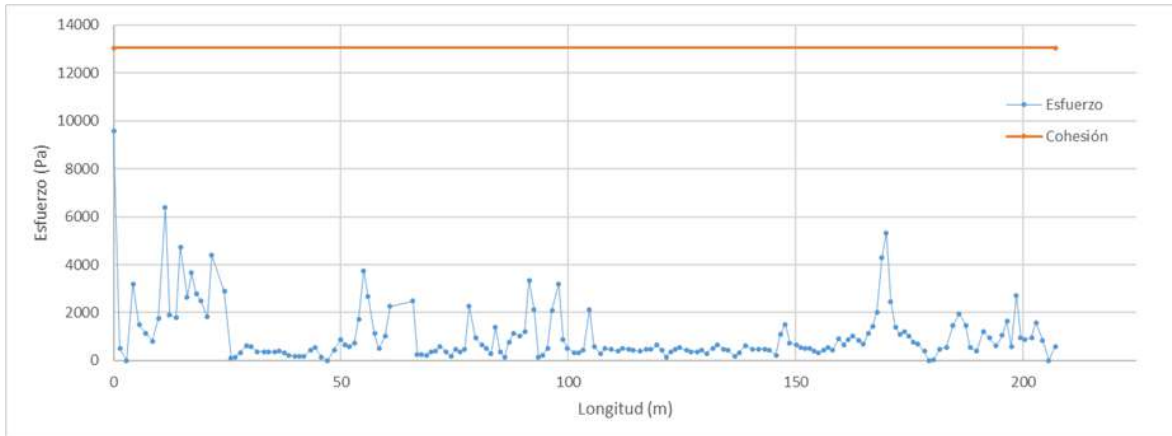




Figura 138. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Gallinaza.

15.4 RESULTADOS

Por lo anotado en este capítulo, se concluye que el Polígono San Antonio no presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales. De esta manera, los caudales para la modelación hidráulica corresponden a los de aguas claras sin considerar las mayoraciones que estipula el Acuerdo 09 de 2012 para cuando existe amenaza de torrencialidad.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 con 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 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), viviendas 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.

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 con 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 por 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 viviendas.

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 (estructuras o vías, entre otros), 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 (Hungry, 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 (Figura 139). Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

$$I = \begin{cases} I_{gem} \cdot I_{dfm} & \text{Factor de intensidad geométrico, cuando las estructuras} \\ & \text{están dentro del movimiento en masa} \\ I_{din} \cdot I_{dpt} & \text{Factor de intensidad dinámico, cuando las estructuras están} \\ & \text{fuera del movimiento en masa} \end{cases}$$

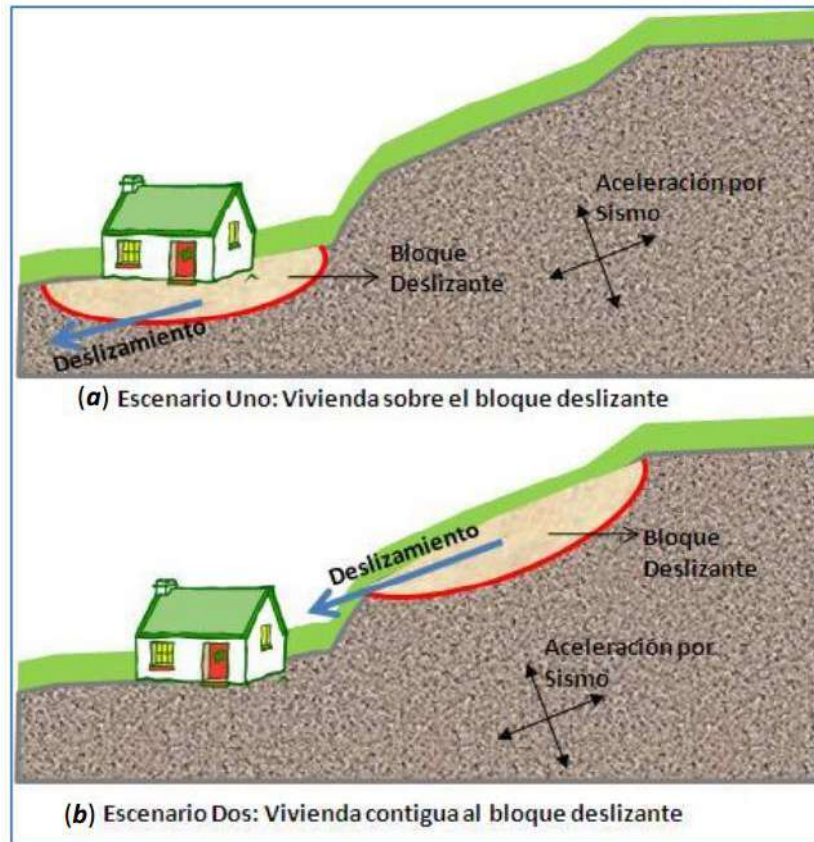


Figura 139. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa

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 56) 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 56. 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_{sht}), 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 podrían establecer unos rangos de valores para determinadas profundidades de fundación.

- $\xi_{sfd}=1.05$ Para $D_{fun} > 10m$
- $\xi_{sfd}=0.63$ Para $2m < D_{fun} < 10m$
- $\xi_{sfd}=0.5$ Para $D_{fun} < 2m$

De la Tabla 57 hasta la Tabla 59 se presentan los demás factores que hacen parte de la evaluación de la resistencia de las estructuras propiamente.

Tabla 57. 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 58. 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 59. 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 140 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 $Z=h/d$.

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 141 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.

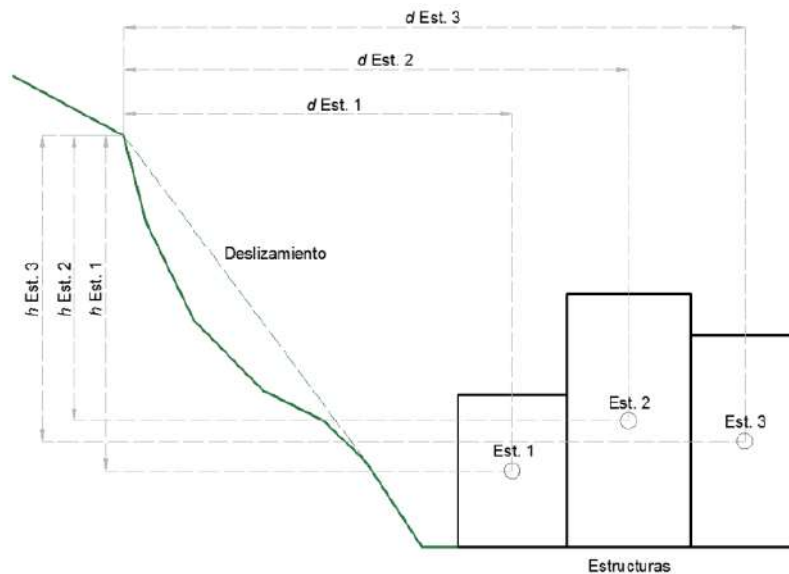


Figura 140. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables

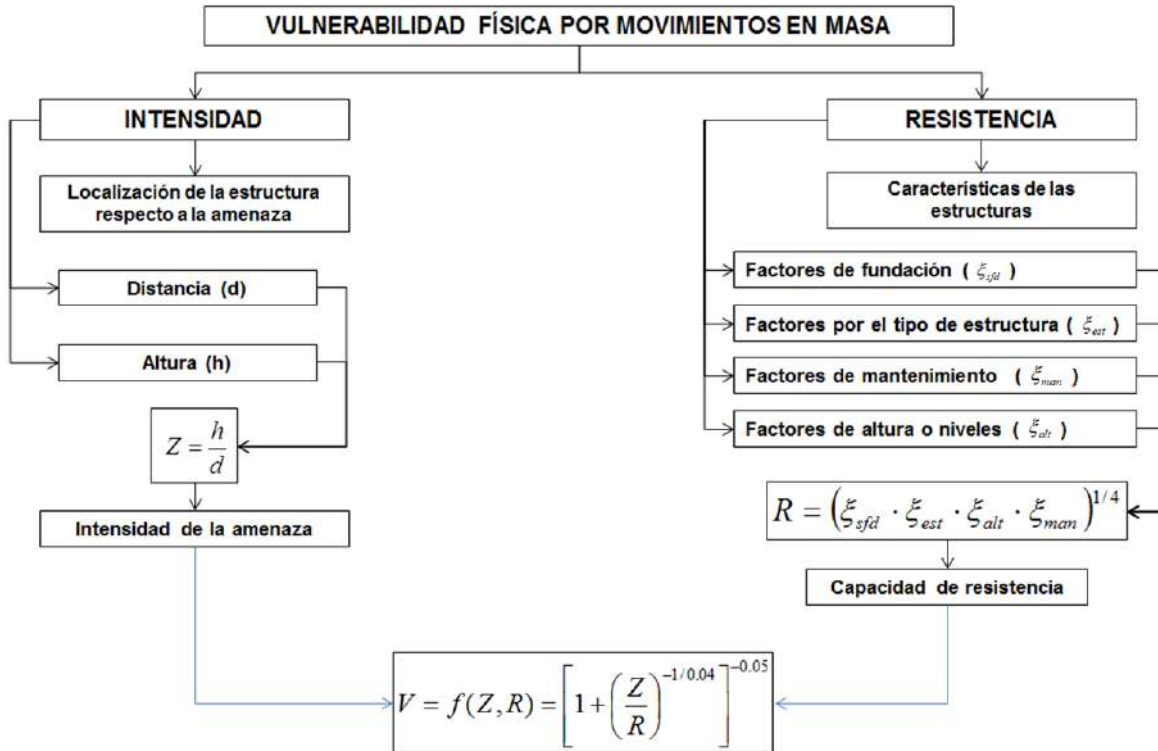


Figura 141. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa

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 asociada al Polígono San Antonio, se presentó el conocido como Deslizamiento Villatina, que generó una mancha de deslizamiento clave para la calibración de la metodología de trabajo. 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 como Peldaño Tectónico (Numeral 5.2.1), 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 142).

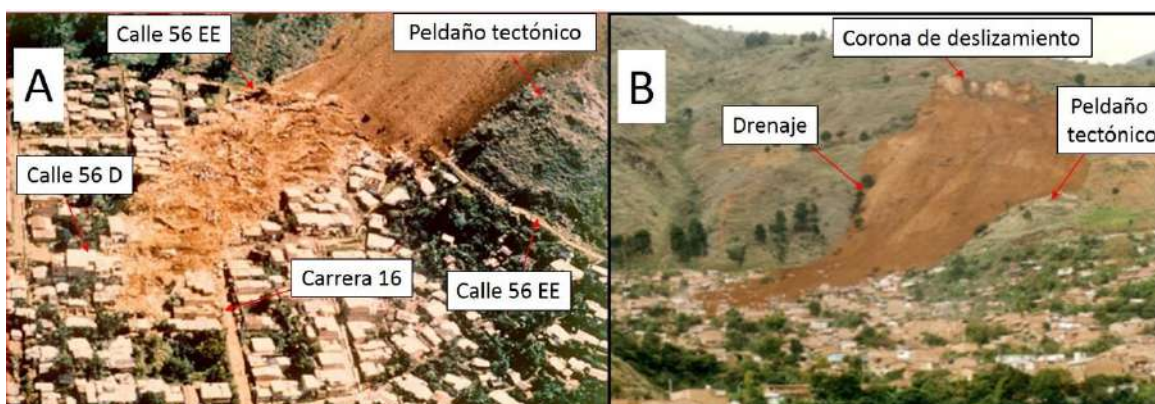


Figura 142. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo

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 143).

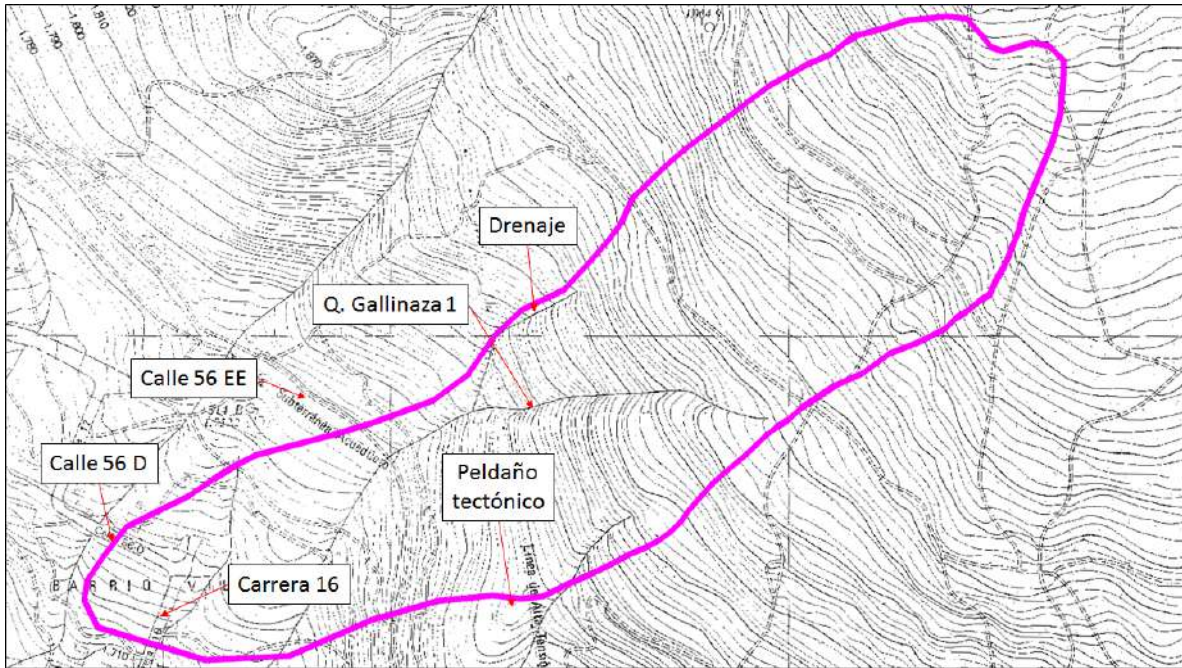


Figura 143. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías

La Figura 144, 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.

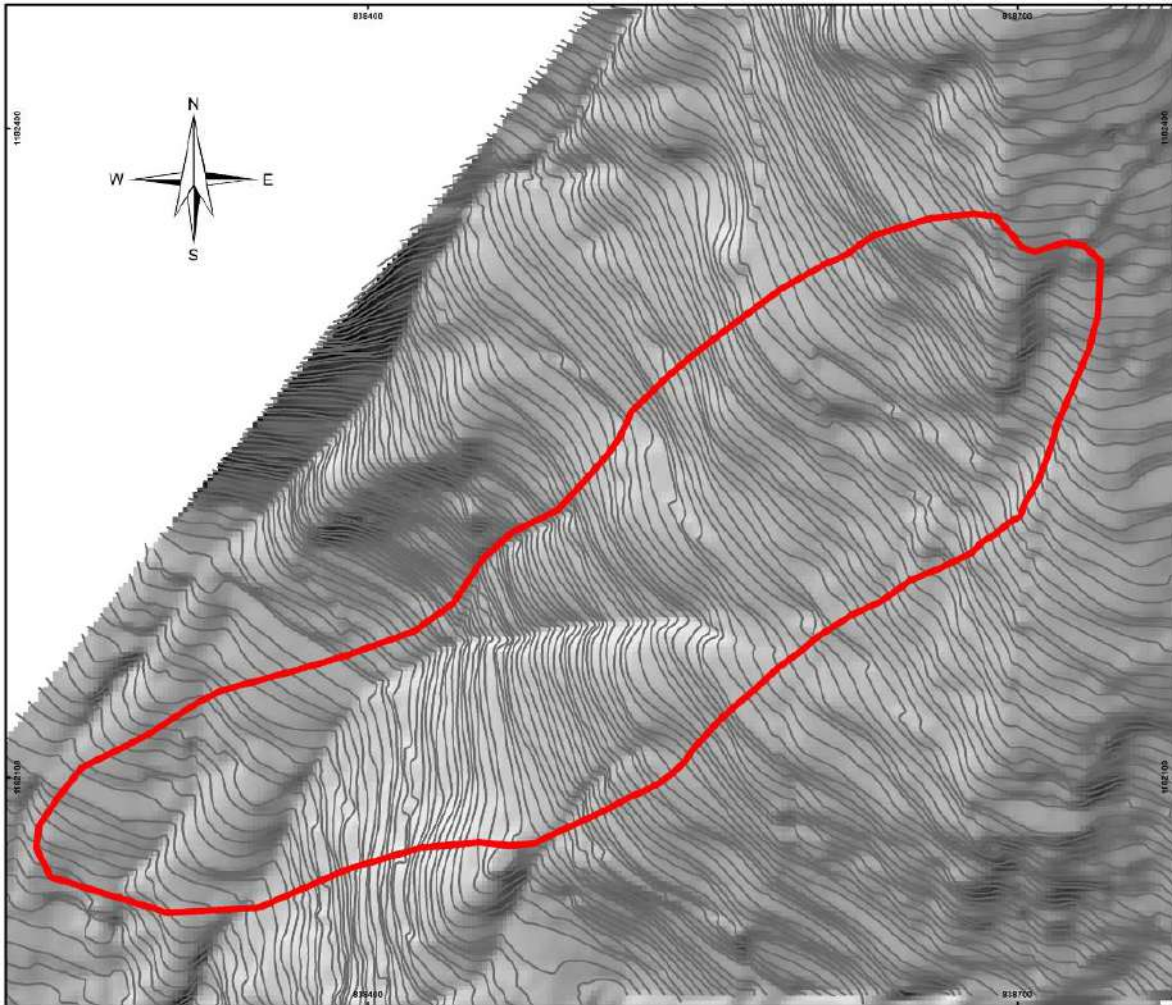




Figura 144. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973

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 geomorfos 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

comporta distinto al occidente y al oriente. En el Mapa 12 y la Figura 24, del Numeral 5.2, se presentaron las unidades geomorfológicas y el Perfil A-A', trazado en parte de la zona del deslizamiento Villatina, de la UMI San Antonio.

El movimiento se extiende hacia el oriente hasta la unidad geomorfológica peldaño tectónico (PÑT) que sirve como barrera que desvío 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 cañon de la Quebrada Gallinaza 1 como en el cañon de una quebrada que se observa claramente en la cartografía del IGAC (1973) y en las fotografías planteadas en la Figura 142. 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 142). 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.

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 geométricamente. 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 140 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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

- ✓ 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).
- ✓ 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 145, a continuación, presenta en una misma imagen el mapa del modelo geológico 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 145 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.

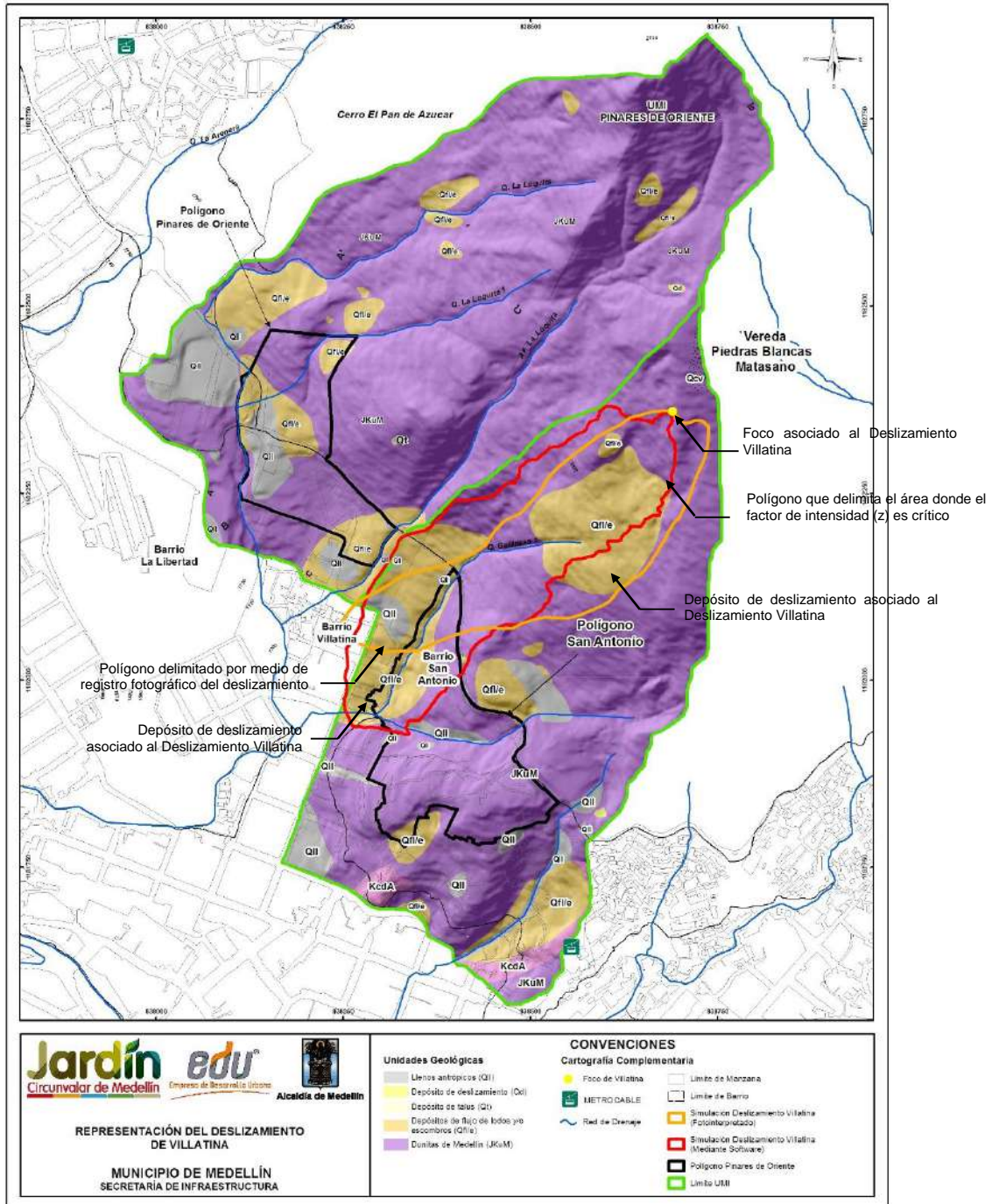




Figura 145. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 todo, 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 Camo 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 exactamente 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 inició 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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.

Para la delimitación del polígono de intervención, se utilizaron los siguientes referentes físicos: Área de preservación para infraestructuras con desarrollo restringido SE_API_05 Cerro Pan de Azúcar que contiene el Ecoparque Las Tinajas y que afecta el polígono al oriente por la Calle 56EE. Por el norte con la línea de retiro de la Quebrada La Gallinaza 1 en el Parque Campo Santo Villatina. Por el sur con el sector La Torre y la Quebrada San Antonio. Finalmente, al occidente limita con el Barrio Villatina y las Calles 15A y 14B.

El polígono fue dividido en 21 zonas (Figura 146), considerando principalmente el número de pisos, el estado de las estructuras y el tipo de estructura. De la zonificación realizada se resaltan por ejemplo, las zonas críticas como son la Zona 2 por presentar altas pendientes y construcciones en madera y mampostería muy malas y las Zonas 4 y 6 por presentar estructuras en muy mal estado estar ubicadas muy cerca de la Quebrada La Gallinaza. De igual manera se resaltan las Zonas 7, 8 y 9 por estar bien consolidadas en mampostería, en la mayoría de viviendas, y la Zona 21 porque se encuentran en buen estado, la mayoría de las estructuras están construidas en mampostería de concreto.

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 con 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 San Antonio, con un total de 385 estructuras. Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. El Mapa 40 presenta las vías de acceso y equipamientos del polígono objeto de estudio.

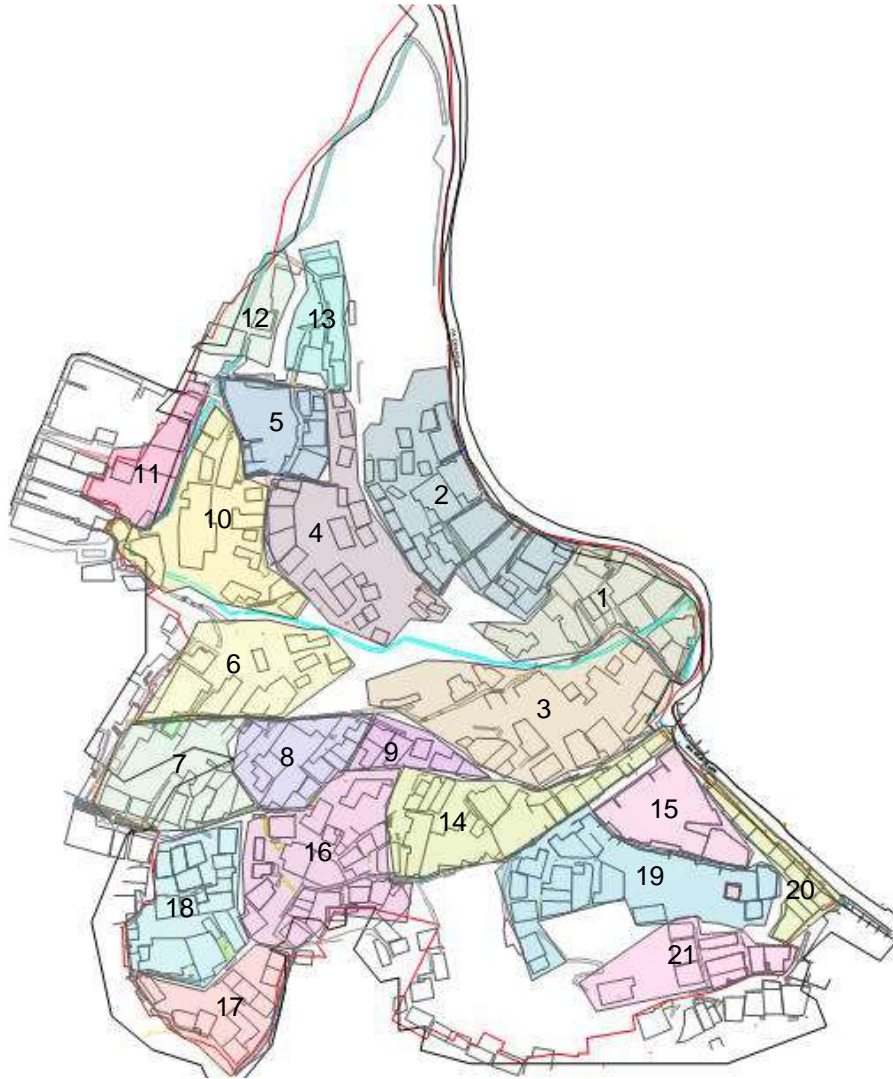
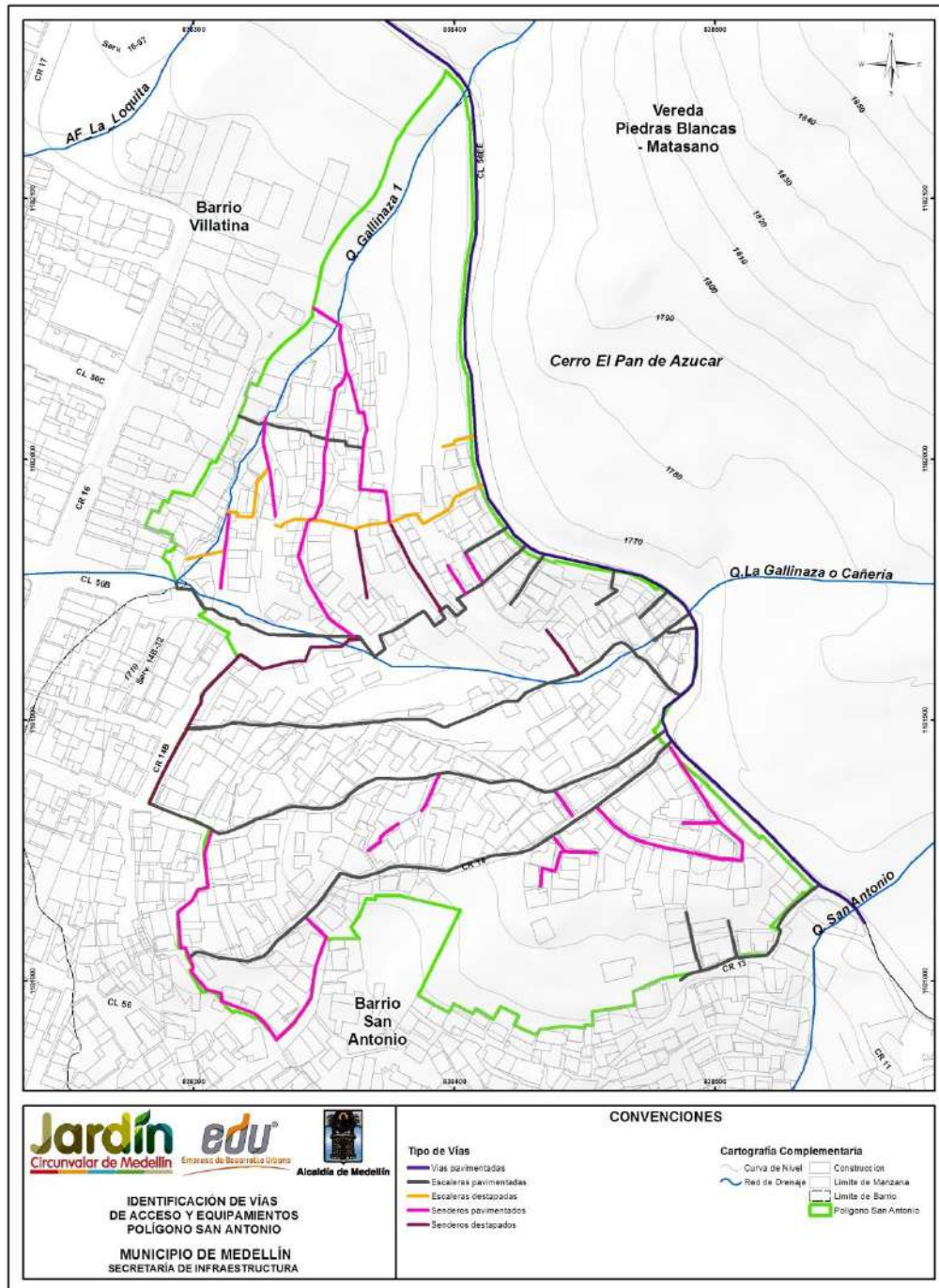




Figura 146. Esquema de la zonificación del Polígono San Antonio (Sin escala)



Mapa 40. Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono San Antonio (35_SATViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_C y 35_SATViasdeAccesosyEquipamientos_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

Luego de recopilada la información de campo, esta 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 60 a Tabla 64) para facilitar la interpretación de los resultados.

De forma general, las viviendas que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio que hace referencia a un estado entre bueno y malo. 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 viviendas 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 viviendas 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 San Antonio se tienen las siguientes características principales:

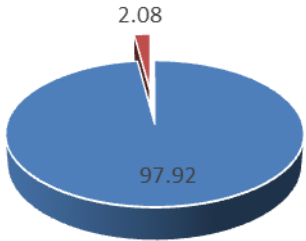
- ✓ El uso predominante en el Polígono San Antonio es el residencial, con un 97.92% de los usos presentes. Las construcciones de uso comercial son pocas, con 2.08% (Tabla 60).
- ✓ La gran mayoría de las estructuras están construidas en mampostería, con un 84.94% y el 15.06% restante corresponde a las construcciones en madera (ligera) (Tabla 61).
- ✓ El Polígono San Antonio presenta en su mayoría estructuras en estado medio, lo cual significa que estructuralmente se cuenta con estructuras de materiales tradicionales (concreto y mampostería) en un estado aceptable. Esta calificación de estado medio tiene un porcentaje de estructuras de 84.42%. El estado que le sigue es el malo con un 8.83%. Los estados muy malo, bueno y muy bueno se encuentran en menores porcentajes con el 3.90%, 2.34% y 0.52%, respectivamente (Tabla 62).
- ✓ En el Polígono San Antonio por lo menos la mitad de las viviendas inspeccionadas poseen un nivel construido con un 58.18% del total. Le siguen las construcciones de dos niveles con el 36.36% y por último se encuentran las edificaciones entre tres y cinco niveles con un 5.45% (Tabla 63).
- ✓ Un poco más de la mitad de las construcciones tienen cubierta en teja de zinc con un 64.94%, le siguen las cubiertas en eternit con un 31.69%. Las cubiertas en losa

y otro tipo se encuentran en menores porcentajes con el 2.08% y 1.30%, respectivamente (Tabla 64).

- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del polígono San Antonio, se identificó que el 100% de las estructuras poseen fundaciones superficiales a través de sistemas de encepados en concretos ciclópeos conformados por piedra y mortero.

Tabla 60. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa

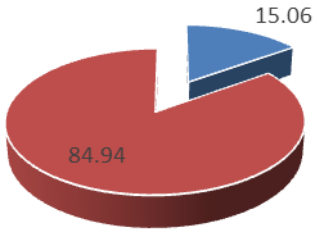
Ocupación	Total Viviendas	%
Residencial	377	97.92
Comercial	8	2.08
Total	385	100



■ Residencial ■ Comercial

Tabla 61. Tipo de estructura – Movimiento en Masa

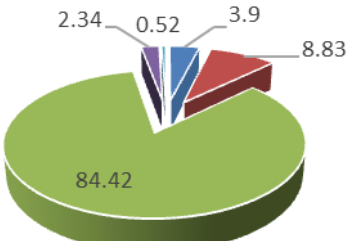
Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	58	15.06
Mampostería	327	84.94
Total	385	100



■ Ligera ■ Mampostería

Tabla 62. Estado de la estructura – Movimiento en Masa

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Muy mala	15	3.90
Mala	34	8.83
Media	325	84.42
Buena	9	2.34
Muy buena	2	0.52
Total	385	100



■ Muy mala ■ Mala
 ■ Media ■ Buena
 ■ Muy buena

Tabla 63. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa

Altura Estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	224	58.18
De 2 pisos	140	36.36
De 3 a 5 pisos	21	5.45
Total	385	100

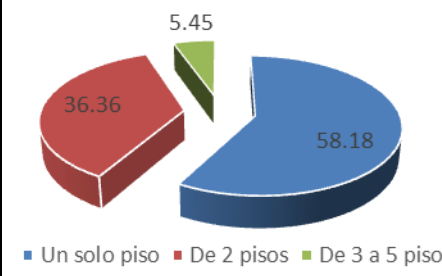
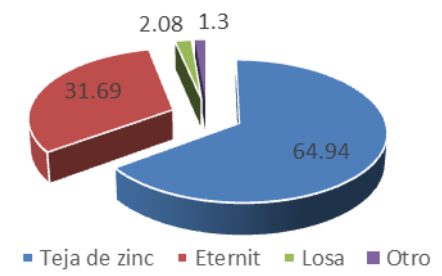
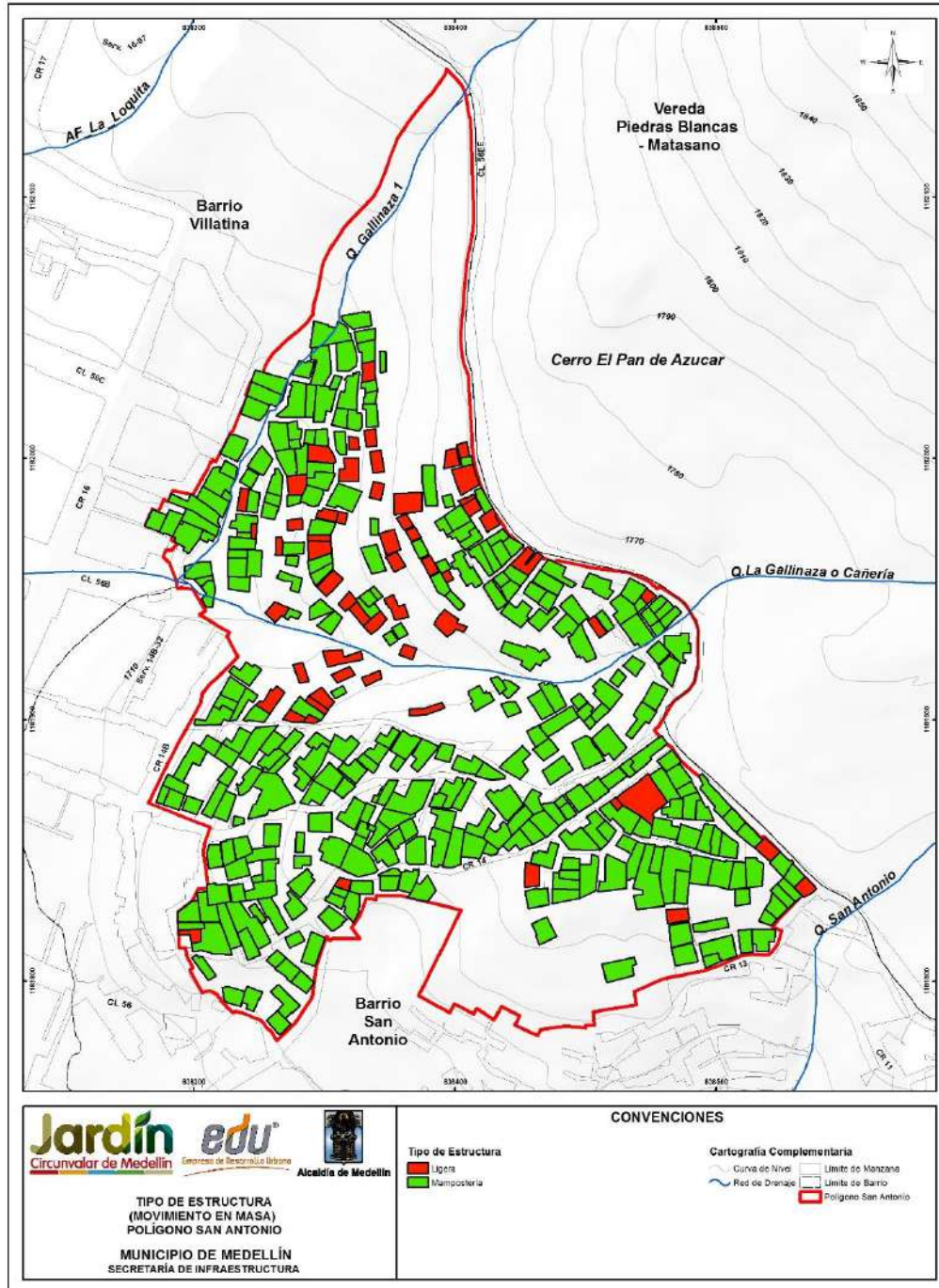


Tabla 64. Tipo de cubierta – Movimiento en Masa

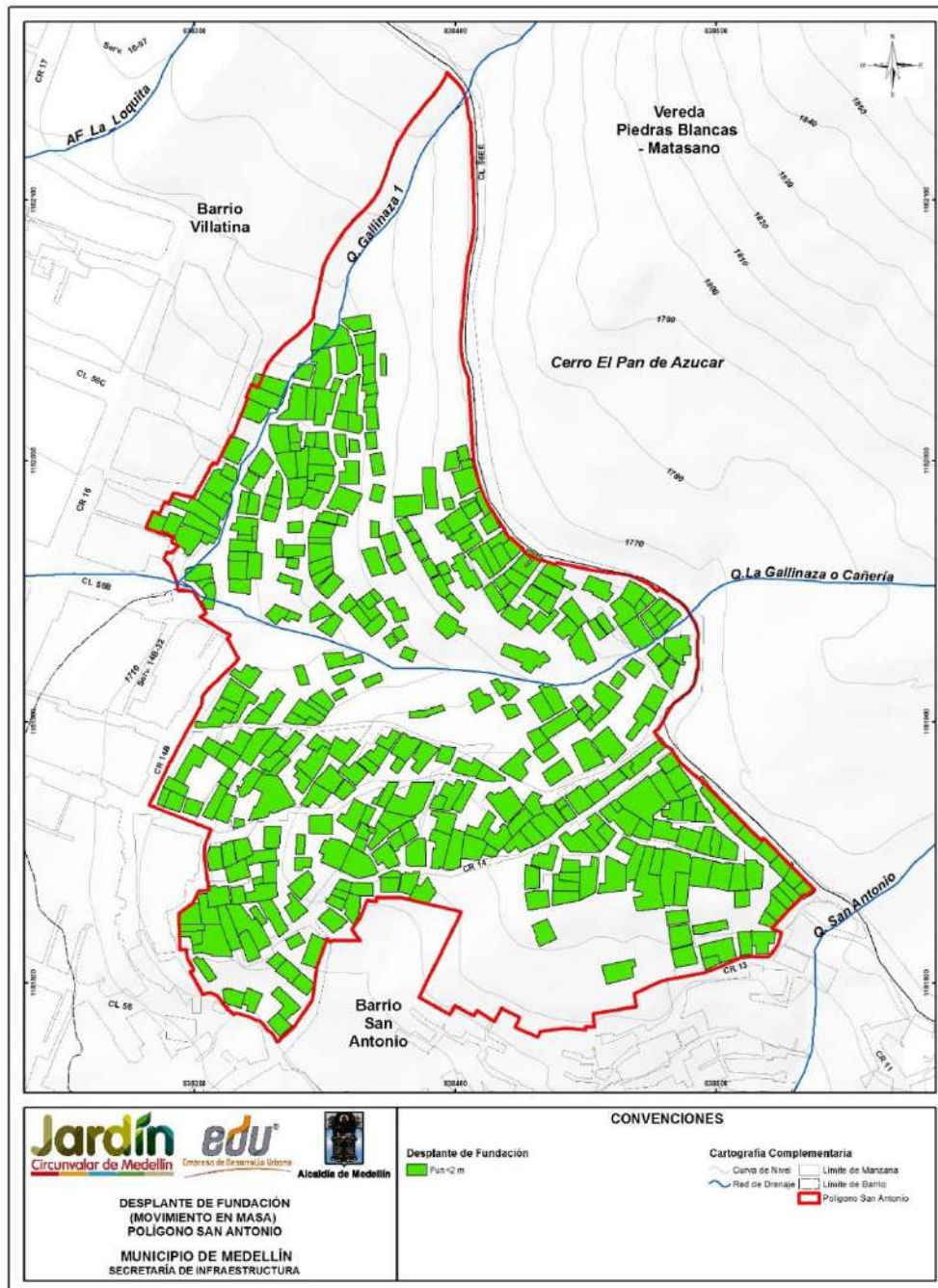
Tipo Cubierta	Total Viviendas	%
Teja de zinc	250	64.94
Eternit	122	31.69
Losa	8	2.08
Otro	5	1.30
Total	385	100



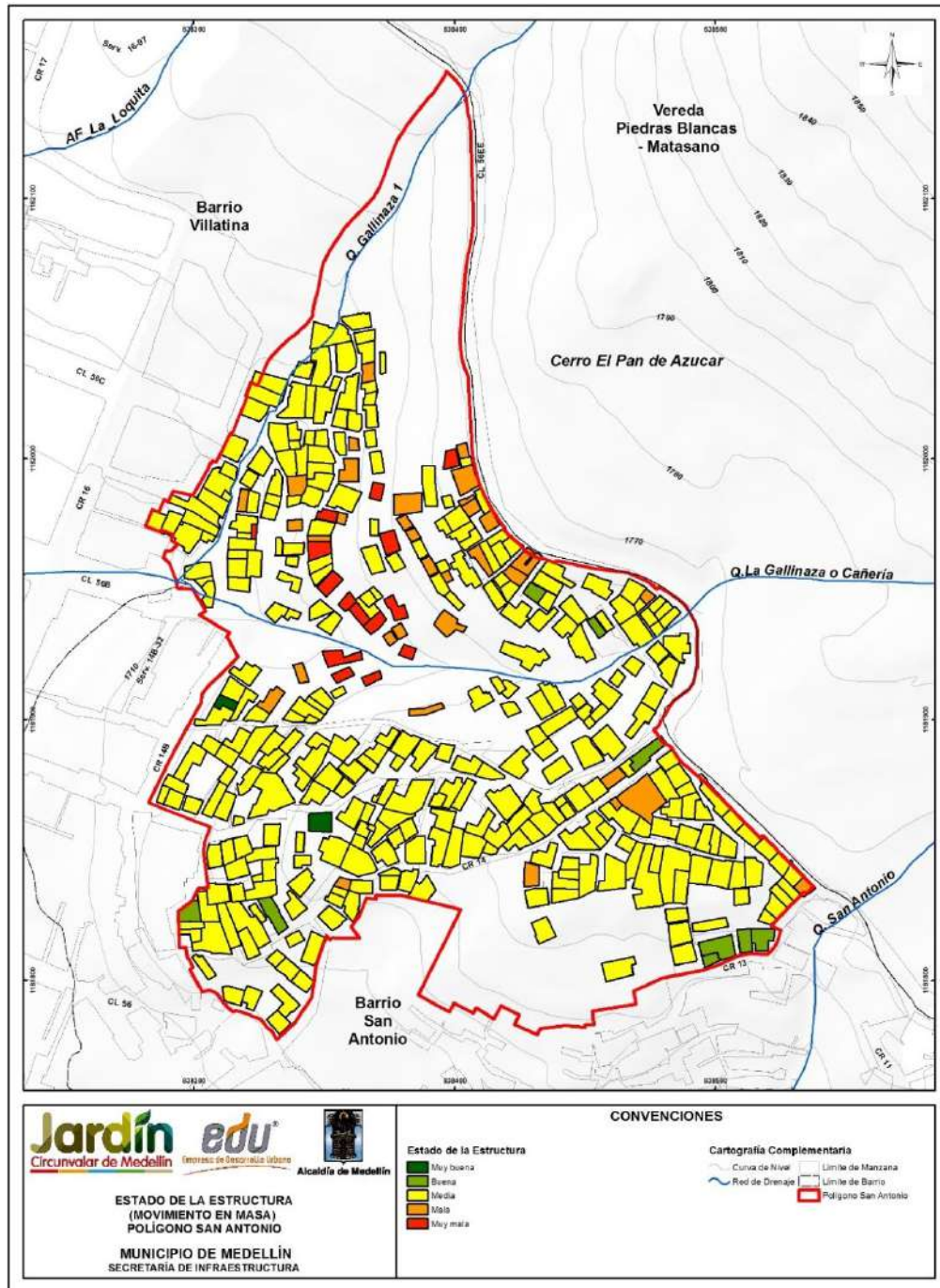
Además de los análisis estadísticos, se realizaron mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, los cuales se presentan del Mapa 41 al Mapa 45.



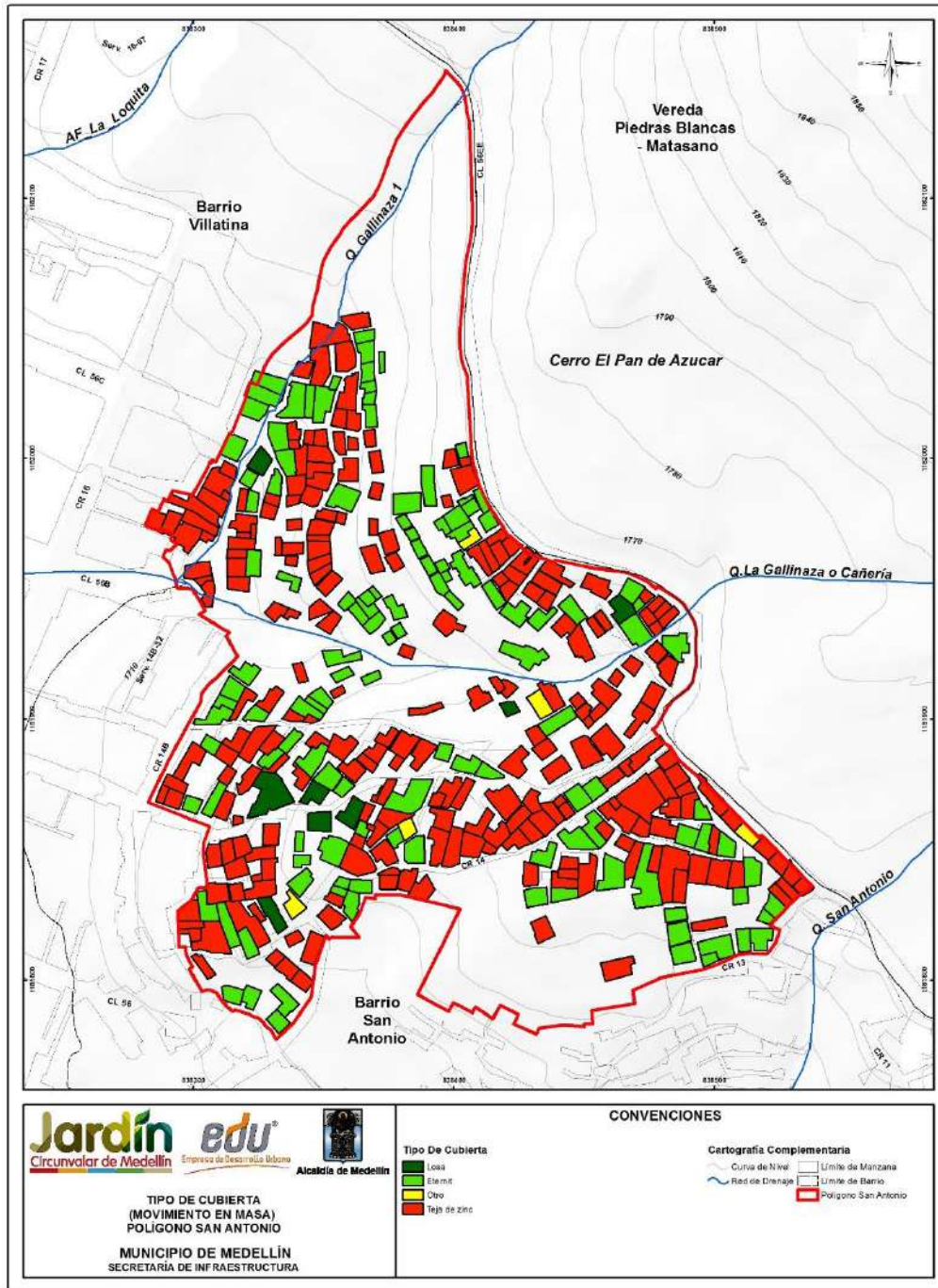
Mapa 41. Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono San Antonio
(25_SATTipodeEstructura_Medellin_C y 25_SATTipodeEstructura_Medellin_T)



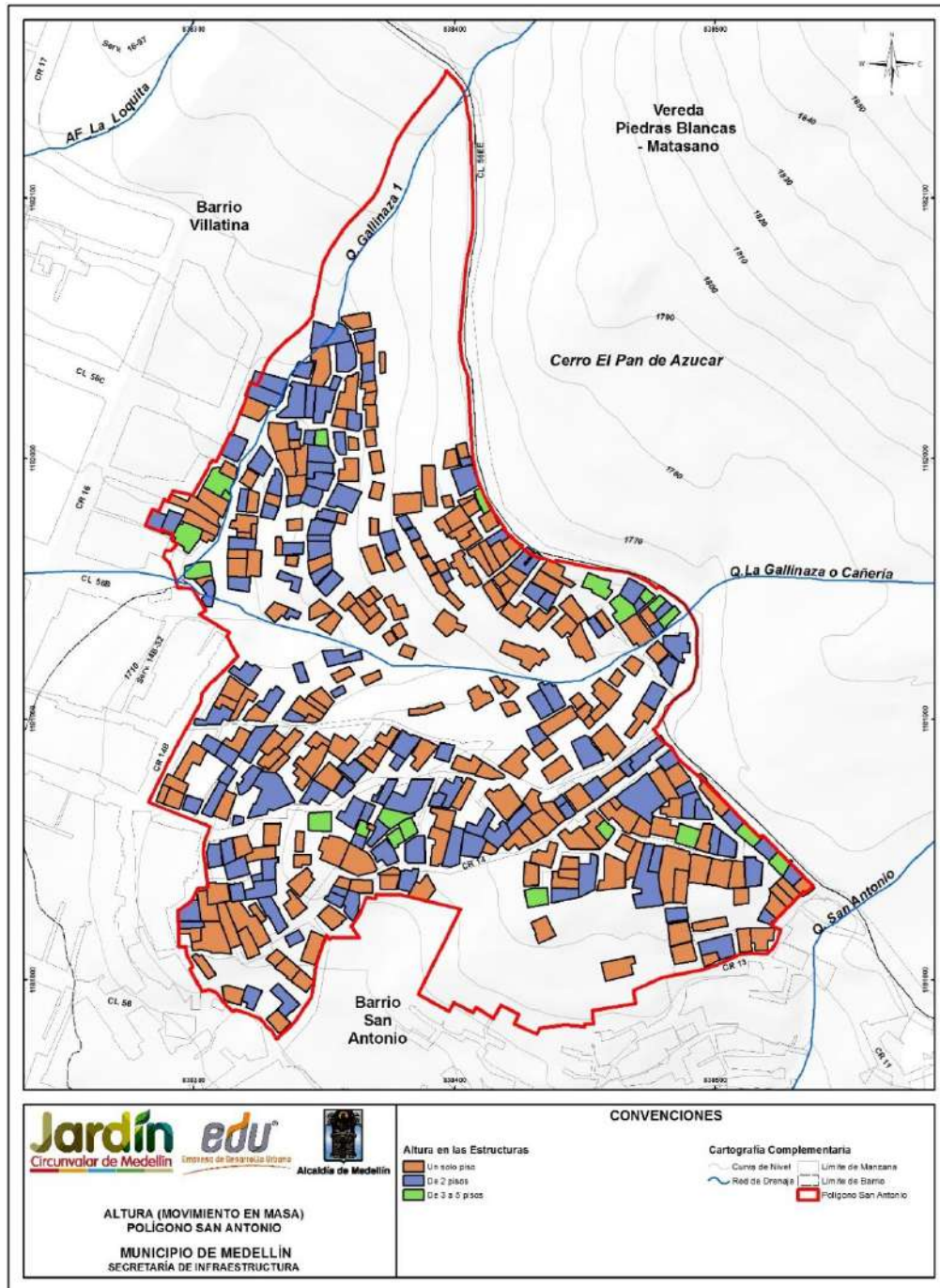
Mapa 42. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono San Antonio (26_SATDesplantedeFundaciones_Medellin_C y 26_SATDesplantedeFundaciones_Medellin_T)





Mapa 43. Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono San Antonio (27_SATEstadodelaEstructura_Medellin_C y 27_SATEstadodelaEstructura_Medellin_T)



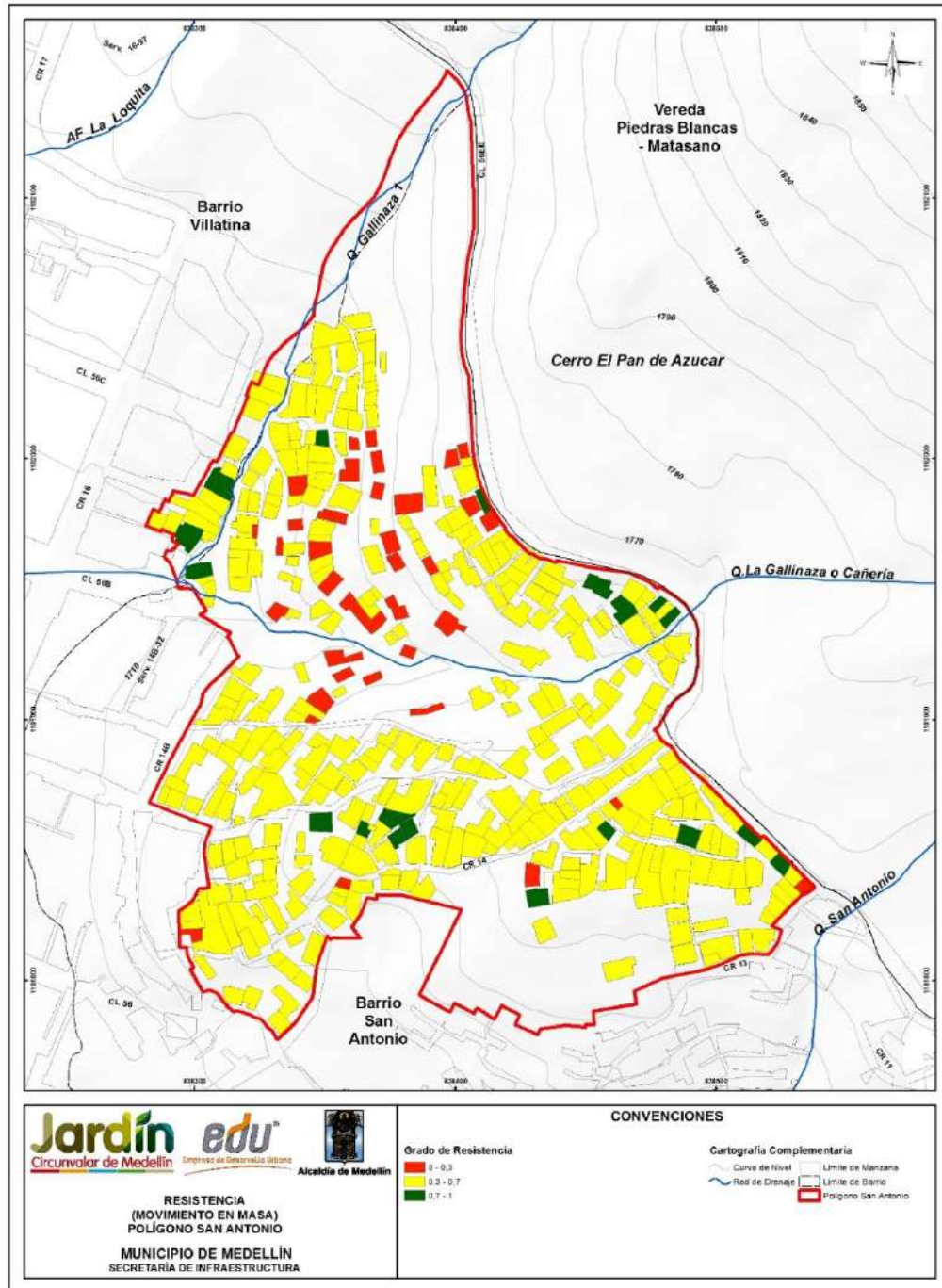
Mapa 44. Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono San Antonio
(28_SATTipodeCubierta_Medellin_C y 28_SATTipodeCubierta_Medellin_T)



Mapa 45. Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono San Antonio (29_SATAIuradelaConstruccion_Medellin_C y 29_SATAIuradelaConstruccion_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

Luego del análisis de 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 movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. El Mapa 46 presenta la distribución del factor resistencia para las viviendas donde un factor de resistencia de 1.0 corresponde a una vivienda de máxima resistencia. Este muestra que de las 385 estructuras, 41 de ellas presentan resistencia baja (10.65%), 324 presentan resistencia media (84.16%) y 20 presentan resistencia alta (5.19%). Las construcciones de resistencia media, que son las que prevalecen en el polígono, corresponden en su gran mayoría a estructuras de mampostería de uno y dos pisos.



Mapa 46. Parámetro de resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa (30_SATMapadeResistencia_Medellin_C y 30_SATMapadeResistencia_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 San Antonio, observado en el Mapa 46, se procedió a determinar el factor intensidad (z) a través de los focos de los movimientos en masa más probables.

Para determinar el factor intensidad (z) en cada polígono, se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años (Mapa 37). En este mapa se determinaron las zonas de máxima probabilidad de falla y se evaluó su proximidad al polígono en estudio. El factor intensidad (z) de los movimientos en masa más probables, se determinó mediante la relación entre la diferencia de altura (h) y la distancia real del terreno (d), ambas medidas entre el foco del deslizamiento y el centroide de las estructuras. Finalmente, se obtuvo el factor de intensidad mostrado en el Mapa 47, por efecto del movimiento en masa y su localización respecto a su foco más probable, que en conjunto con la resistencia (R), permitía obtener la vulnerabilidad estructural de cada elemento:

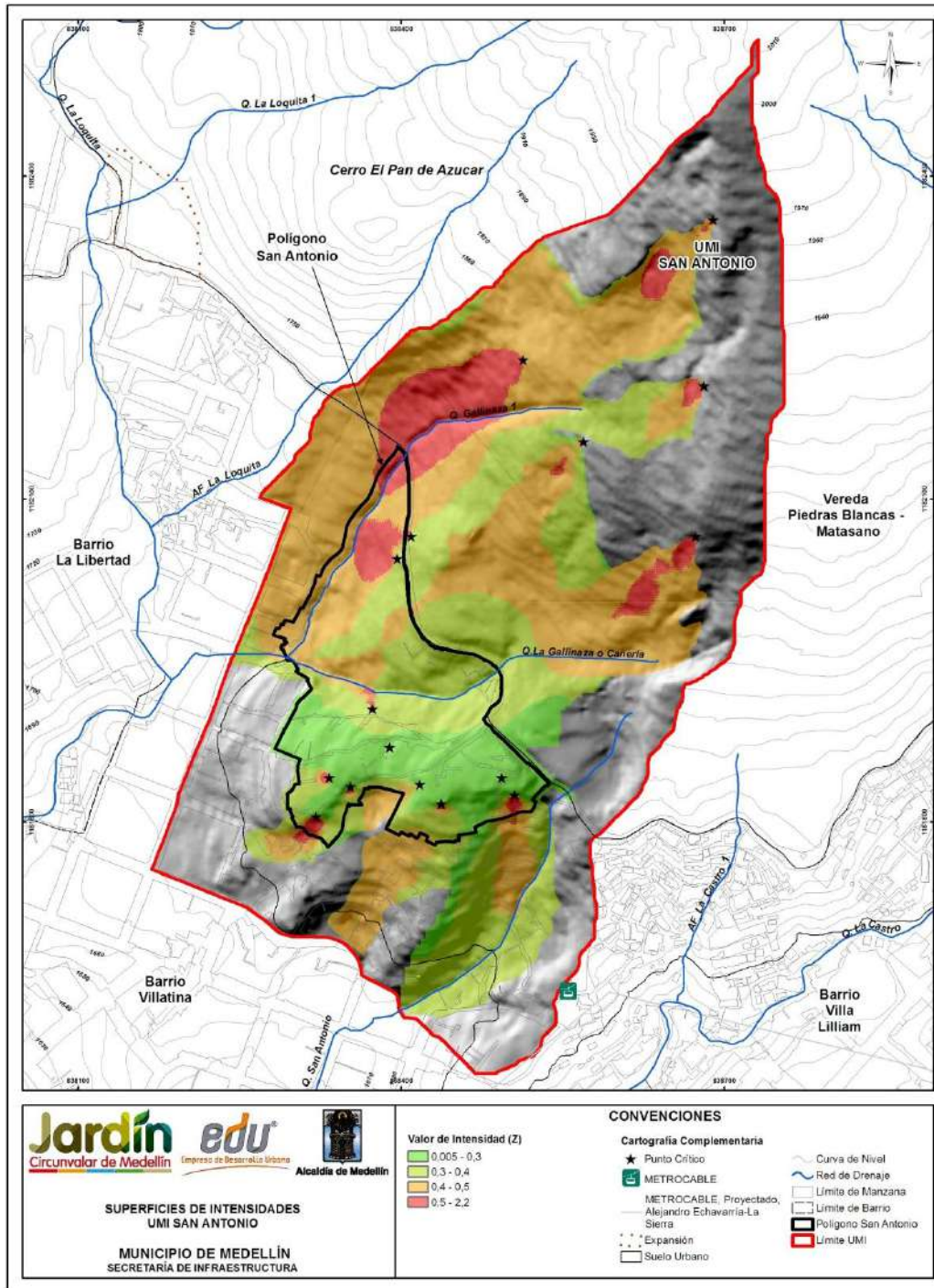
$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

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, valor que bien puede representar un factor de daño. La Tabla 65 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.

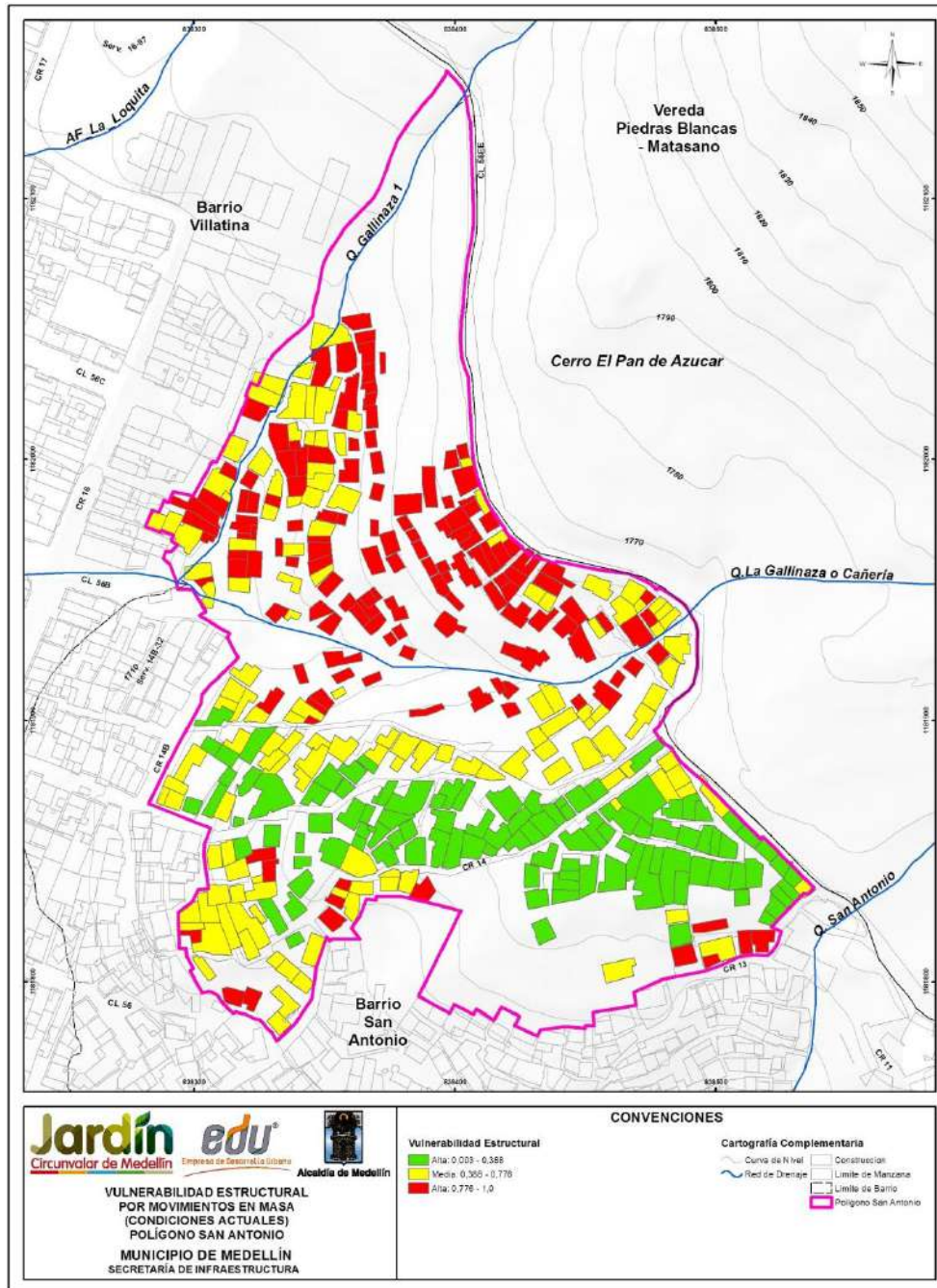
Tabla 65. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría Vulnerabilidad	Rango 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.

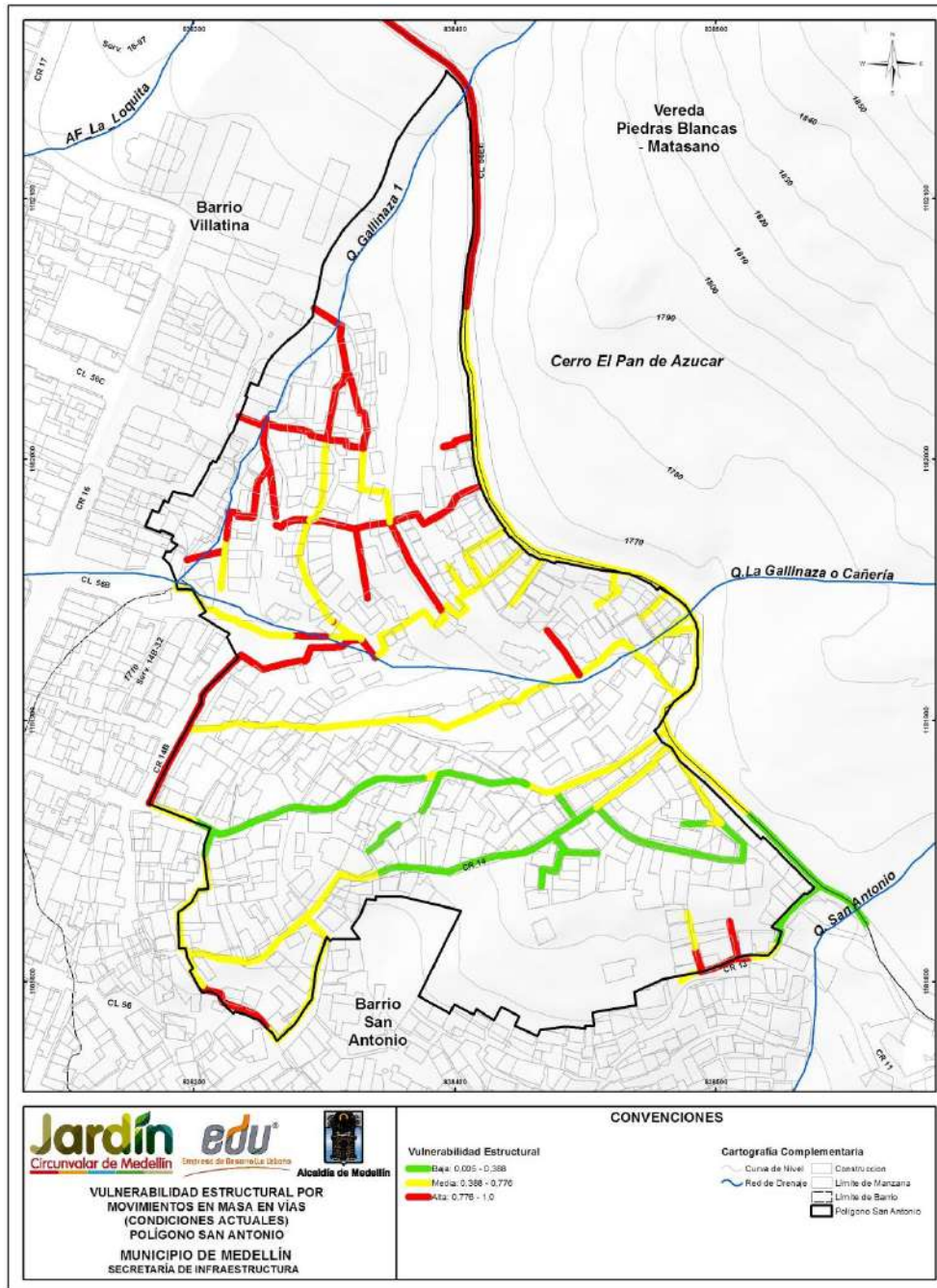
El Mapa 48 y el Mapa 49 presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso del Polígono San Antonio, respectivamente, clasificando entre baja, media y alta según el criterio mostrado en la Tabla 65.



Mapa 47. Factor de intensidad de deslizamientos que afectan el Polígono San Antonio (SATSuperficieIntesidadesZUMI_Medellin_C)



Mapa 48. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono San Antonio
(36_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 36_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 49. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono San Antonio
(45_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_Cy
45_SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

La Figura 147 muestra la distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras por movimientos en masa presentada en el Mapa 48. Se ilustra que cerca de un 36% de las estructuras presentes al interior del Polígono San Antonio presentan una vulnerabilidad media, el 28% presentan una vulnerabilidad baja y el 37% presentan una vulnerabilidad alta. La comparación entre la Figura 146 y el Mapa 48 permitieron observar que las zonas donde se concentra la vulnerabilidad estructural alta hacen parte de las Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 13, 16, 17, 18 y 21. En estas zonas, según el análisis de resistencia, se tienen estructuras en estado medio y con una mayor concentración de estructuras en mampostería.

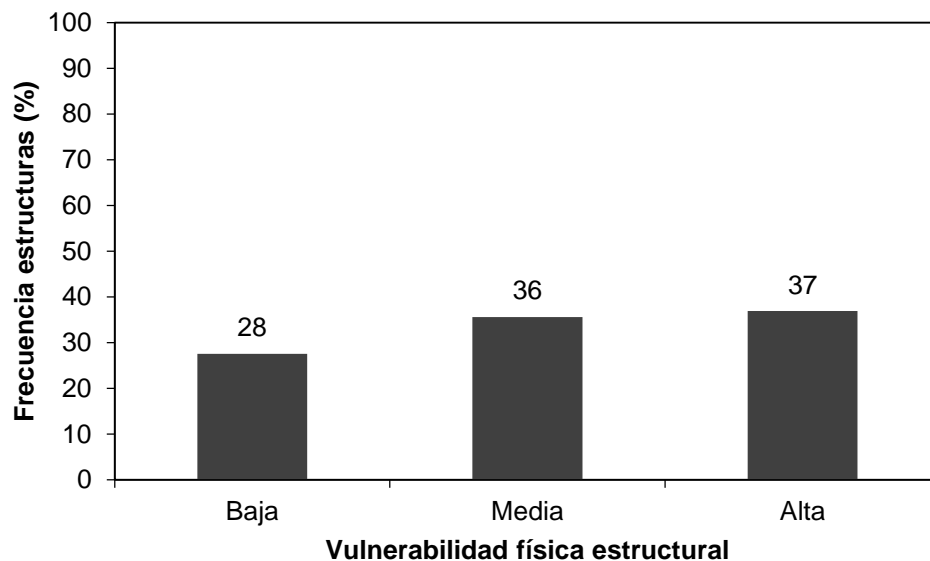


Figura 147. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras

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 numero 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 66.



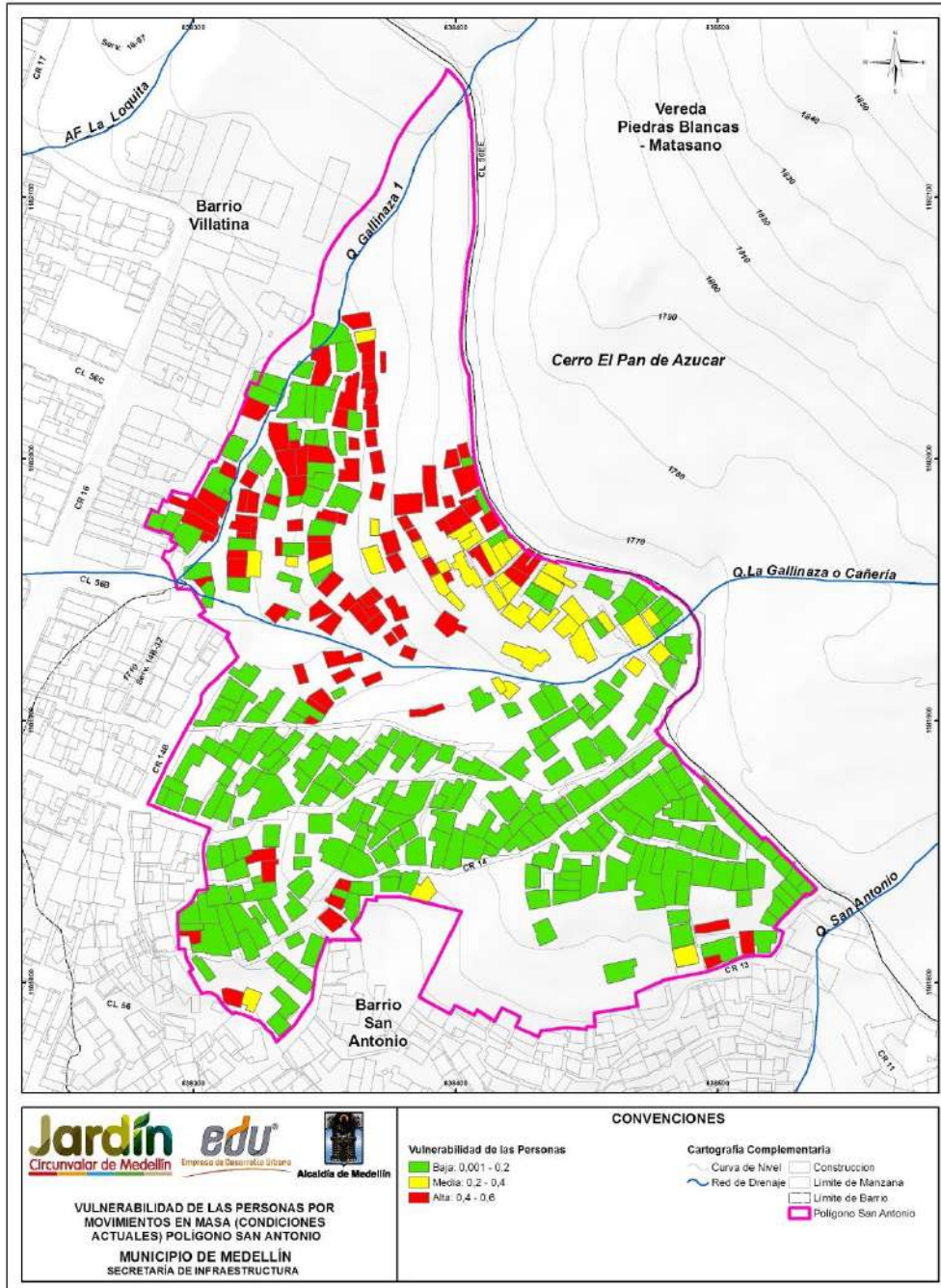
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

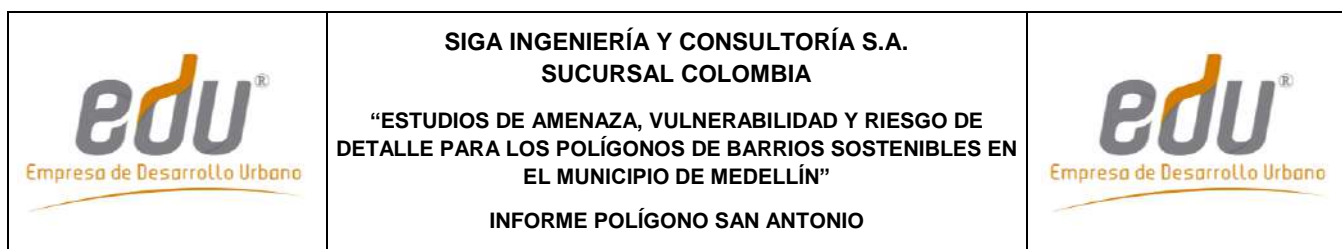
Tabla 66. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa

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.

El Mapa 50 presenta el análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono San Antonio por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. En la figura se observa que de las 385 estructuras, 252 de ellas presentan una baja vulnerabilidad de personas (65%), 37 presentan vulnerabilidad de personas media (10%) y 96 presentan alta vulnerabilidad de las personas (25%). 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 en el Polígono San Antonio.



Mapa 50. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono San Antonio
(37_SATVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y 37_SATVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)



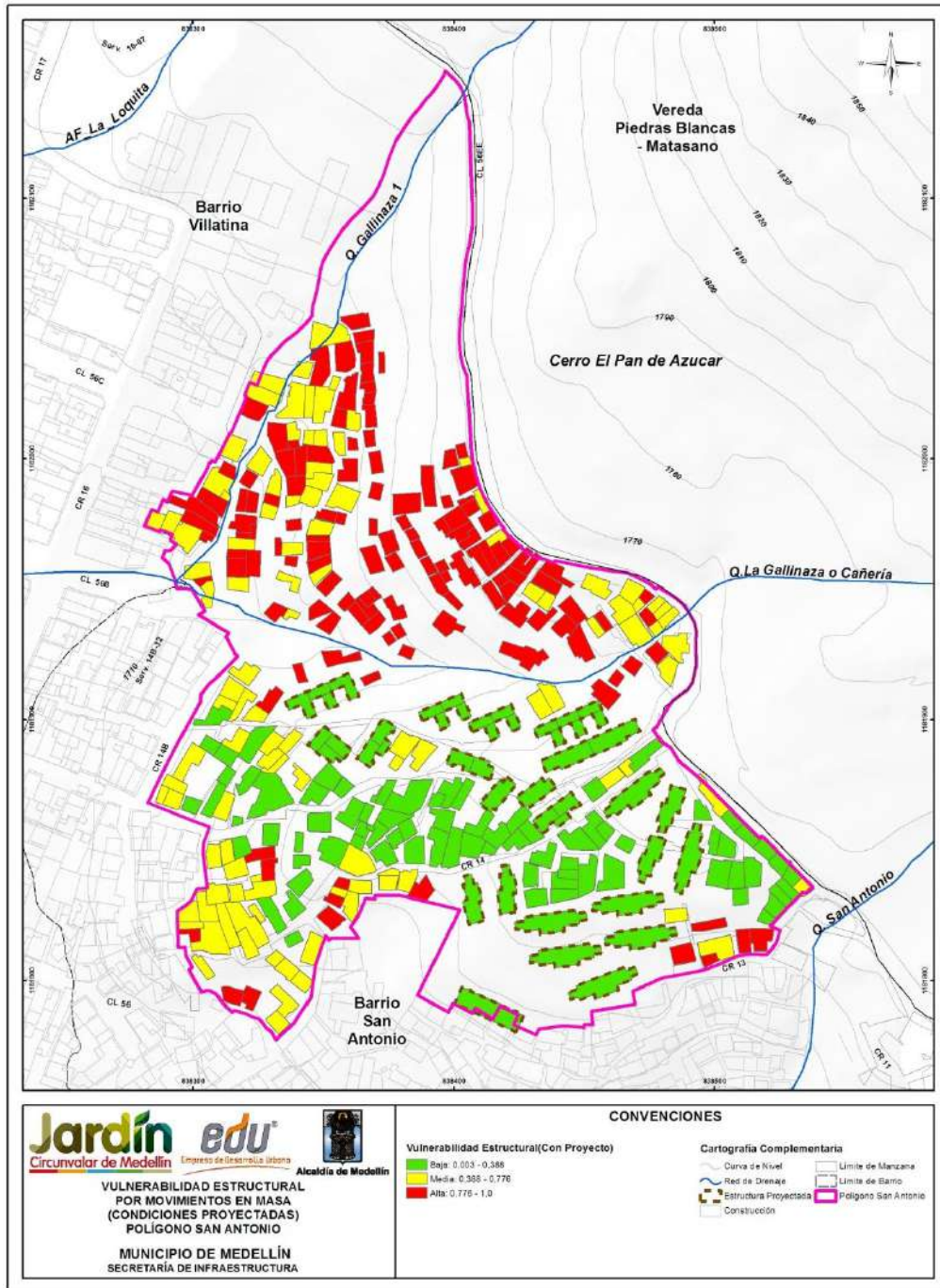
Además del análisis de la vulnerabilidad con las condiciones actuales del proyecto, se hizo una evaluación de la vulnerabilidad estructural y de las personas considerando el futuro Proyecto Barrios Sostenibles.

Para esta modelación se consideró que las nuevas estructuras de dicho proyecto tendrán unas características mejores que las estructuras existentes, al considerar que se tratan 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 de Barrios Sostenibles presentan las siguientes características (Tabla 67).

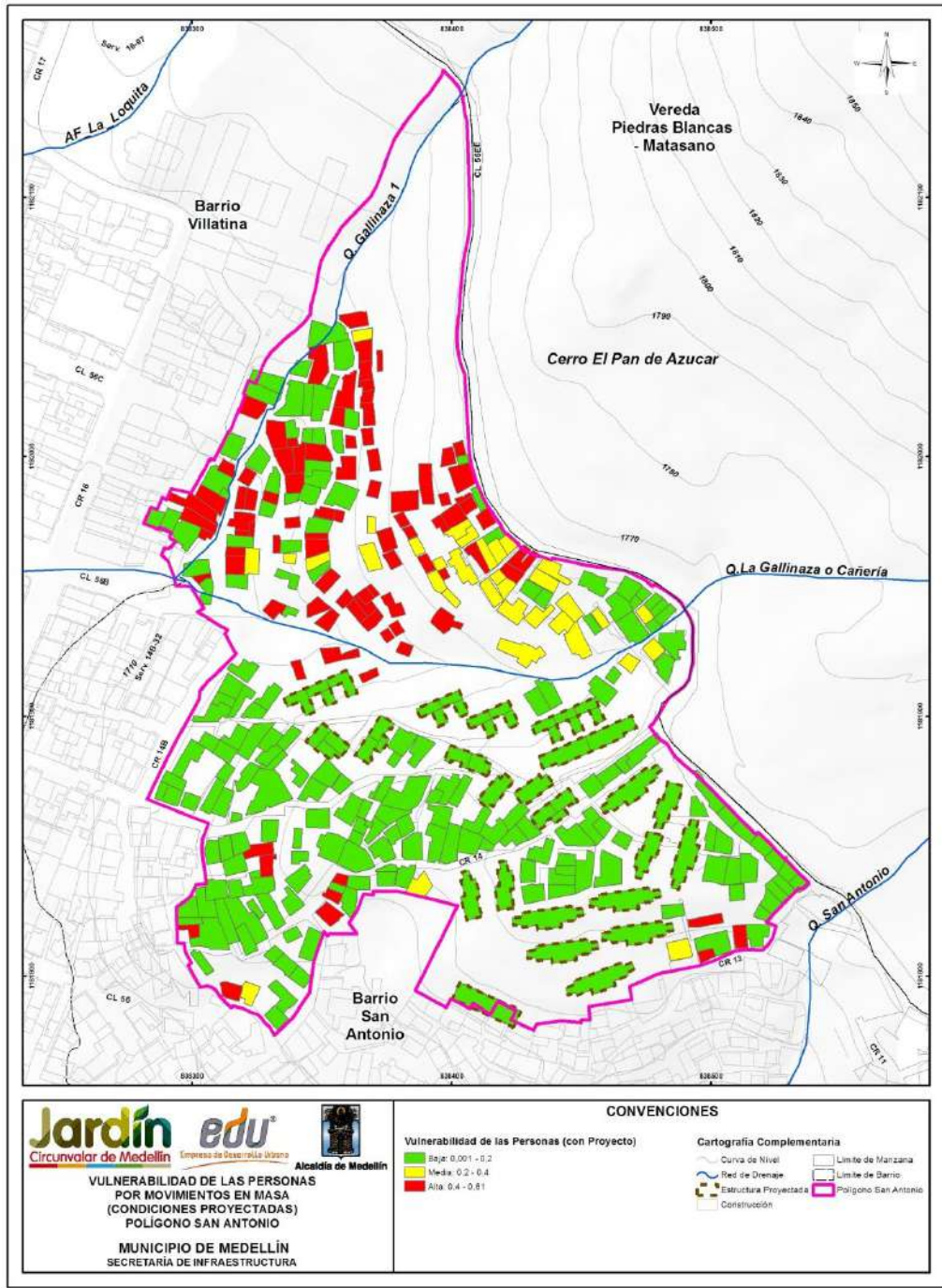
Tabla 67. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del San Antonio

Factores de vulnerabilidad estructural	Calificación
Estado de la estructura (ξ_{man})	1.5
Altura de la estructura (ξ_{alt})	0.9
Nivel de fundación de la estructura (ξ_{sfd})	1.05
Tipo de estructura (ξ_{est})	1.5

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, finalmente el valor de resistencia usado fue de 1.0 para todas las estructuras. El Mapa 51 y el Mapa 52 presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad del Mapa 47. Se observa que las nuevas estructuras se construirán en la parte baja del polígono donde se tienen mayores áreas con pendientes entre 5° y 30° según el Mapa 11, y estructuras con vulnerabilidad de media a alta.



Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono San Antonio por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (SATVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)



Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono San Antonio por Movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (SATVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)

16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES

Para el caso de inundaciones, la vulnerabilidad física se estima 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, por sus siglas en inglés). 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 cuatro o más niveles, su Factor de Vulnerabilidad por Tamaño de Edificación (FVT) será de 1, para uno de tres niveles será de 2, para uno de dos niveles será de 3 y, finalmente, para uno de un 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 considera 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 68.

Tabla 68. 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 Edificación (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 69.

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 69. 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

La Figura 148 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por inundaciones.

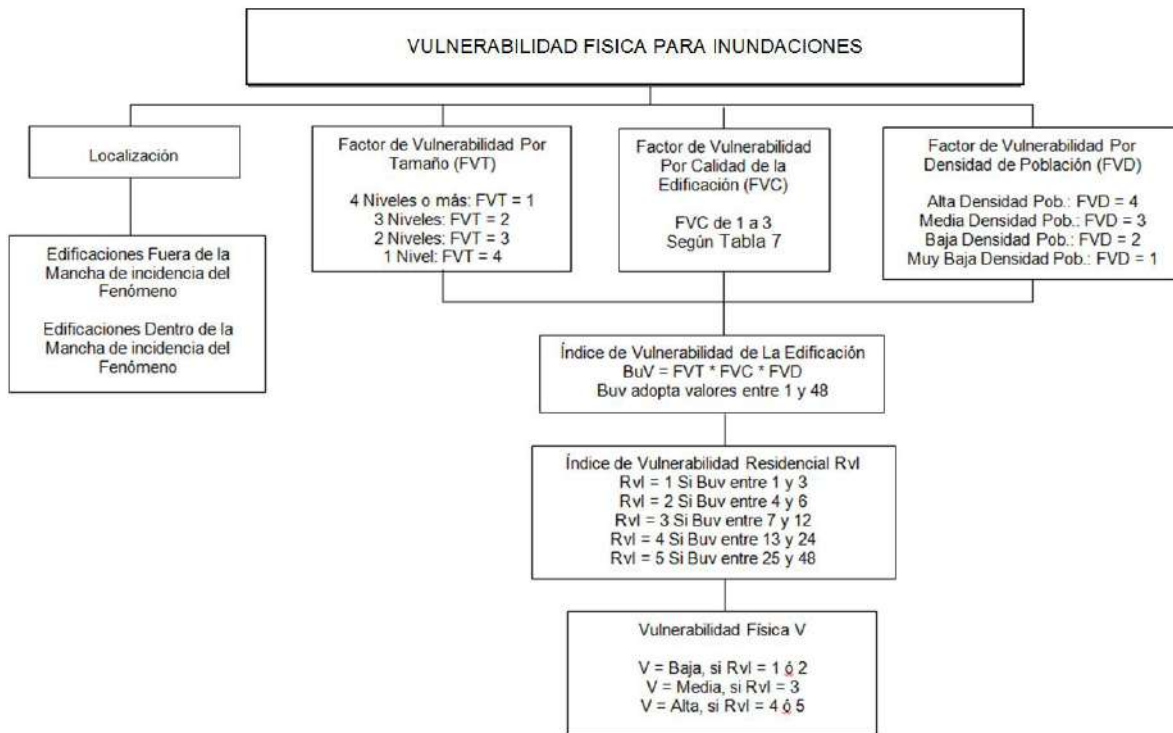


Figura 148. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones

Para el caso de inundaciones 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 (2014) para la EDU.

Del Mapa 53 al Mapa 57 se presentan los factores que conforman la metodología de vulnerabilidad física para inundaciones, los cuales corresponden a Tipo de Estructura, Estado de la Estructura, Altura de la Construcción, Densidad de Población y Grado de Vulnerabilidad a Inundación, respectivamente.

Del análisis e interpretación de la información existente en la base de datos, se pueden hacer entonces las siguientes anotaciones:

- ✓ En el Polígono San Antonio la gran mayoría de las estructuras poseen un tipo de estructura en Mampostería con un 84.94% y el 15.06% restante corresponde a las construcciones Ligeras (Tabla 70).
- ✓ El Polígono San Antonio 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 84.42%. El

estado que le sigue es el malo con un 12.73%. en menor porcentaje se encuentran las estructuras buenas con el 2.86% (Tabla 71).

- ✓ En el Polígono San Antonio un poco más de la mitad de las viviendas inspeccionadas poseen un solo piso con un 58.18% del total. Le siguen las construcciones de dos pisos con un 36.36%. En menor porcentaje se encuentran las edificaciones de tres pisos y las edificaciones de cuatro pisos y más con un 4.94% y 0.52% respectivamente (Tabla 72).
- ✓ En casi la mitad de las estructuras presentes en el Polígono San Antonio se tiene una densidad media con un 41.30%. Le siguen las construcciones con densidad Baja con un 40.52%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades Muy bajas y Altas con un 10.91% y 7.27% respectivamente. (Tabla 73).

Tabla 70. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Tipo Estructura	Total Viviendas	%
Ligera (Madera)	58	15.06
Mampostería	327	84.94
Total	385	100

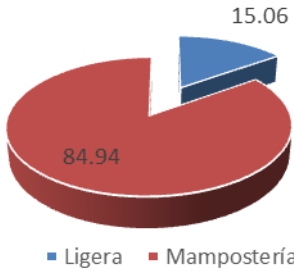


Tabla 71. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Mala	49	12.73
Media	325	84.42
Buena	11	2.86
Total	385	100

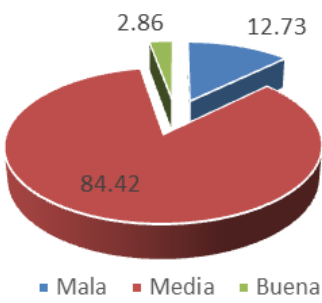
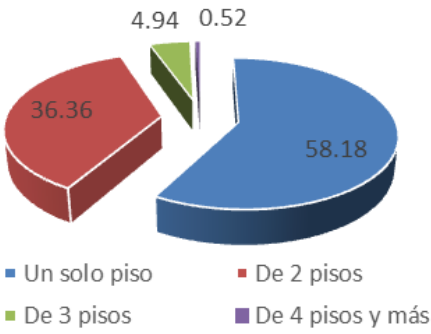


Tabla 72. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

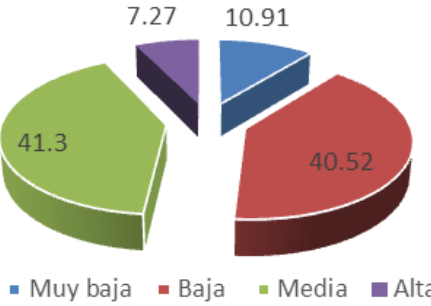
Altura de la estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	224	58.18
De 2 pisos	140	36.36
De 3 pisos	19	4.94
De 4 pisos y más	2	0.52
Total	385	100



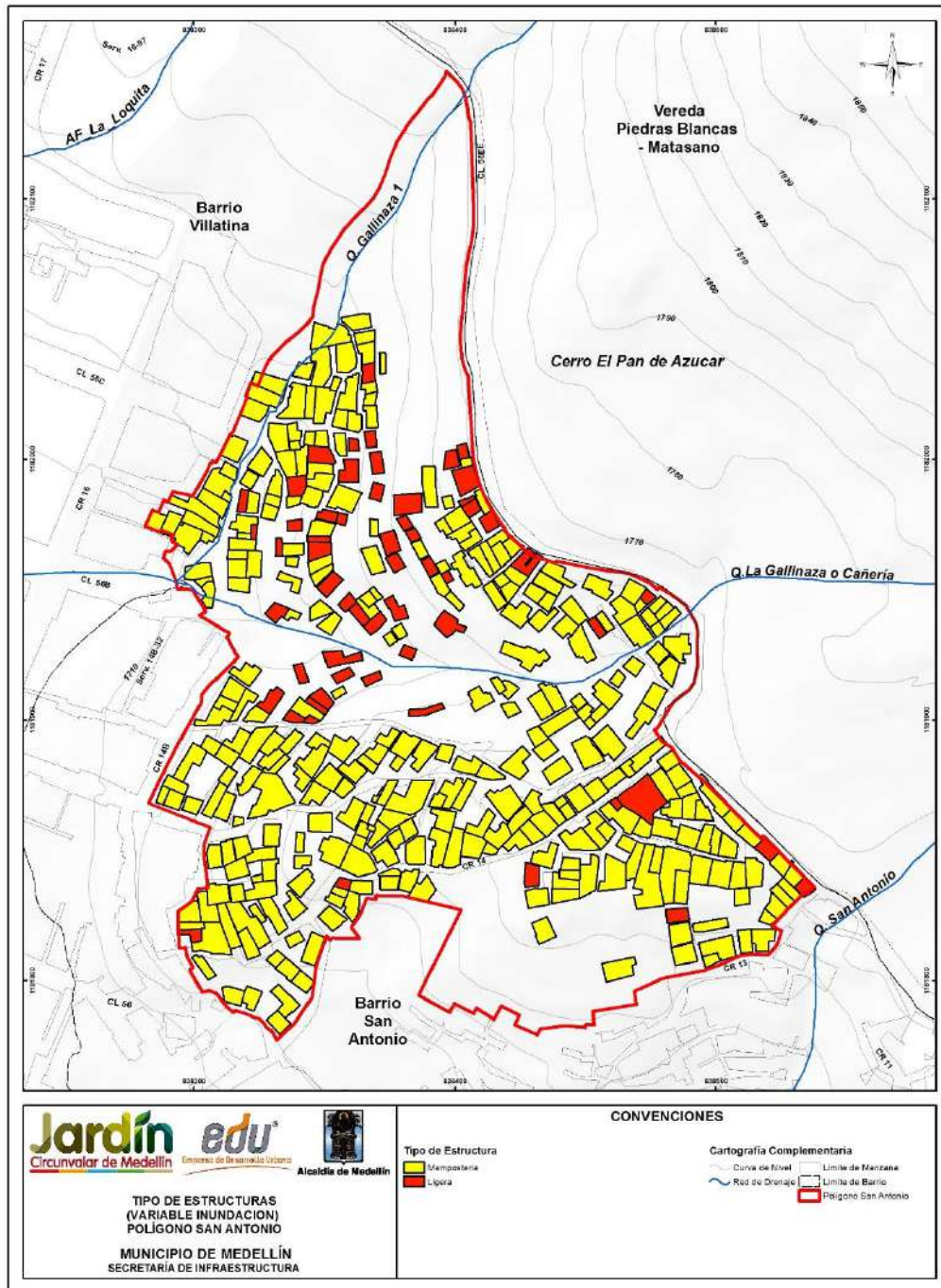
■ Un solo piso ■ De 2 pisos
■ De 3 pisos ■ De 4 pisos y más

Tabla 73. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales

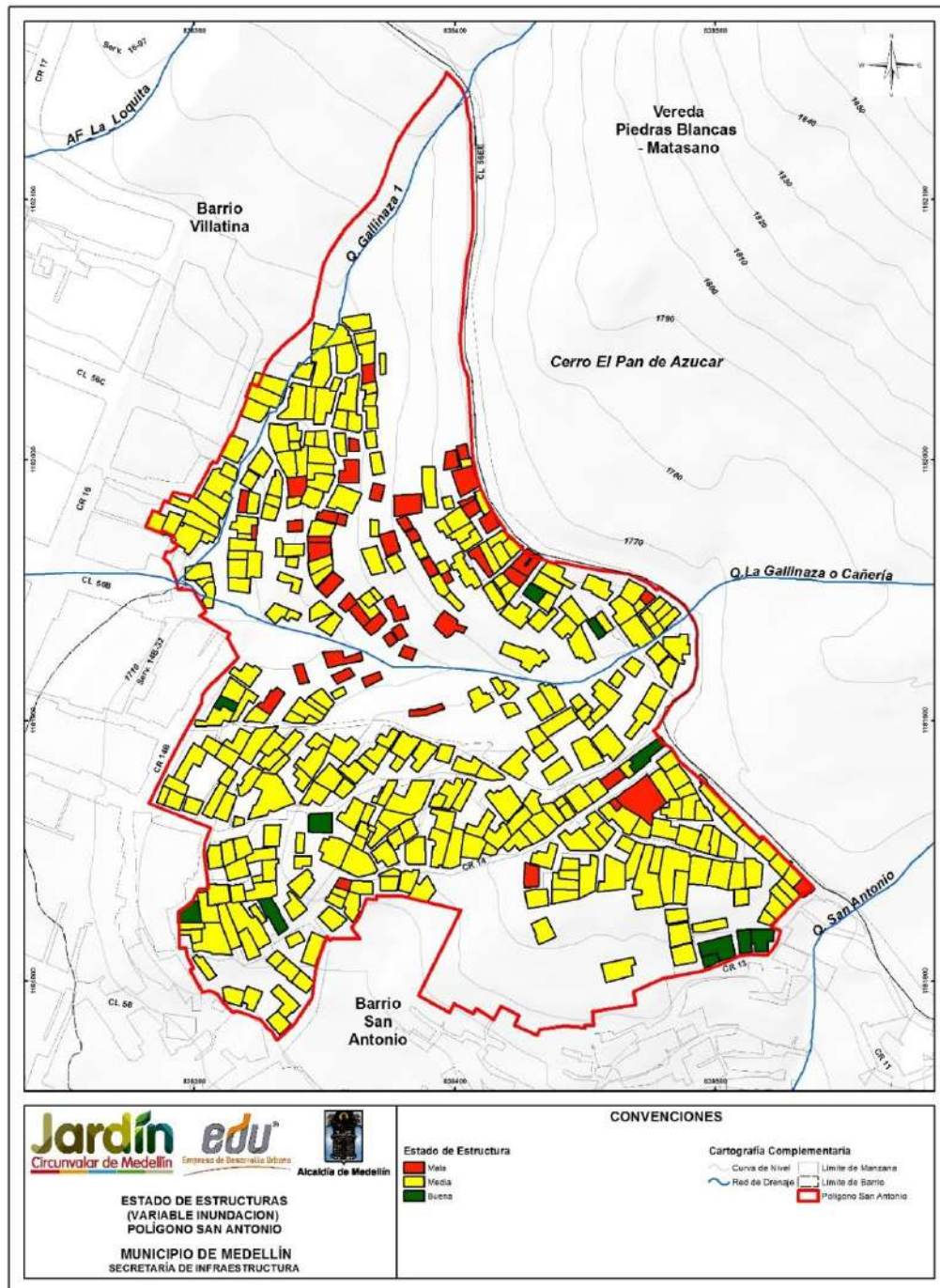
Densidad de población	Total Viviendas	%
Muy baja	42	10.91
Baja	156	40.52
Media	159	41.30
Alta	28	7.27
Total	385	100



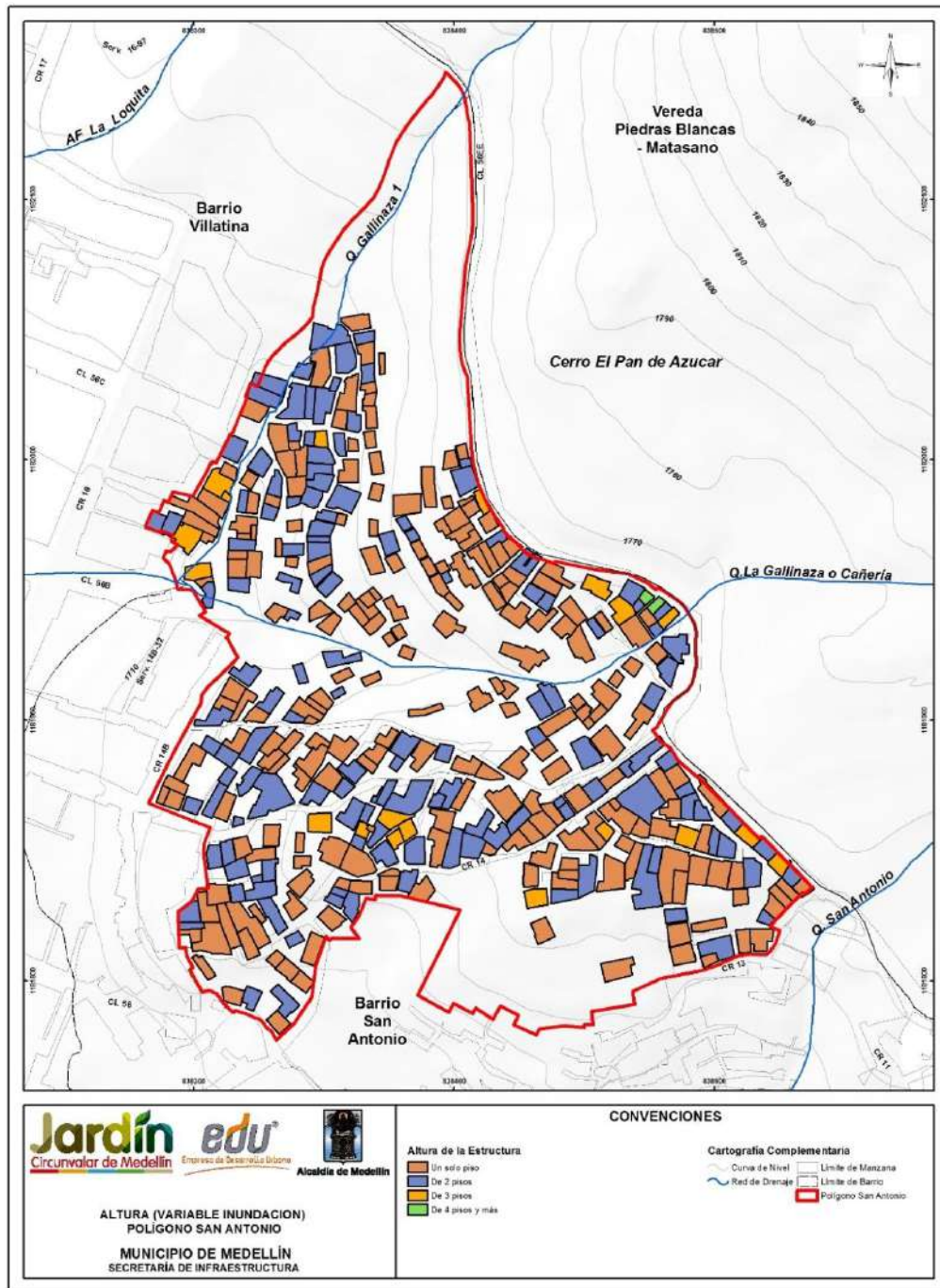
■ Muy baja ■ Baja ■ Media ■ Alta



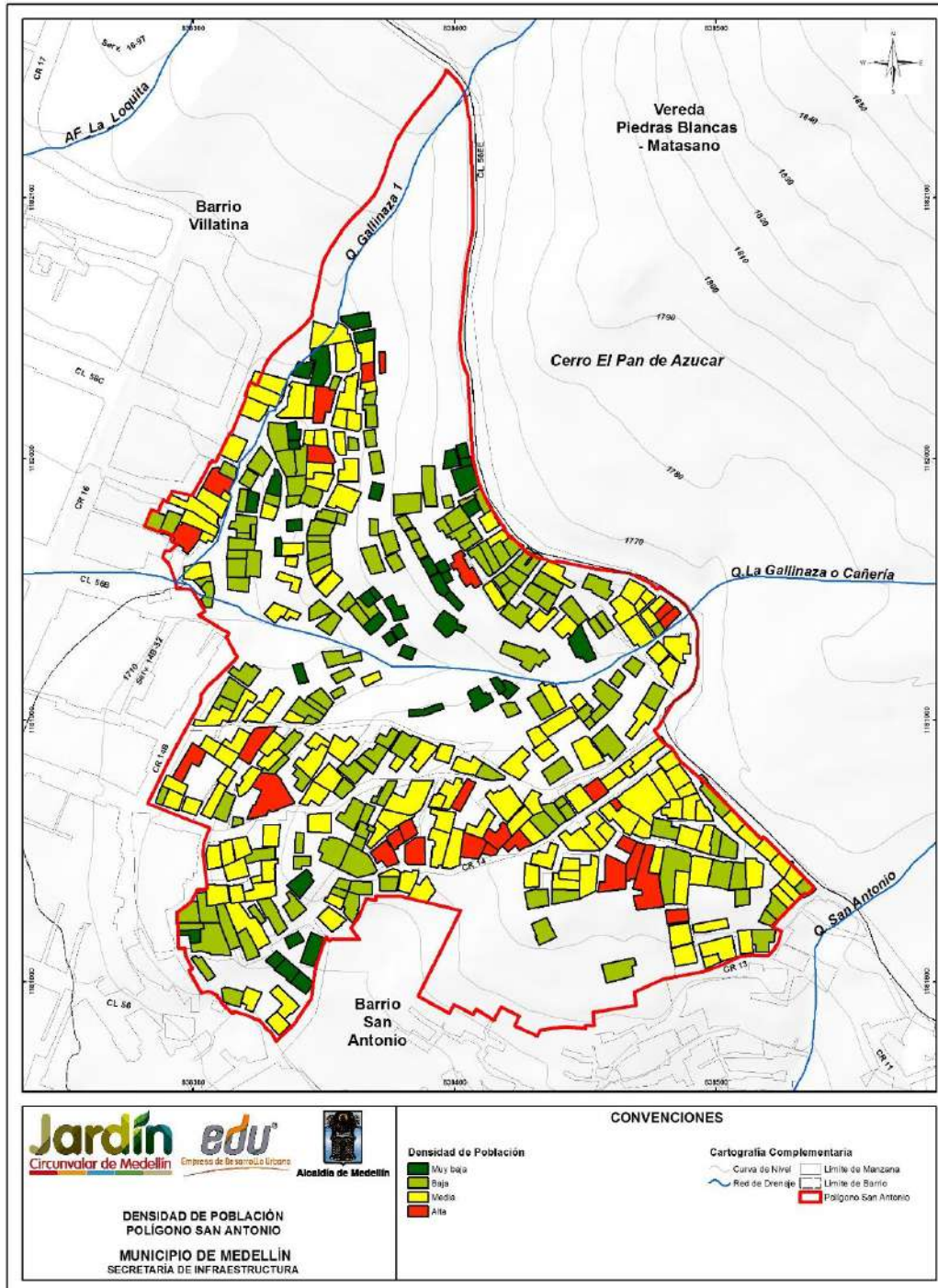
Mapa 53. Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono San Antonio
(31_SATTipodeEstructura_Medellin_C y 31_SATTipodeEstructura_Medellin_T)





Mapa 54. Localización espacial del estado de la estructura por inundación en el Polígono San Antonio
(32_SATEstadodelaEstructura_Medellin_C y 32_SATEstadodelaEstructura_Medellin_T)



Mapa 55. Localización espacial de la altura de las estructura por inundación en el Polígono San Antonio
 (33_SATAIuradelaConstruccion_Medellin_C y 33_SATAIuradelaConstruccion_Medellin_T)



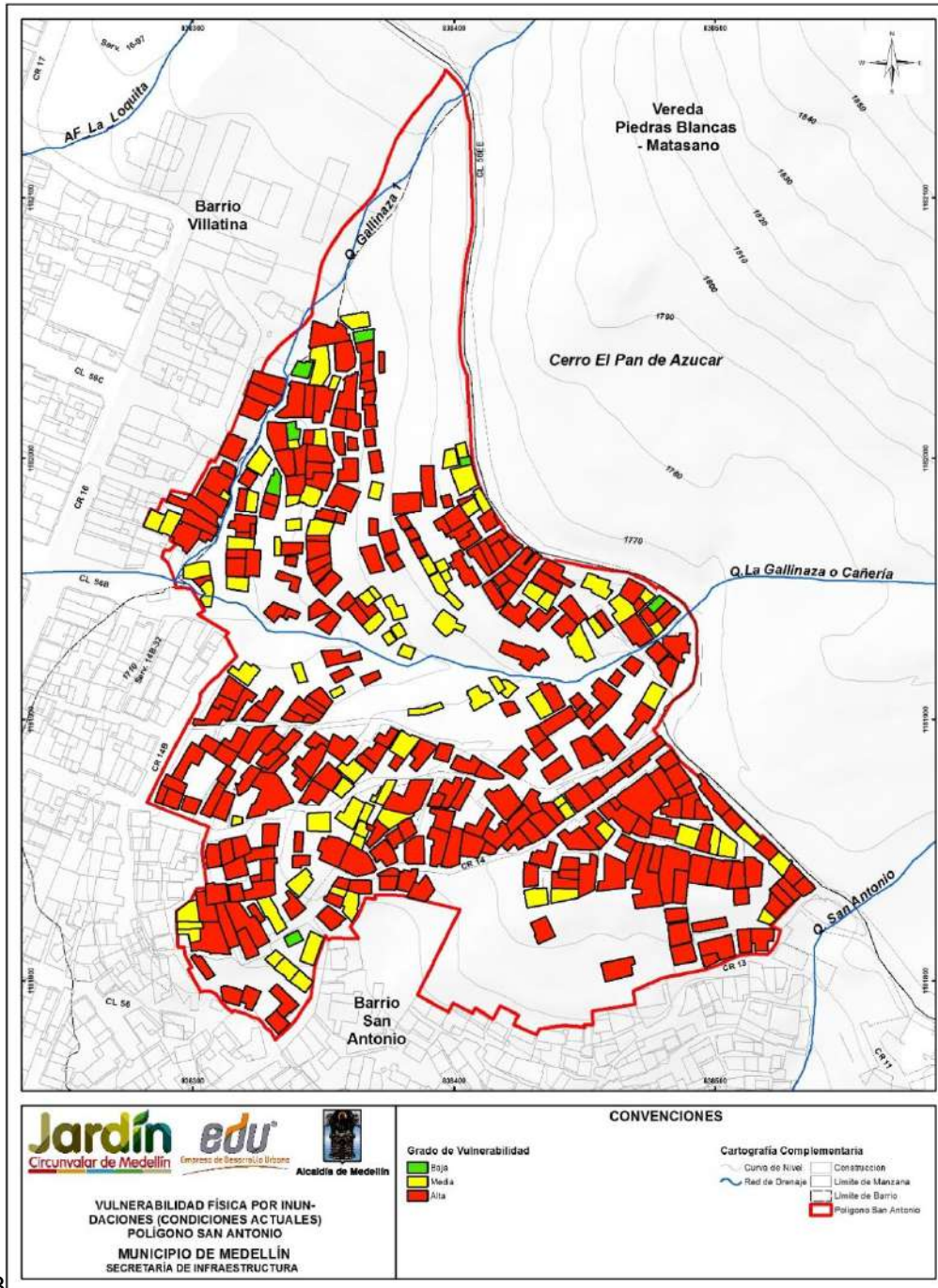
Mapa 56. Localización espacial de la densidad de población en el Polígono San Antonio (34_SATDensidaddePoblacion_Medellin_C y 34_SATDensidaddePoblacion_Medellin_T)

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

Finalmente con la información mencionada en este numeral se realizó el análisis de la vulnerabilidad física por inundaciones para el Polígono San Antonio, el cual se presenta en el Mapa 57 . En este plano se muestra que de las 385 estructuras, 289 de ellas presentan vulnerabilidad física alta ante posibles fenómenos de inundación (75.06%), 89 presentan vulnerabilidad física media (23.12%) y solo 7 de ellas presentan una baja vulnerabilidad física (1.82%). La vulnerabilidad alta se presenta principalmente en estructuras en mal estado y de un solo nivel.

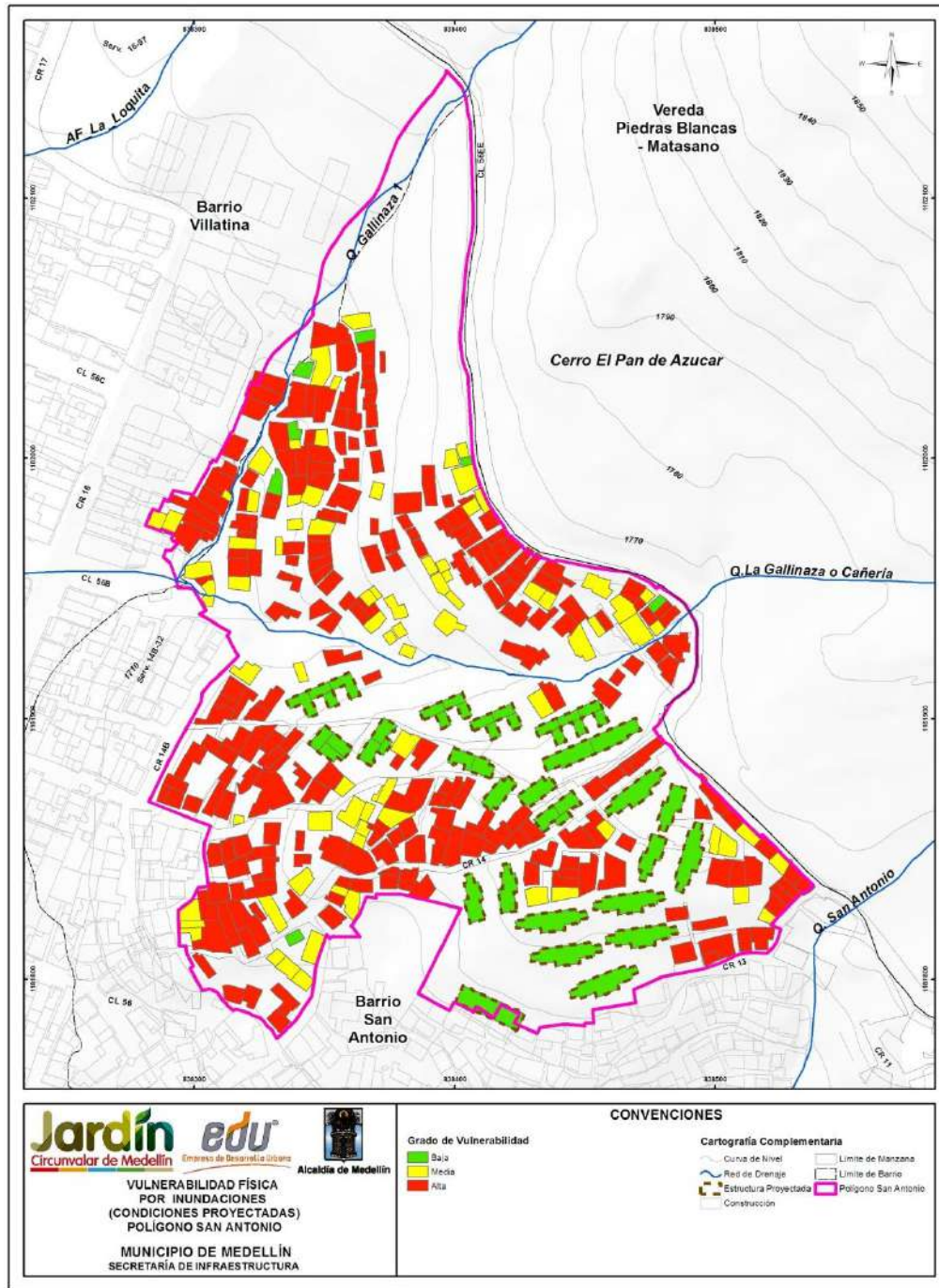
En la Mapa 58 se presenta la vulnerabilidad de las estructuras ante posibles fenómenos inundaciones, considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles. Estas estructuras presentan un grado de vulnerabilidad muy bajo ante inundaciones porque son estructuras en buen estado y con más de tres pisos.

De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono San Antonio. 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. Sin embargo, para este polígono no se encontraron edificios especializados (equipamientos). En la Mapa 59 se presenta el mapa resultado del análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio para las Vías de Acceso y Equipamientos.

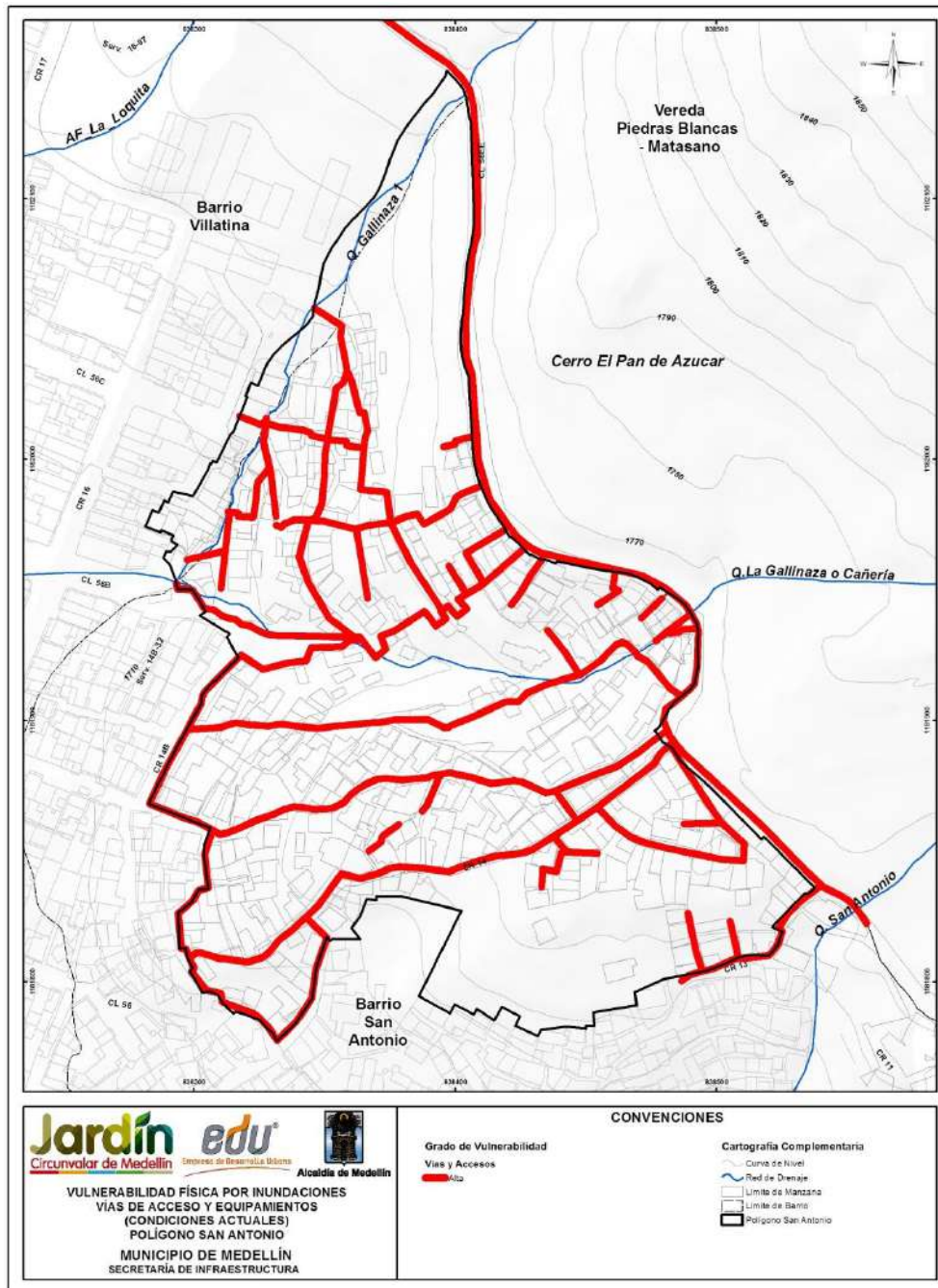


3

Mapa 57. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio
 (38_SATVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_C y
 38_SATVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T)



Mapa 58. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (SATVulnerabilidadFisicaporInundacionesProyecto_Medellin_C)



Mapa 59. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono San Antonio para las Vías de Acceso y Equipamientos
(46_SATVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y 46_SATVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T)

16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS

De la Tabla 74 a la Tabla 77 se presenta el registro fotográfico para las zonas en las que se dividió el polígono San Antonio.

Tabla 74. Registro fotográfico en el San Antonio



Zona 1



Zona 2



Zona 3

Tabla 75. Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación)



Zona 4



Zona 5



Zona 6

Tabla 76. Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación)



Zona 7



Zona 8



Zona 10



Tabla 77. Registro fotográfico en el San Antonio (Continuación)



Zona 12



Zona 13

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

17. RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

17.1 ASPECTOS GENERALES

Se entiende como riesgo aceptable aquel nivel en 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

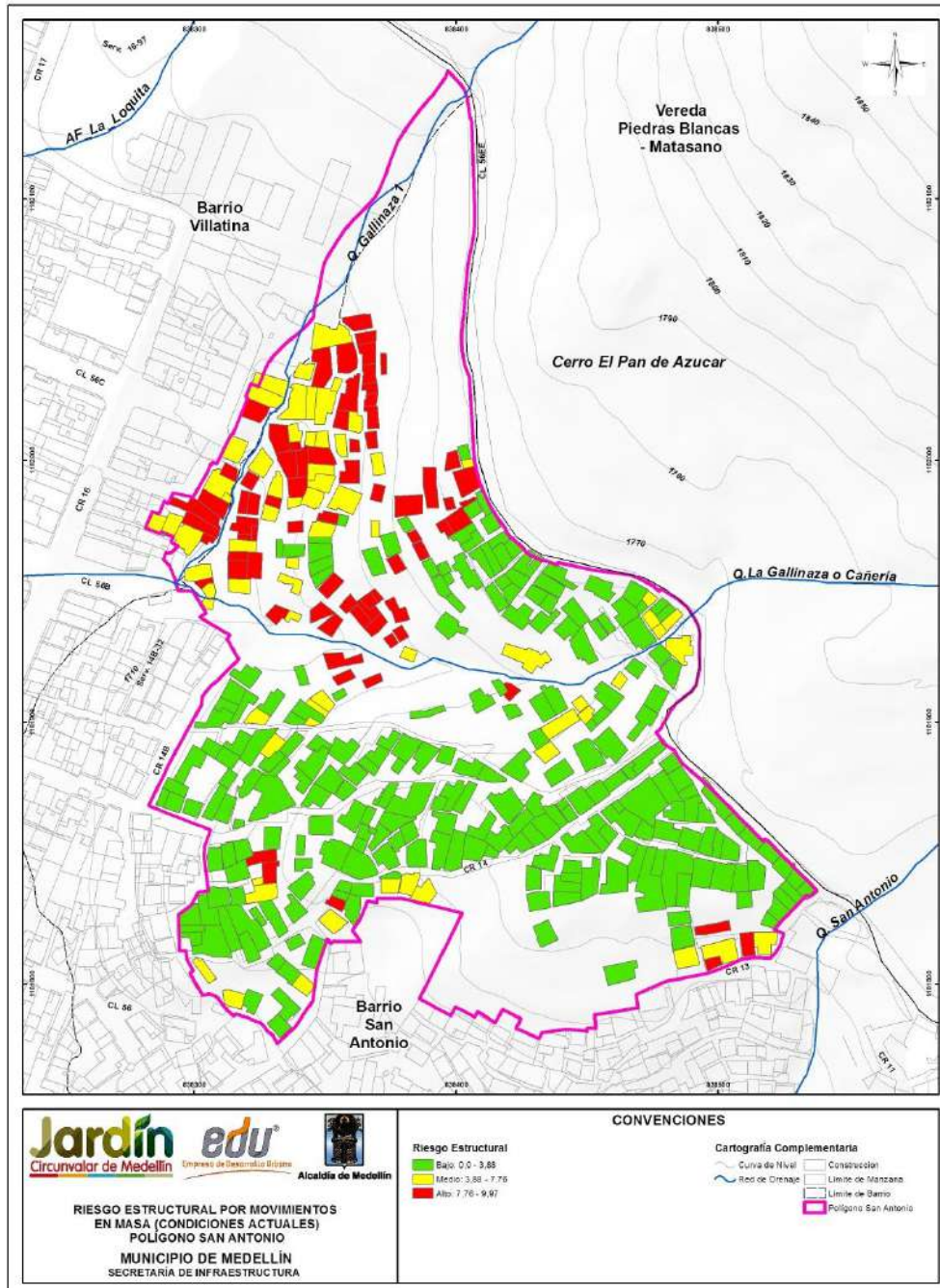
Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (Hi), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. En este caso los escenarios de amenaza son el de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. P (Hi) es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica (Hi) 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 (Hi) 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 perdidas, 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.

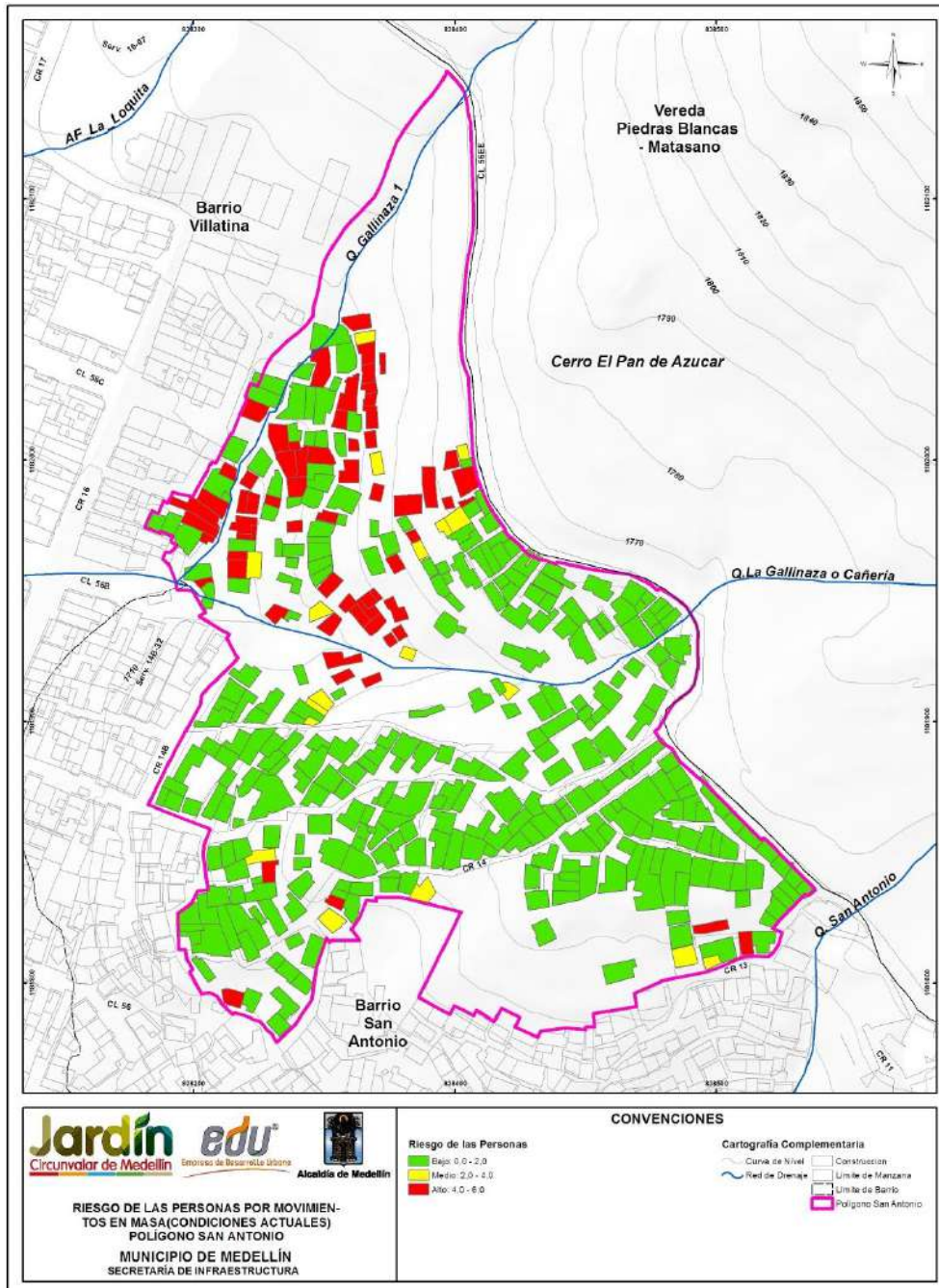
17.3 RESULTADOS

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años (Mapa 37), donde se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros y la actuación del sismo en 50 años, y los mapas de vulnerabilidad estructural y de personas analizados en el Numeral 16.2.4.

En el Mapa 60 y en el Mapa 61 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 62 presenta la categorización del riesgo por movimiento en masa de las vías de acceso 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 el sector norte del polígono con riesgo alto. Cabe resaltar, que el tramo de la vía de acceso principal del Polígono San Antonio presenta alto riesgo frente a eventos de movimientos en masa. El riesgo se debe a la amenaza por movimientos en masa que se presenta en una gran área de la parte alta de la UMI, y la afectación a la estructura vial en este caso, sería por impacto. Es por esto, que una alternativa estructural para mitigar el riesgo en este sector no sería viable, ya que implicaría una afectación directa sobre una amplia extensión de la ladera.

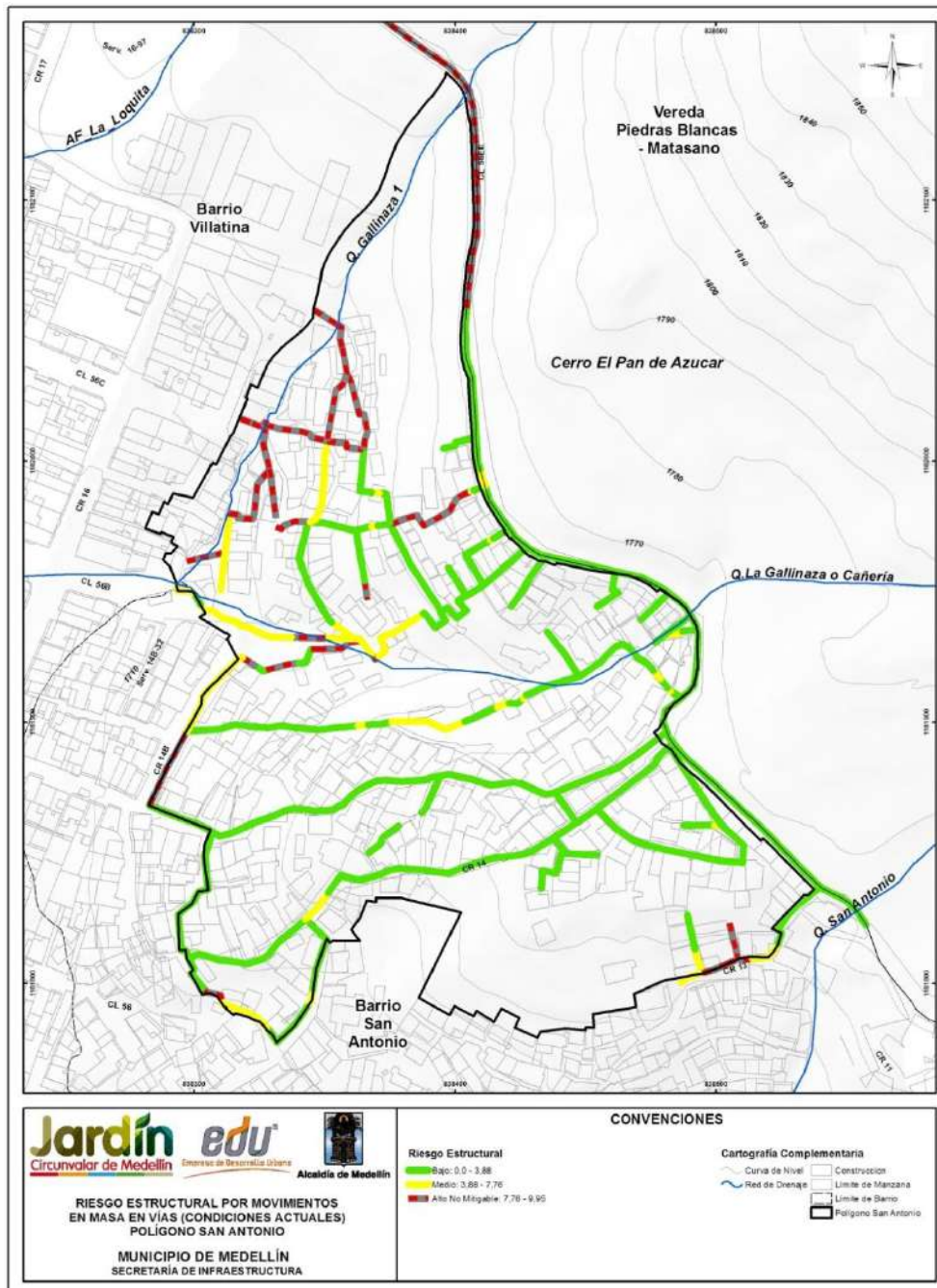


Mapa 60. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono San Antonio (39_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 39_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 61. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono San Antonio

**(40_SATRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y
40_SATRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)**



Mapa 62. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa en el Polígono San Antonio
(47_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C y 47_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se generó un mapa de riesgo total para las viviendas que consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Este mapa de riesgo total se hizo basado 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 78. 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

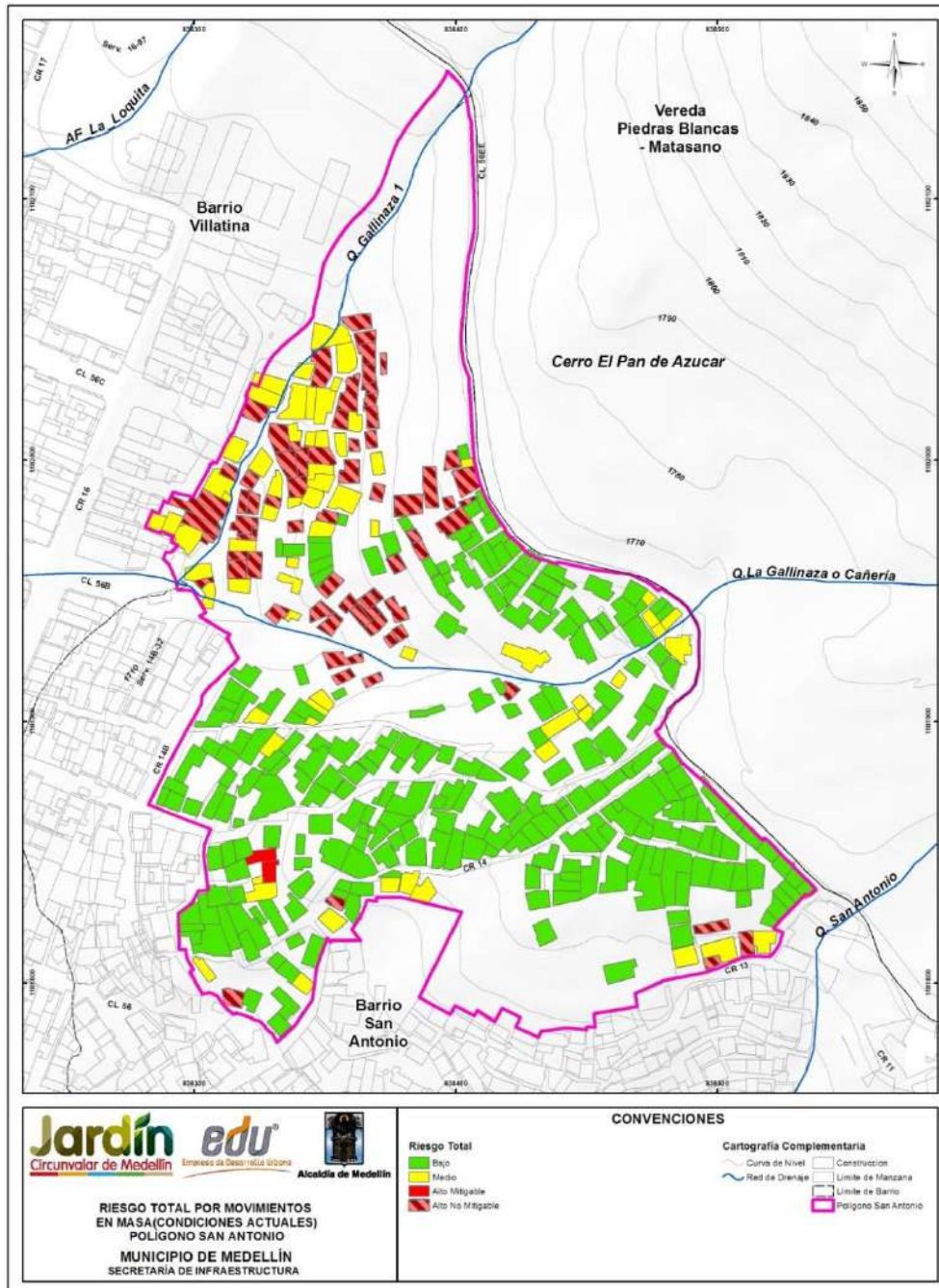
Finalmente fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto donde la descripción de cada categoría se indica en la Tabla 79.

Tabla 79. 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 63 se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 385 estructuras, 243 presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (63%), 67 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (17%) y 75 presentan riesgo alto ante movimientos en masa (20%), de las cuales sólo una estructura fue clasificada en riesgo alto mitigable, las 73 estructuras restantes fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable.



Mapa 63. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono San Antonio (41_SATRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_C y 41_SATRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T)

En la Tabla 80 se presenta la descripción de cada una de las viviendas que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa.

Tabla 80. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono San Antonio

Estructura	COBAMA	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
72	814005	Cr 14B N.56-03	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
87	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.115	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
89	814008	Cr 14B N.56AA 54 Int.129	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
93	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
117	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
118	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.045	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
120	814008	CI 56D N.15A-38 Int.184_SIN DIRECCIÓN	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
121	814008	Cr 15A N.56C-38 Int.103_Int. 105	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
126	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.145	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
127	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.150	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
133	814008	CI 56D N.14-81 Int.102	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
134	814008	CI 56D N.15A-38 Int.178_Int.277_Int.278	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
137	814008	CI 56D N.15A-38 Int.155	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
139	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.140	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
140	814008	CI 56A N.15B-16 Int.101	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
141	814008	Cr 15A N.56B-08	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
186	814004	Cr 13 N.55-271	Residencial	Mampostería	<2 m	Buena	Un piso	Alto No Mitigable
215	814004	Cr 13 N.55-265 Int.105_Int.106	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
224	814004	Cr 14 N.55-201	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
232	814008	Cr 14 N.56AA-54 Int.130	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
239	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
241	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable

Tabla 80. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono San Antonio

Estructura	COBAMA	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
242	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.110	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
245	814008	CI 56D N.15A-38 Int.182_CI 56D N.15A-38 Int.180	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
247	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.056	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
249	814008	Cr 15A N.56C-06	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
253	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.0041	Residencial	Mampostería	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
254	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.0040	Residencial	Mampostería	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
265	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.135	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
271	814008	CI 56D N.15A-38 Int.175	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
272	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.071	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
273	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.165	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
277	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
281	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.125	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
282	814008	CI 56D N.15A-38 Int.170	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
283	814008	CI 56D N.15A-38 Int.175_Int.173	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
284	814008	Cr 15A N.56B-02	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
286	814008	CI 56 N.15A-18	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
289	814008	Cr 14B N.56AA 54 Int.170	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
290	814008	Cr 15A N.56B-06	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
300	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.052	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
301	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.150	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
302	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.156_Cr 15A N.56C-02 Int.123	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Dos pisos	Alto No Mitigable
303	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.118	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
308	814008	CI 56AA N.14-74 Int.165	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable



 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 POLÍGONO SAN ANTONIO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 80. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono San Antonio

Estructura	COBAMA	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
310	814008	CI 56D N.15A-38 Int.136	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
311	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.0093	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
314	814008	CI 56D N.15A-38 Int.179	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
321	814008	Cr 15A N.56B-16 Int.104	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
322	814008	Cr 15A N.56C-33 Int.155	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
328	813050	Cr 16 N.56B-38 Int.103	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
329	813050	Cr 16 N.56B-38 Int.106	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
330	813050	Cr 16 N.56B-28 Int.104	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
332	813050	Cr 16 N.56B-38 Int.104	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
333	813050	Cr 16 N.56B 38 Int.108	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
336	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.044	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
337	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.044	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
338	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.047	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
339	814008	Cr 14B N.56AA 54 Int.174_Cr 14B N.56AA 54 Int.175	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
342	814008	CI 56AA N.14-38_CI 56AA N.14-39	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
352	814008	CI 56D N.14-87	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
354	814008	CI 56D N.14-97	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
355	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.169	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
363	814004	Cr 13 N.55-263	Residencial	Mampostería	<2 m	Buena	Un piso	Alto No Mitigable
366	814008	CI 56D N.14-81 Int.104	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso	Alto No Mitigable
367	814008	Cr 15A N.56C-02 Int.130	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
368	814008	Cr 15A N.56B-14	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
372	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.045	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable

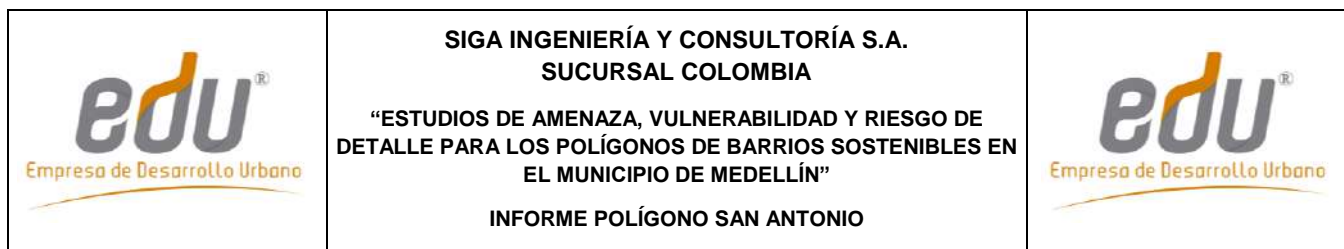


Tabla 80. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono San Antonio

Estructura	COBAMA	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura	Clasificación Riesgo Total
373	814008	SIN DIRECCIÓN	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
377	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.171	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso	Alto No Mitigable
379	814008	Cr 15A N.56B-17	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Dos pisos	Alto No Mitigable
380	814008	Cr 14B N.56AA-54 Int.146	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso	Alto No Mitigable
384	814008	CII 56D N.14-38 Int.163	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 San Antonio 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 149.

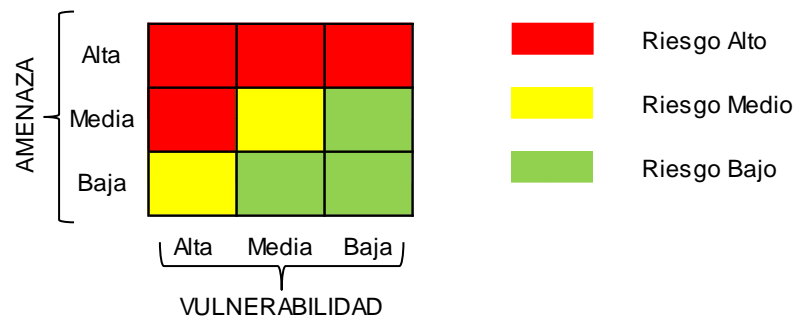




Figura 149. Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad

18.2 RESULTADOS

Luego de aplicar la metodología para la calificación del nivel del riesgo ante fenómenos de inundación, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Mapa 64. Se clasifica cada zona del polígono en categorías de riesgo alto, medio y bajo para las condiciones actuales. Aquellas zonas no clasificadas corresponden a las que no están bajo riesgo alguno por inundaciones, específicamente porque en ellas no se presenta amenaza.

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 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

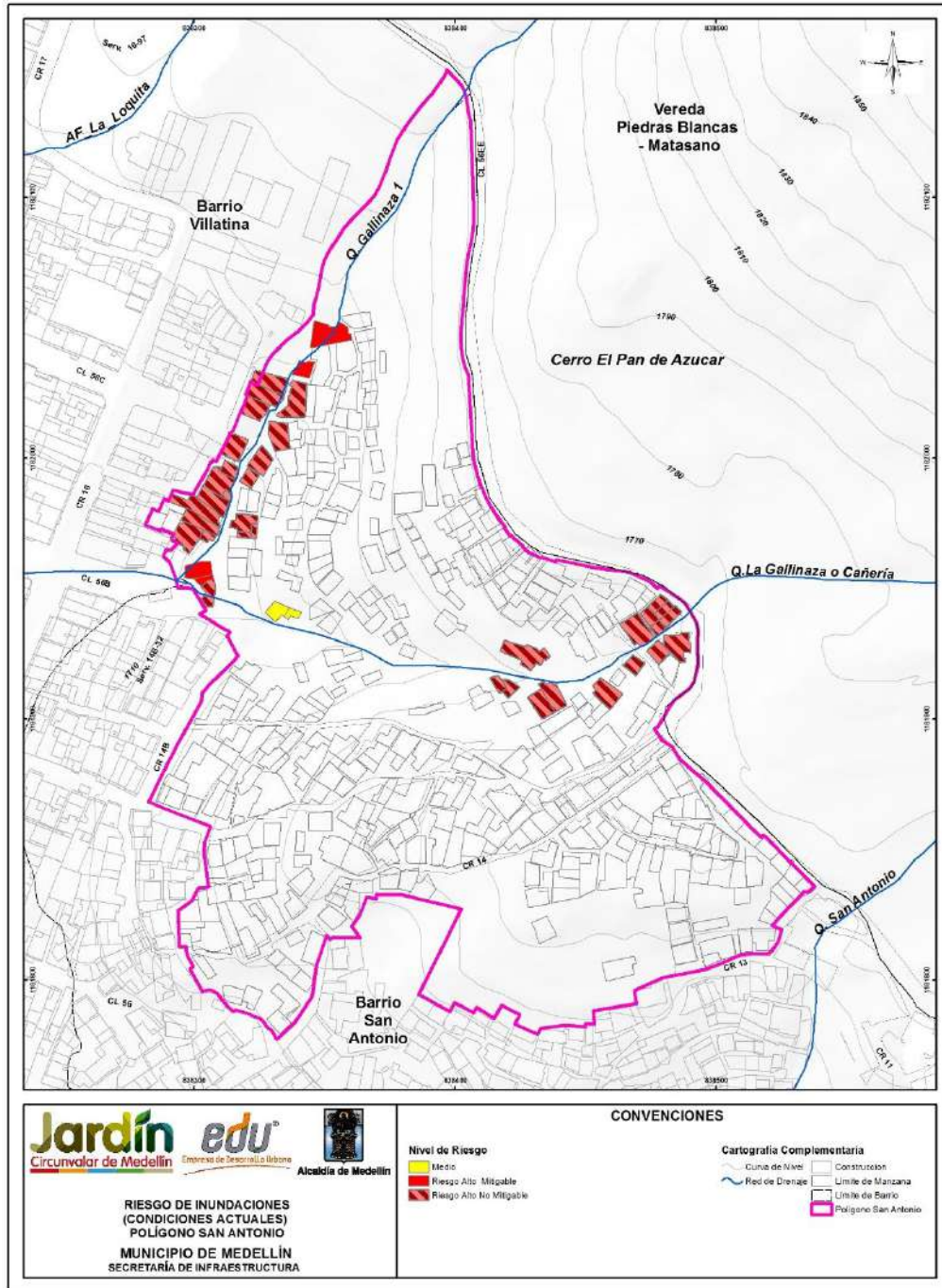
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

eliminarse mediante algunas adecuaciones o ampliaciones de la capacidad hidráulica de estas obras.

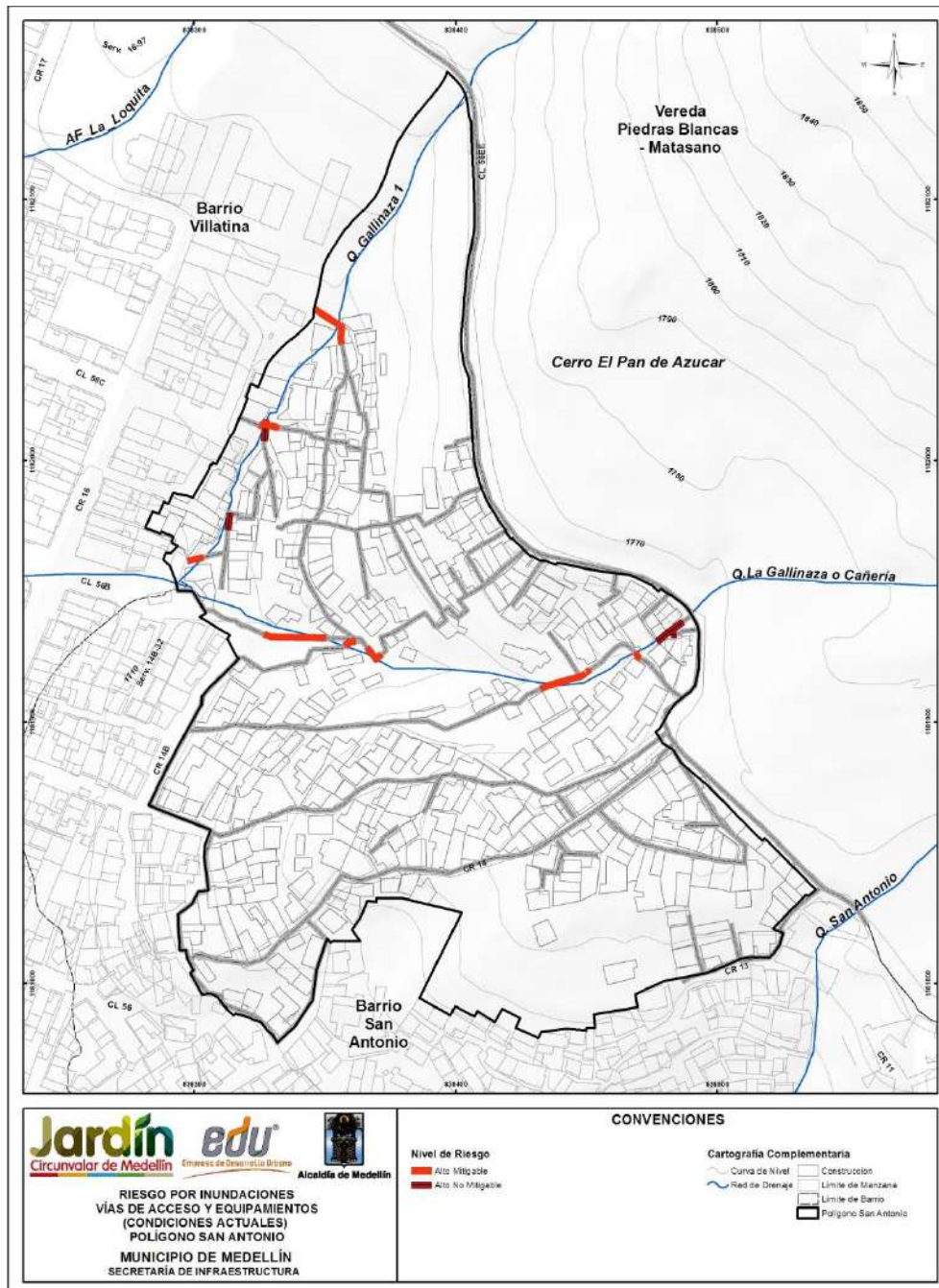
En particular para el polígono de estudio, los resultados de la evaluación del riesgo indican que diversas viviendas aledañas a los cauces de las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1 presentan Riesgo Alto No Mitigable por Inundaciones por estar ubicadas en zona de amenaza alta ante este tipo de fenómenos.

De igual manera, en el Mapa 65 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, en las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1, intersecta estos corredores se generan condiciones de amenaza alta y de riesgo alto (según su 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 bajo alto riesgo por inundaciones al interior del Polígono San Antonio corresponden todas a corredores peatonales y no a vías vehiculares.



De acuerdo con lo expuesto en el Numeral 15.4, en el polígono de estudio no se presenta riesgo por avenidas torrenciales.



Mapa 64. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono San Antonio para viviendas y construcciones (43_SATRiesgolnundaciones_Medellin_C y 43_SATRiesgolnundaciones_Medellin_T)



Mapa 65. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono San Antonio para las vías de acceso y equipamientos
(48_SATRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y 48_SATRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 San Antonio. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según información entregada por la EDU al Proyecto, 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 San Antonio se presenta cobertura parcial de redes de acueducto y de alcantarillado de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse en el Mapa 66 o en el Mapa 67. En relación con la red de alcantarillado, las líneas existentes se encuentran ubicadas en su totalidad en la parte sur del polígono, alineadas principalmente en sentido oriente-occidente sobre la Calle 56A, la Calle 56AA y la Carrera. 14. 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 menores que 300 mm. En relación con la red de acueducto, ésta presenta mayor cobertura hacia el costado sur del polígono. La totalidad de las líneas de acueducto son de material policloruro de vinilo (PVC), con diámetros que oscilan entre 75 mm y 150 mm, prevaleciendo las de diámetro de 75 mm. Fuera del polígono se destaca la línea de acueducto existente cerca del límite en el costado oriental, la cual corresponde a tubería en hierro dúctil de 200mm de diámetro. 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 el mapa de las redes de EPM. Este ejercicio permitió concluir que todas las redes que presenta la información de topografía de La EDU 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 de agua hacia la parte alta del polígono, las cuales quedan por fuera del alcance general del presente estudio.

19.2 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA

En el Mapa 37 se presenta la 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 66 se presenta este mismo 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 movimiento en masa, mostrada en el Mapa 66, permite ver diferenciadas las redes de acueducto, alcantarillado y gas sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa proyectado para 50 años

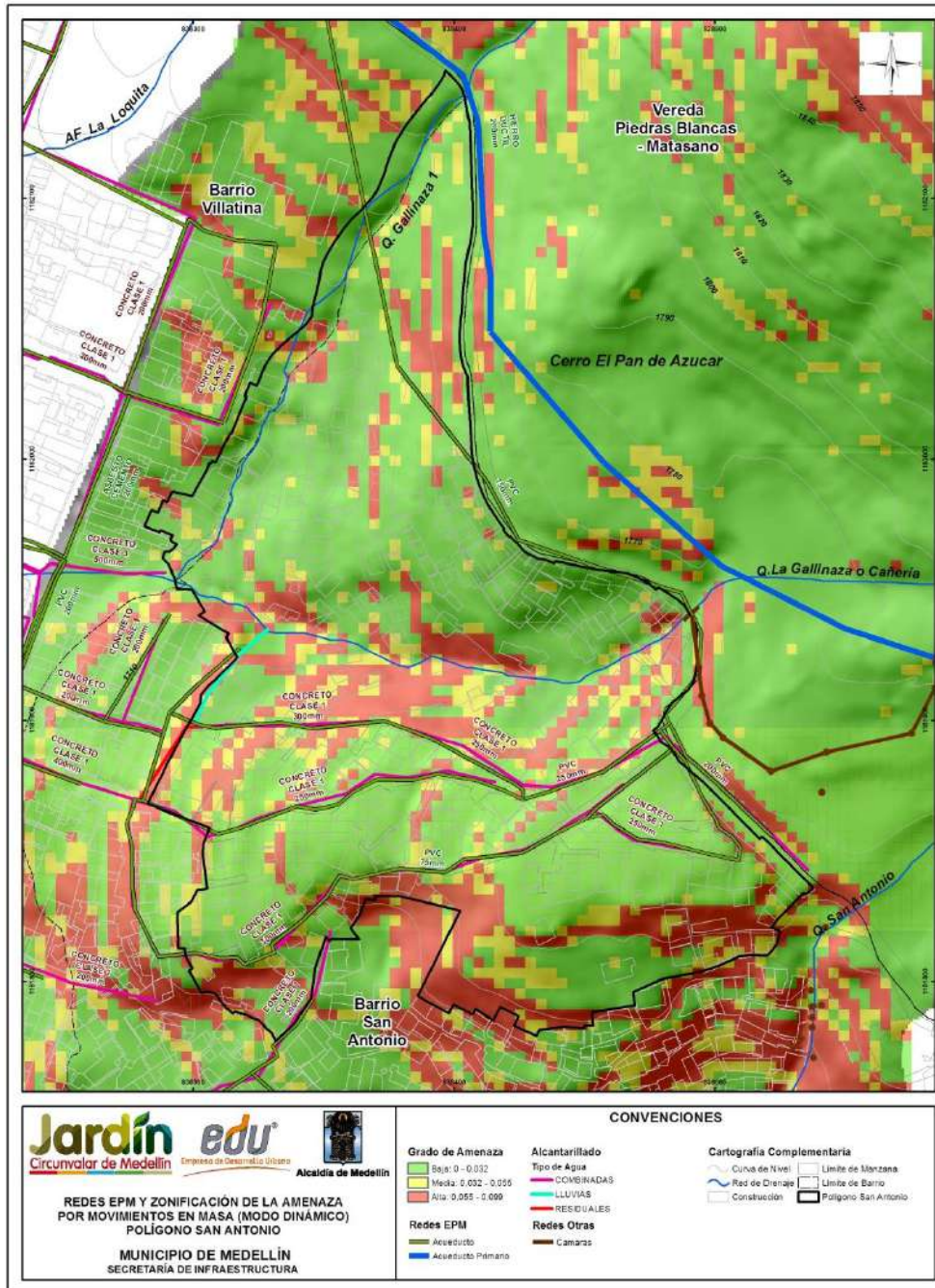
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

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 solamente los tramos de redes que cruzan por la Calle 56AA. Se tiene otra zona al Oeste de la Carrera 14B, este último realmente por fuera del Polígono San Antonio. Se trata de redes de acueducto construidas con tuberías de policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 75 mm y redes de alcantarillado construidas con tuberías en concreto de 200 mm a 400 mm y algunos tramos de policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 250 mm.

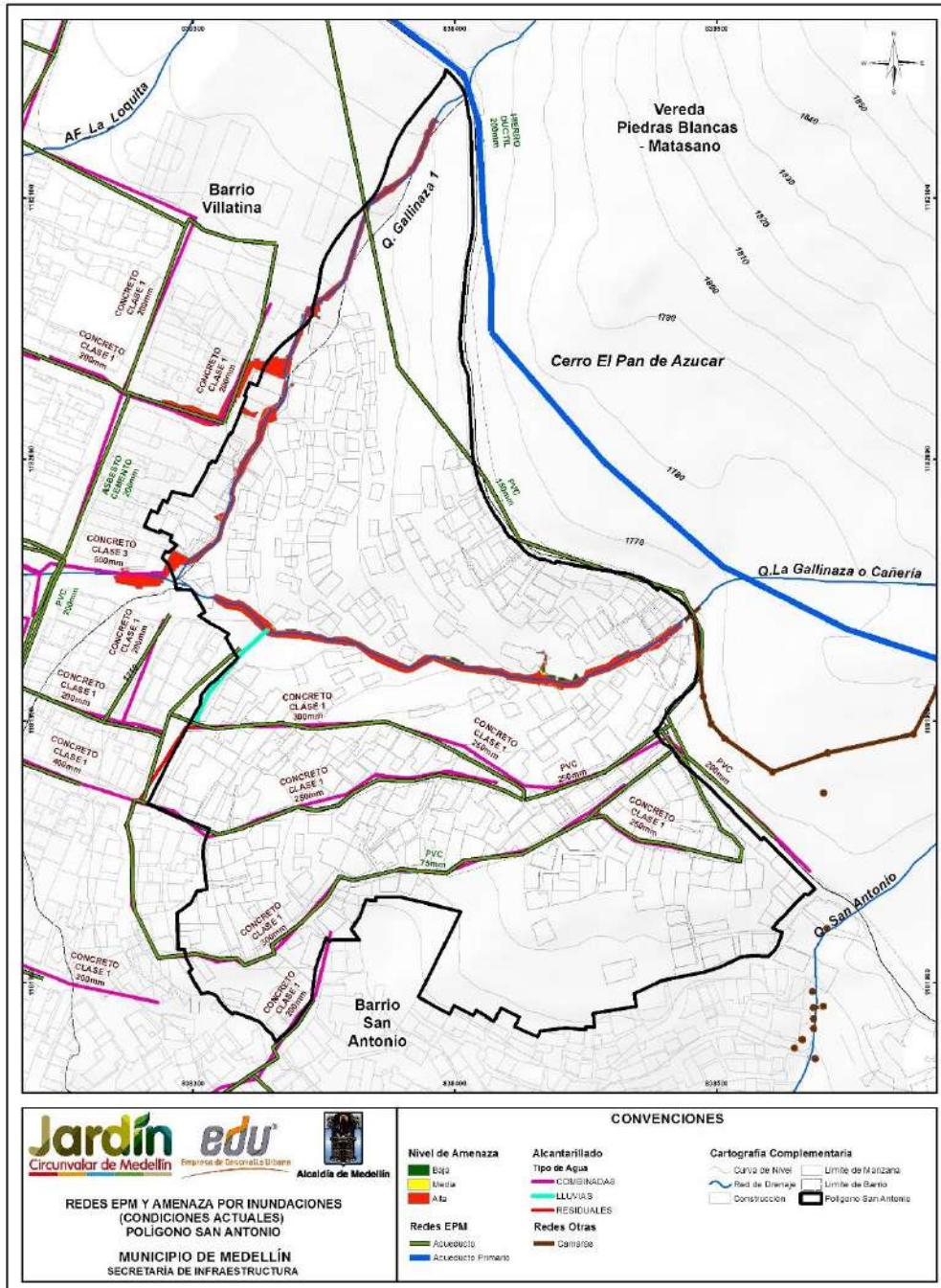
En el Mapa 67 se presenta la amenaza por inundaciones para el Polígono San Antonio (Mapa 38), con las redes de servicios públicos superpuestas, diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.

En el Capítulo 15.3 se demostró que el Polígono San Antonio no presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales. Por esto, los análisis de las redes de servicios públicos no se han llevado a cabo considerando este tipo de amenaza.



La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por inundaciones, mostrada en el Mapa 67, permite determinar que más del 99% de las redes de servicios públicos existentes al interior del Polígono San Antonio se encuentran por fuera de las zonas de amenaza por inundaciones. En relación con la red de alcantarillado, se presenta intersección de la mancha de amenaza con la descarga del aliviadero de la red hacia la Quebrada La Gallinaza cerca de la cota 1715 msnm, lo cual es una situación típica y normal en las descargas de estos elementos por su inevitable cercanía puntual a las fuentes hídricas. En relación con la red de acueducto, la totalidad de las líneas se encuentran fuera de las zonas de amenaza por inundaciones.



Mapa 66. 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 (SATRedesEPMYAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C)



Mapa 67. Redes de servicios públicos analizadas desde el mapa de amenaza por inundaciones para condiciones actuales. Polígono San Antonio. (SATRedesEPM_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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 y en policloruro de vinilo (PVC), y para el acueducto en policloruro de vinilo (PVC). 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 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 Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes

Según la descripción anterior, las conexiones de las tuberías de concreto sin refuerzo y las 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. Sobre la Calle 56AA se tiene planteado ampliación del sendero peatonal existente como parte del Proyecto Barrios Sostenibles. Se recomienda entonces que se evalúe en conjunto con E.P.M. la situación de riesgo de las redes en este tramo para que se hagan los correctivos del caso.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

Hacia el costado suroccidental del polígono, al oeste de la Carrera 14B, la amenaza por movimientos en masa es también alta. En este sector se tiene igualmente un tramo de redes que por su alta vulnerabilidad quedarían en riesgo alto. Aunque los tramos de redes citados de este costado quedan realmente por fuera del Polígono San Antonio, se recomienda notificar a E.P.M. sobre esta situación.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones, en los apartados anteriores se concluyó que más del 99% de las redes de servicios se encuentran fuera de la zona de amenaza, por lo que es posible afirmar también que en la misma proporción estas redes se encuentran fuera de riesgo por inundaciones. Específicamente, la red de acueducto al interior del polígono se encuentra en su totalidad fuera de riesgo por inundaciones. Un tramo puntual de la red de alcantarillado presenta riesgo, pero éste es inherente a la cercanía inevitable de la tubería de descarga a la Quebrada La Gallinaza.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
--	--	--

20. 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 alternativas de las respectivas obras de mitigación por movimientos en masa e inundaciones se presentan en el Anexo 07.

20.1 OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para la evaluación del riesgo por movimientos en masa se dividió el Polígono San Antonio en dos zonas, Zona 1 hacia el norte del polígono y la Zona 2 hacia el sur.

La Zona 1 está localizada por debajo de la Calle 56EE y toda la margen derecha de la Quebrada La Gallinaza. En esta zona se localizan actualmente 160 estructuras entre las cuales 64 (aproximadamente el 40%) presentan alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa.

Para esta zona la alternativa que predominó fue la reubicación de las estructuras en alto riesgo, ya que las mismas se encuentran dispersas, localizadas en zonas de alta pendiente y donde los focos inestables se encuentran en las partes altas y de poco acceso de la UMI. Por las anteriores razones, se considera que la implantación de obras es ineficiente y altamente costosa para la mitigación del riesgo, por lo que estas 64 viviendas deben ser consideradas en alto riesgo no mitigable.

Dentro de esta zona no se tienen estructuras contempladas dentro del Proyecto Barrios Sostenibles, ya que el objetivo del proyecto es también la reubicación de estas estructuras que por efectos del POT (2014), como se ilustra en la Figura 150, deben ser reubicadas. En esta última figura se evidencia que la Zona 1 se encuentra en zonas de riesgo no mitigable, así las cosas el análisis realizado por este estudio ratifica la situación de alto riesgo no mitigable de la Zona 1.

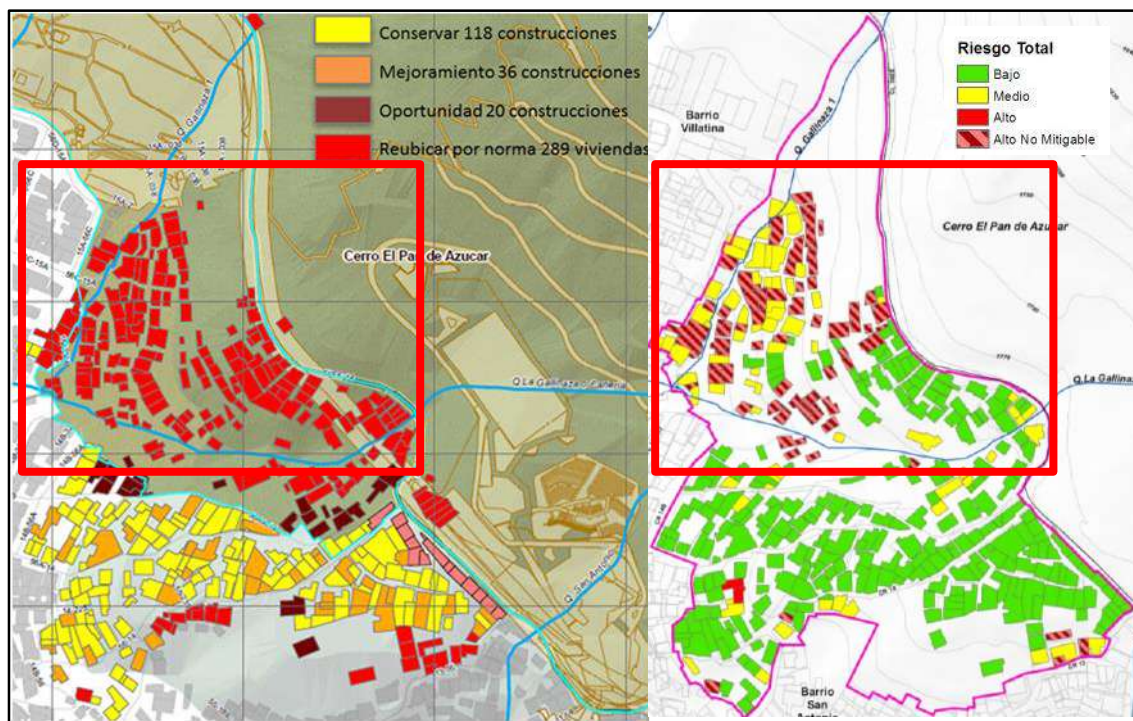




Figura 150. Comparación esquemática entre los mapas de riesgo del POT (2014) y el realizado por este estudio (Sin escala)

La Zona 2 se localiza por debajo de la Calle 56EE y sobre toda la margen izquierda de la Quebrada La Gallinaza. En esta zona se tienen once viviendas que se presentan en alto riesgo frente a un movimiento en masa. En esta zona se presentan cuatro sectores sobre los cuales se localizan las estructuras en condiciones de riesgo. En el Sector 1 se tienen tres viviendas en alto riesgo, en el Sector 2 se tienen una vivienda en alto riesgo, en el Sector 3 se tiene tres viviendas en alto riesgo y finalmente en el Sector 4 se tienen cuatro viviendas en alto riesgo.

De forma general, las estrategias planteadas para los cuatro sectores para mitigar el riesgo en condiciones actuales fueron:

- ✓ Reubicación de las viviendas en alto riesgo.
- ✓ Implantación de obras de mitigación, principalmente pantallas de pilas.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

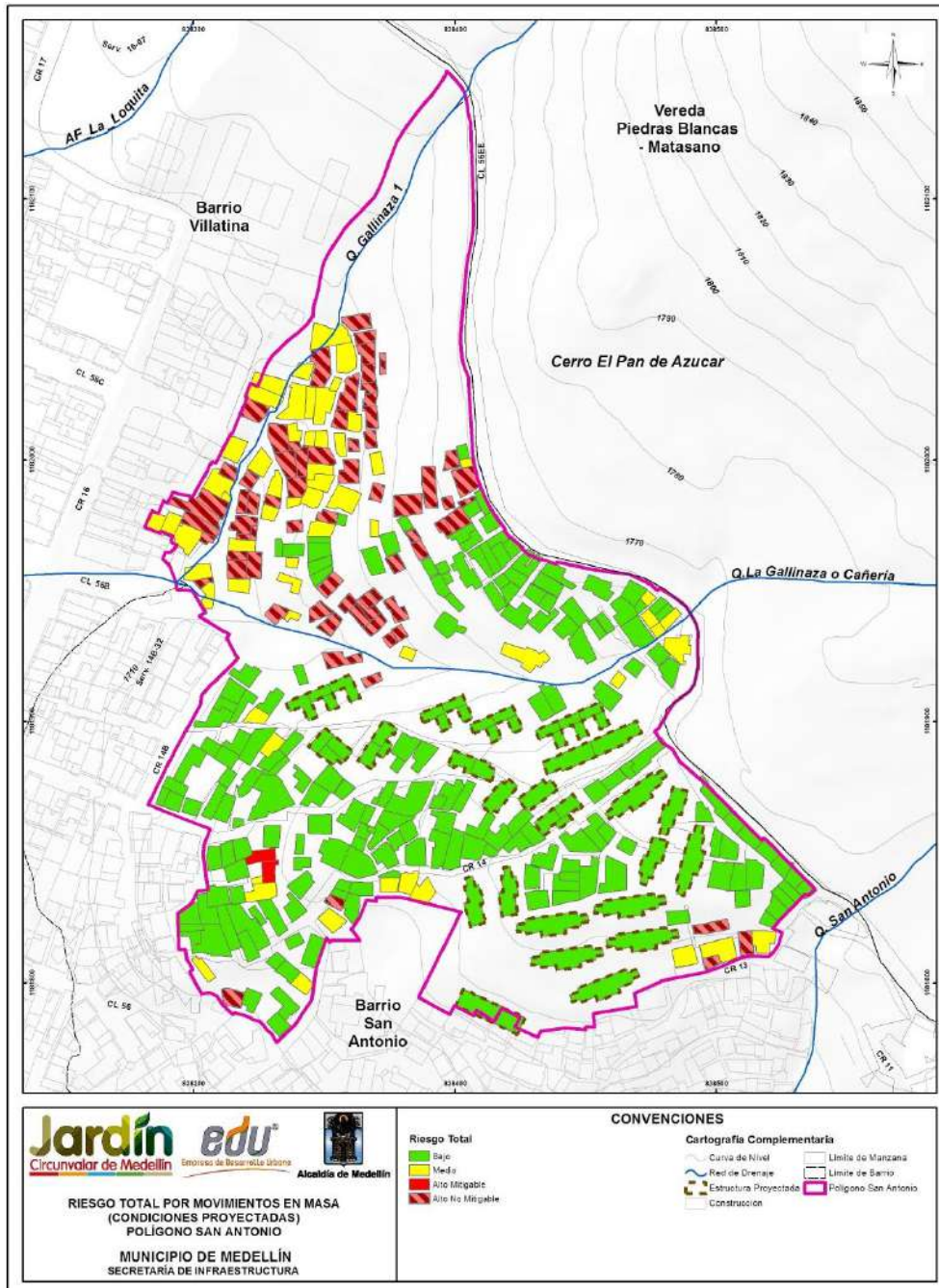
Bajo las condiciones actuales, la mejor alternativa para la mitigación del riesgo es la reubicación de las viviendas en alto riesgo, ya que se trata de pocas estructuras que se encuentran localizadas en zonas de vulnerabilidad y amenaza alta, al ser sitios donde incluso se tiene evidencias de procesos morfodinámicos antiguos.

Además de la problemática actual, el Proyecto Barrios Sostenibles presenta en los Sectores 2 y 4 estructuras futuras que deben ser analizadas de forma independiente al encontrarse inmersas en zonas de amenaza alta, donde además de las condiciones de amenaza, se tienen evidencias de cicatrices de deslizamiento. Las alternativas generales que se plantearon en estas zonas fueron:



- ✓ Desplazamiento de las futuras edificaciones retirándolas de las zonas de amenaza alta.
- ✓ Eliminación de las estructuras que se encuentran más próximas a las zonas de amenaza alta.
- ✓ Implementación de estructuras de contención puntuales.
- ✓ Revisión y diseño de las cimentaciones como parte de la estructura de mitigación, de tal forma que las mismas puedan resistir la acción cortante de las potenciales superficies de falla.

Finalmente, se consideró que la mejor alternativa es la revisión de las cimentaciones de las estructuras implicadas con el propósito de que estas sirvan como medidas de mitigación al riesgo. Para el diseño de dichas cimentaciones, se requiere además de los detalles arquitectónicos del proyecto, las respectivas cargas de servicio de las estructuras implicadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis general del riesgo con las condiciones proyectadas considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles y las respectivas obras de mitigación, en este caso el mejoramiento de las cimentaciones de las estructuras implicadas. Los resultados de este análisis se presentan en el Mapa 68.



Mapa 68. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono San Antonio (42_SATRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_C y 42_SATRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

20.2 OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES

20.2.1 Análisis de resultados en condiciones actuales

Dado que el polígono presenta un número importante de viviendas con riesgo alto por inundaciones, debido a la insuficiencia hidráulica de las estructuras existentes y a la cercanía de estas con los cauces de las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1, se plantean diversas obras que buscan incrementar la capacidad del sistema de drenaje al interior del polígono.

En el caso de la Quebrada La Gallinaza se propone retirar el paso peatonal (Puente No 1) y remplazarlo con un paso elevado que permita el tránsito del flujo y hacer una adecuación del cauce hasta este punto, buscando eliminar del flujo los controles hidráulicos. Se plantea además el remplazo de la cobertura ubicada al final del tramo (Estructura 3) por una canalización que empalma con la estructura en la cual actualmente confluyen las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1.

En el caso de la Quebrada La Gallinaza 1, la deficiencia hidráulica se debe a que las secciones de las estructuras son insuficientes para los caudales máximos evaluados. Por tanto, se plantea el retiro de la estructura tipo manhole (Estructura 5) y de la canalización (Estructura 6) existente desde el punto donde se localiza esta estructura hasta 42 m aguas abajo, con el fin de recuperar las condiciones del cauce. Se plantea además el remplazo del box culvert del final del tramo por una canalización que empalma con la estructura en la cual actualmente confluyen las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1.

Todas las estructuras se definieron a partir de un análisis de alternativas, el cual se presenta en el Anexo 07. Se consideraron diversos aspectos como costos, grado de solución del problema entre otros.



El Mapa 69 y el Mapa 70 presentan las manchas de inundación y las condiciones de amenaza por inundación para las condiciones proyectadas y el Mapa 71 presenta las condiciones de riesgo por inundaciones en condiciones proyectadas.

Finalmente, en los Planos P-2445-SA-OM-01, P-2445-SA-OM-02, P-2445-SA-OM-03 y P-2445-SA-OM-03A se presentan los diseños de estas estructuras mencionadas que dan solución a la problemática de riesgo alto para casi la totalidad de las viviendas del polígono. Las viviendas que permanecen en riesgo alto por inundaciones en condiciones proyectadas corresponden a algunas que se encuentran invadiendo los cauces, por lo que se consideraron con riesgo alto no mitigable.

Los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo para condiciones existentes se incluyen en el Anexo 12 donde se presenta la geodatabase del proyecto.

20.2.2 Análisis de resultados en condiciones proyectadas

Los análisis en condiciones existentes se encuentran descritos en la evaluación hidráulica presentada en los Numerales 12.3.10 y 12.3.11, donde se especifican los resultados 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 69, el Mapa 70 y el Mapa 71. En el Mapa 72 se muestra el retiro a la quebrada planteado por el POT (2014) comparado con el retiro hidrológico en condición proyectada obtenido del presente estudio.

Los resultados obtenidos para estas condiciones proyectadas indican que las obras propuestas cumplen con las condiciones geométricas que permiten la solución a la problemática asociada a las inundaciones mostradas en las condiciones existentes. A continuación se muestran los resultados asociados a 2.33 años y 100 años periodo de retorno, para la quebrada La Gallinaza y quebrada La Gallinaza 1.

Para la quebrada La Gallinaza la profundidad máxima asociada a un periodo de retorno de 2.33 años es 1.27 m, mientras que para 100 años periodo de retorno la profundidad es de 1.48 m.

En el caso de las velocidades máximas, se encuentran del orden de 7.48 m/s para un periodo de retorno de 2.33 años, mientras que para 100 años la velocidad es de 7.93 m/s.

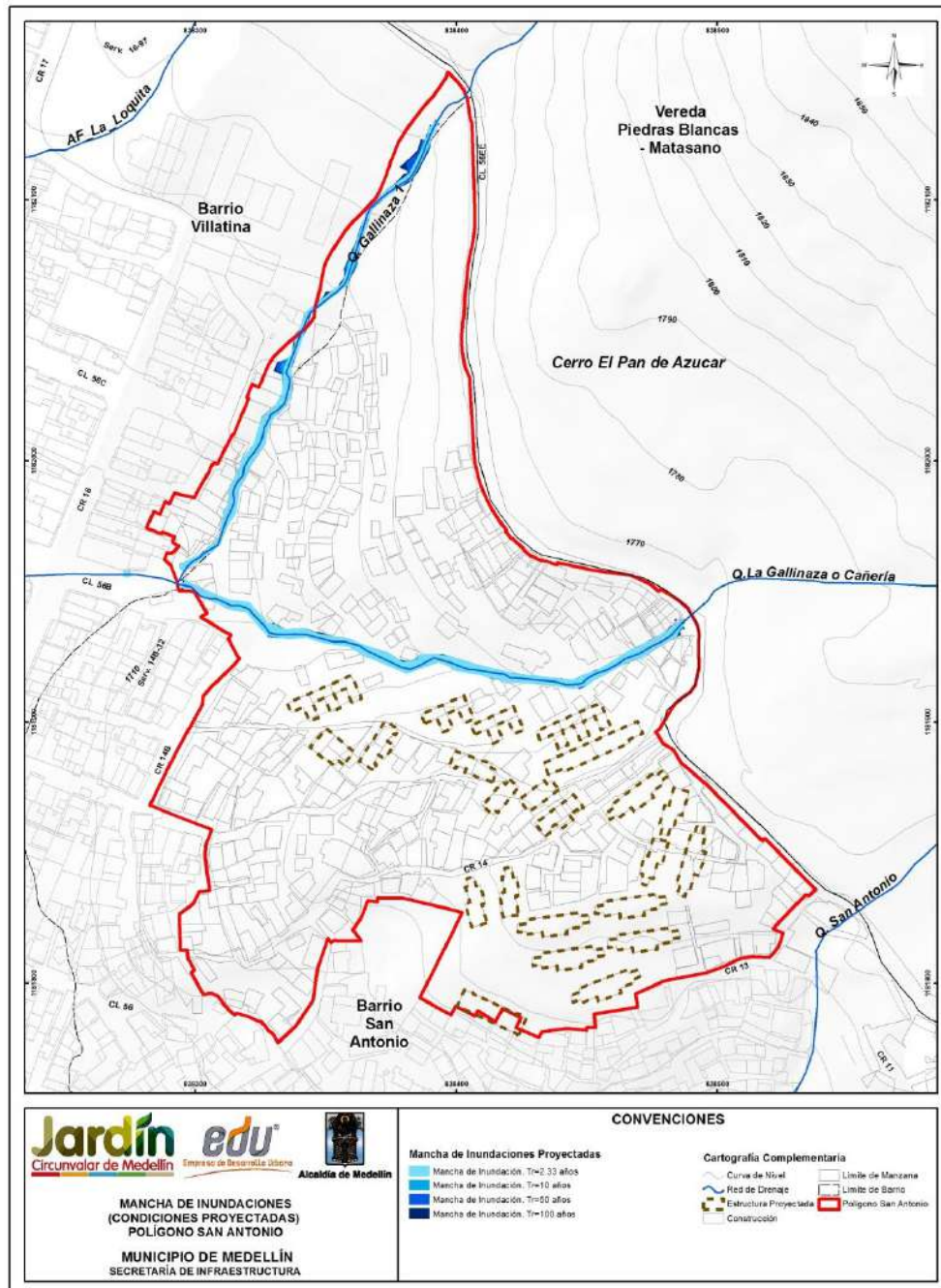
Para la quebrada La Gallinaza 1 la profundidad máxima asociada a un periodo de retorno de 2.33 años es 1.67 m, mientras que para 100 años periodo de retorno la profundidad es de 1.84 m.

En el caso de las velocidades máximas, se encuentran del orden de 7.73 m/s para un periodo de retorno de 2.33 años, mientras que para 100 años la velocidad es de 7.5 m/s.

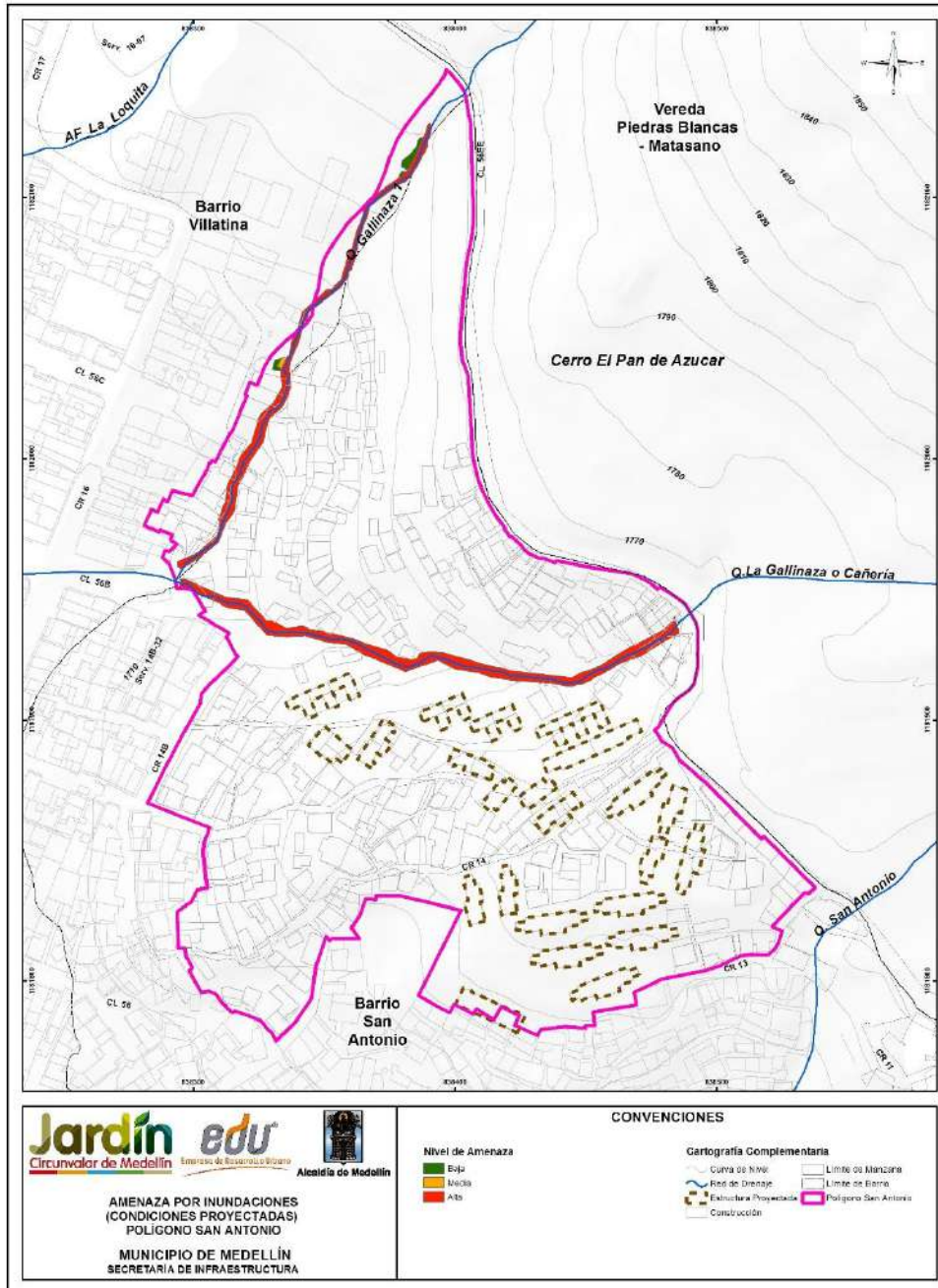
Al comparar los resultados obtenidos en condiciones actuales con las proyectadas, se observa que no existe un cambio en la dinámica de la quebrada que pueda afectar las condiciones aguas abajo de la misma, por tanto se elimina la mancha de inundación y se mejoran las condiciones de amenaza por inundación.

En el Mapa 72 se puede apreciar que una parte de la infraestructura de viviendas proyectadas se encuentra dentro de la zona de retiro a corrientes hídricas establecida por el POT (2014), cuya franja de retiro total se construye a partir de la envolvente de las franjas de retiros parciales establecidas para cubrir aspectos hidrológicos, geológicos, entre otros. A partir de los resultados del presente estudio puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha de inundación asociados a 100 años periodo de retorno, es decir, se encuentran fuera de lo que sería la franja de retiro hidrológico que se delimitaría a partir de los resultados del presente estudio.

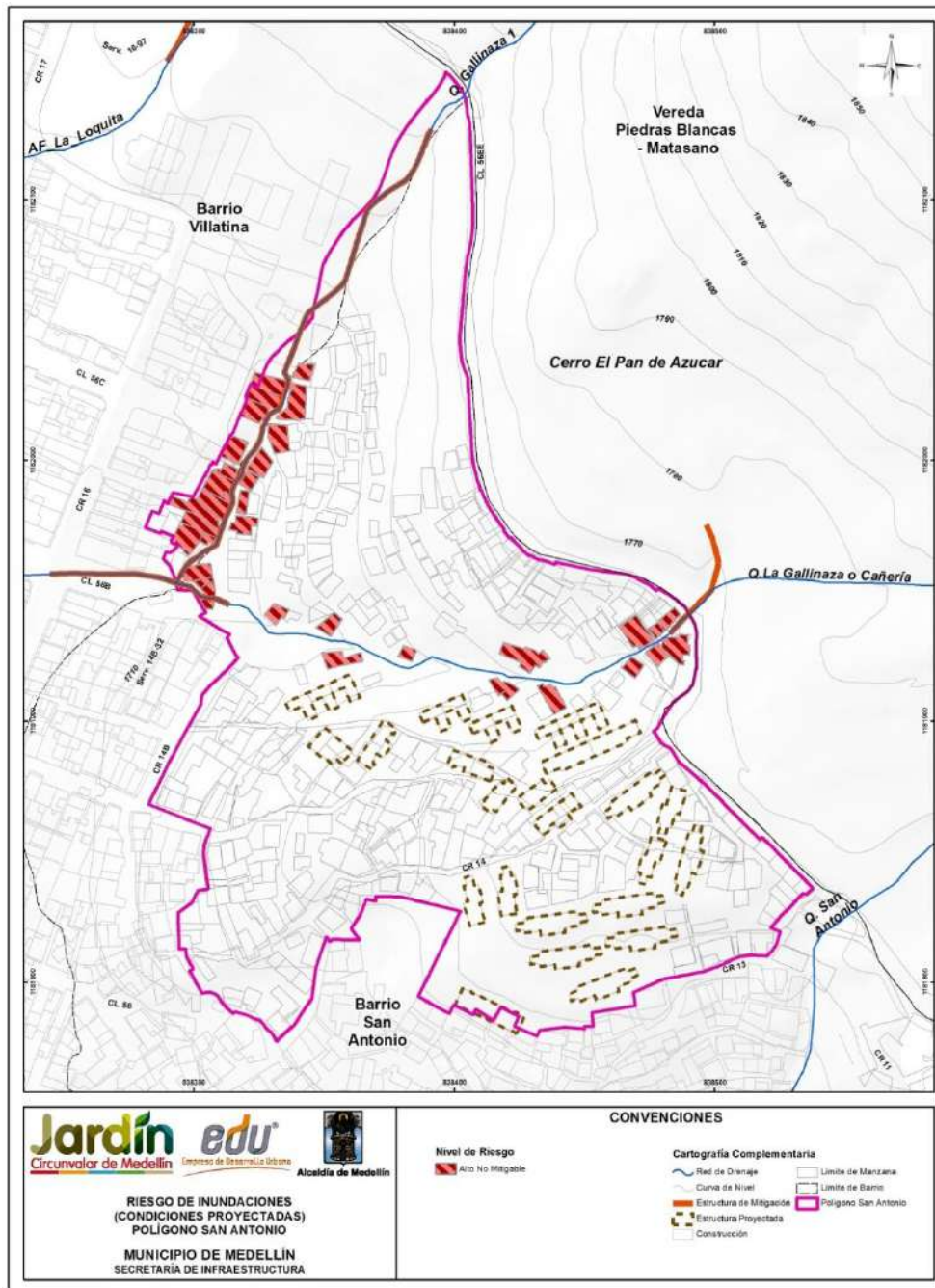
Los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo para condiciones proyectadas se incluyen en el Anexo 12 donde se presenta la geodatabase del proyecto.



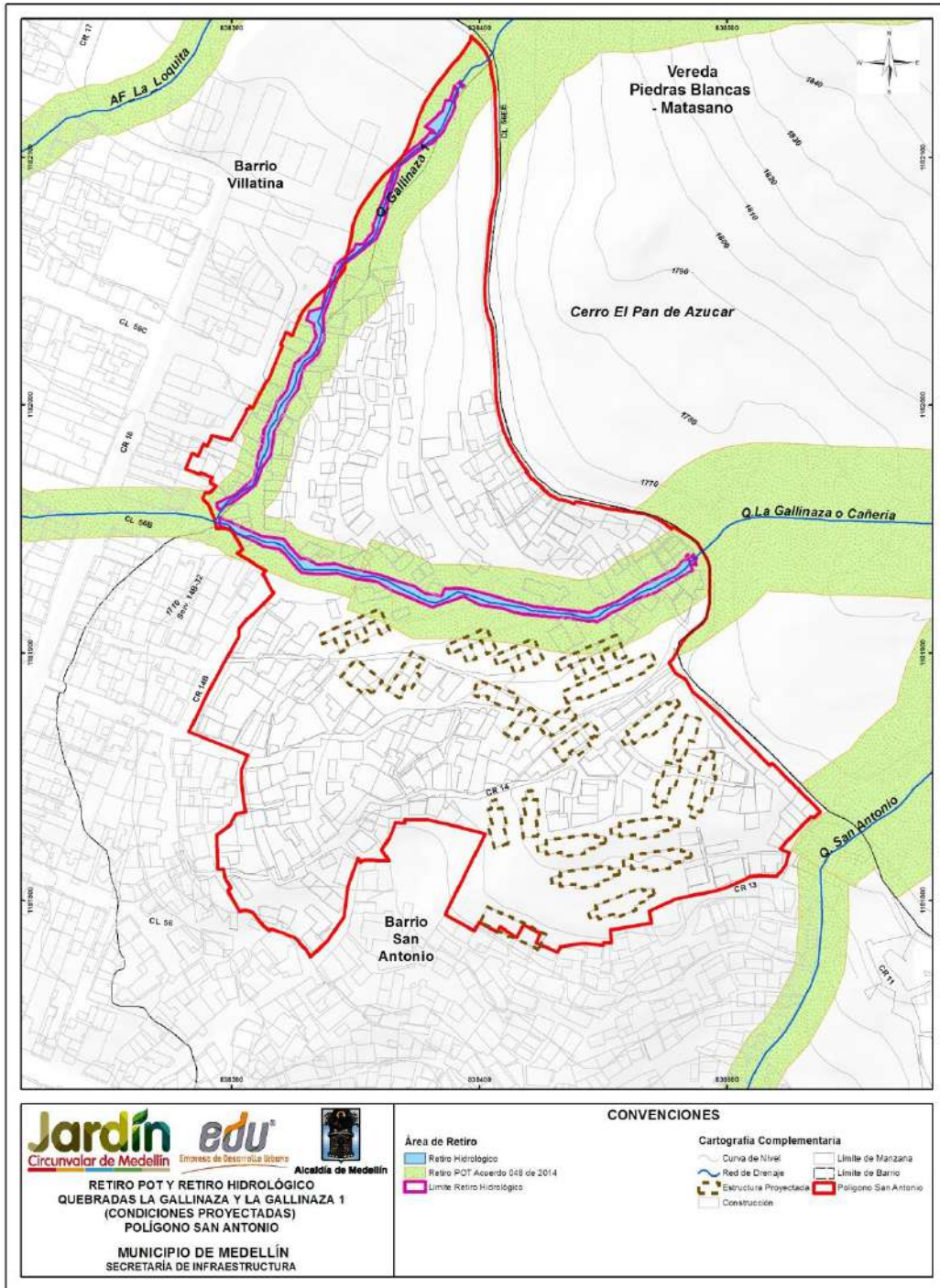
Mapa 69. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno. Polígono San Antonio. Condiciones Proyectadas.
(22_SATManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_C y 22_SATManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_T)





Mapa 70. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1. Polígono San Antonio (24_SATAmaznasInundacionesCondProyecto_Medellin_C y 24_SATAmaznasInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



**Mapa 71. Análisis de riesgo por inundaciones para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono San Antonio
(44_SATRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_C y
44_SATRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_T)**



Mapa 72. Retiro POT y retiro hidrológico para las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1 (SATRetiroPOT-RetiroHidrologicoyGeologico_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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

21. 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 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.

El Polígono San Antonio, objeto principal de este estudio, tiene un área aproximada de 4.54 hectáreas. Se encuentra localizado en la zona centro sur, bordeado al Norte con el Polígono Pinares de Oriente y al Sur con el Polígono Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. Este polígono limita por el norte con el Eco parque Campo Santo Villatina, el Barrio Pinares de Oriente y la Quebrada La Gallinaza 1, por el sur con el Barrio Esfuerzos de Paz y la Quebrada San Antonio, por el oriente con el Cerro Pan de Azúcar y al Occidente con el Barrio Villatina.

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 San Antonio, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

La selección de la UMI San Antonio partió del análisis de las condiciones morfométricas, morfodinámicas, hidráulicas e hidrológicas de la zona. Se enfoca en atender las evaluaciones de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales que podrían afectar directamente las estructuras al interior del Polígono San Antonio. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI abarca las divisorias de los afluentes de las Quebradas La Gallinaza 1 y San Antonio. No obstante, la elección de los límites de la UMI está más orientada en la actividad y afectación por procesos de inestabilidad, ya que por su direccionamiento pueden afectar el Polígono San Antonio. Así las cosas, hacia el costado norte se incluyen las zonas de afectación del Movimiento Villatina (1987) lo que actualmente se identifica como el Campo Santo y desciende en medio de este lote y la Carrera 16 hasta la Calle 56A donde gira para definir el límite inferior de la UMI, estas dos vías del sector no presentan ninguna afectación morfodinámica. El límite inferior coincide con la zona de cambio de pendiente del sector, en el cual, por fuera del límite, se conservan pendientes menores que al interior de la UMI.



	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:

Las unidades geológicas de rocas cristalinas presentes en la UMI San Antonio corresponden a las Dunitas de Medellín (JKuM) y los cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA), las cuales se presentan en los horizontes de meteorización IC y IIA. Estas unidades están suprayacidas por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósito de deslizamiento (Qd), cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ. Además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

Debido a las condiciones geomorfológicas y a la ocupación del territorio, los eventos más recurrentes con afectaciones considerables sobre la UMI San Antonio, son aquellos generados por los movimientos en masa y las inundaciones. La manifestación u ocurrencia de estos fenómenos coincide con la distribución anual bimodal de las lluvias mensuales 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. El Barrio San Antonio no tiene registro alguno de avenidas torrenciales. Específicamente en la UMI San Antonio, los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente inactivos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, cárcavas, surcos, bloques en superficie por erosión. En la UMI San Antonio se tiene reportado uno de los movimientos en masa más destacados en la historia del departamento de Antioquia, como lo es el deslizamiento de Villatina. Este evento ocurrió el 27 de septiembre de 1987, el cual dejó alrededor de 500 víctimas mortales que no pudieron ser rescatadas en totalidad, por lo que fue declarado “campo santo”. En lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI San Antonio, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas en las márgenes de los drenajes, sin embargo en la exploración de campo únicamente se detectaron algunos procesos menores de socavación del cauce en la Quebrada La Gallinaza.

Las evaluaciones efectuadas desde el punto de vista hidrogeológico permiten 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. Específicamente 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 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. 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



	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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. 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 desciende 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 San Antonio, 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. El modelo hidrogeológico propuesto, permite determinar 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 San Antonio, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, muestran que específicamente con el Piezómetro P-SA-PZ-15D fue posible interceptar el flujo regional, ubicado en sus alrededores en la cota 1705 msnm.

En lo relacionado con los **Aspectos Geotécnicos** tanto de la UMI como del Polígono San Antonio, 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.

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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

Los sitios de mayor inestabilidad y que representan mayor afectación al polígono se localizan en la parte alta y baja del polígono, ubicados en una ladera de alta pendiente y desarrollada superficialmente en los Horizontes IIA y IC de Dunitas de Medellín, respectivamente. También se presentan otros focos en la parte alta de la UMI, por fuera del polígono, en laderas con pendientes muy altas mayores a 30° desarrollada superficialmente en el Horizonte IC de Dunitas de Medellín y depósitos de flujo y/o escombros. En la zona se mapearon 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. En general, las áreas con probabilidad de falla baja predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI San Antonio.

Para la evaluación del riesgo por movimientos en masa se dividió el Polígono San Antonio en dos zonas, Zona 1 hacia el norte del polígono y la Zona 2 hacia el sur.

- ✓ La Zona 1 está localizada por debajo de la Calle 56EE y toda la margen derecha de la Quebrada La Gallinaza. En esta zona se localizan actualmente 160 estructuras entre las cuales 64 (aproximadamente el 40%) presentan alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa. Para esta zona la alternativa que predominó fue la reubicación de las estructuras en alto riesgo, ya que, las mismas se encuentran dispersas, localizadas en zonas de alta pendiente y donde los focos inestables se encuentran en las partes altas y de poco acceso de la UMI. Por las anteriores razones, se considera que la implantación de obras es ineficiente y altamente costoso para la mitigación del riesgo, por lo que estas 64 viviendas deben ser consideradas en alto riesgo no mitigable.
- ✓ La Zona 2 se localiza por debajo de la Calle 56EE y sobre toda la margen izquierda de la Quebrada La Gallinaza. En esta zona se tienen once viviendas que 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

presentan en alto riesgo frente a un movimiento en masa. En el Sector 1 se tienen tres viviendas en alto riesgo, en el Sector 2 se tiene una vivienda en alto riesgo, en el Sector 3 se tiene tres viviendas en alto riesgo y finalmente en el Sector 4 se tienen cuatro viviendas en alto riesgo. De forma general, las estrategias planteadas para los cuatro sectores para mitigar el riesgo en condiciones actuales fueron reubicación de las viviendas en alto riesgo e implantación de obras de mitigación, principalmente pantallas de pilas. La reubicación de las viviendas en alto riesgo se justifica sobretodo porque se trata de pocas estructuras que se encuentran localizadas en zonas de vulnerabilidad y amenaza alta, al ser sitios donde incluso se tiene evidencias de procesos morfodinámicos antiguos.

Además de la problemática actual, el Proyecto Barrios Sostenibles presenta en los Sectores 2 y 4 estructuras futuras que deben ser analizadas de forma independiente al encontrarse inmersas en zonas de amenaza alta, donde además de las condiciones de amenaza, se tienen evidencias de cicatrices de deslizamiento. Las alternativas generales que se plantearon en estas zonas fueron:



- ✓ Desplazamiento de las futuras edificaciones retirándolas de las zonas de amenaza alta.
- ✓ Eliminación de las estructuras que se encuentran más próximas a las zonas de amenaza alta.
- ✓ Implementación de estructuras de contención puntuales.
- ✓ Revisión y diseño de las cimentaciones como parte de la estructura de mitigación, de tal forma que las mismas puedan resistir la acción cortante de las potenciales superficies de falla.

Finalmente, se consideró que la mejor alternativa es la revisión de las cimentaciones de las estructuras implicadas con el propósito de que estas sirvan como medidas de mitigación al riesgo. Para el diseño de dichas cimentaciones, se requiere además de los detalles arquitectónicos del proyecto, las respectivas cargas de servicio de las estructuras implicadas.

Teniendo en cuenta la evaluación del riesgo, considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable, se tiene que de las 385 estructuras, 243 presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (63%), 67 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (17%) y 75 presentan riesgo alto ante movimientos en masa (20%), de las cuales 73 fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable.

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 de las estructuras existentes y a la cercanía de estas con los cauces de las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1,

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---



situación por la cual se plantean diversas obras que buscan incrementar la capacidad del sistema de drenaje al interior del polígono. Todas las estructuras se definieron a partir de un análisis de alternativas. Las viviendas que permanecen en riesgo alto por inundaciones en condiciones proyectadas corresponden a algunas que se encuentran invadiendo los cauces, por lo que se consideraron con riesgo alto no mitigable.

Los vertimientos de la Quebrada La Gallinaza 1 hacia la Carrera 16 se deben a la incapacidad hidráulica de la Estructura 5. Las intervenciones antrópicas hacen que las aguas que salen del cauce en el punto donde se localiza esta estructura no vuelvan a este sino que viajen por la vía, alejándose del cauce principal. En esta quebrada, la deficiencia hidráulica se debe a que las secciones de las estructuras son insuficientes para los caudales máximos evaluados. Dado que las viviendas ubicadas en esta zona del polígono presentan en su mayoría riesgo alto no mitigable por movimiento en masa, únicamente se plantea el retiro de la Estructura 5 y de la Estructura 6 (canalización existente) desde el inicio de ésta hasta 42 m aguas abajo. Sin embargo, en la parte final de esta quebrada se plantea el remplazo de la Estructura 7 (box culvert) por una canalización que empalma con la estructura en la cual actualmente confluyen las Quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1.

En la Quebrada La Gallinaza, la deficiencia hidráulica se debe a que las secciones de las estructuras son insuficientes para los caudales máximos evaluados. Por tanto se propone retirar el paso peatonal (Puente No 1) y remplazarlo con un paso elevado y hacer una adecuación del cauce hasta este punto. Se plantea además el remplazo de la cobertura del final del tramo (Estructura 3) por una canalización que empalma con la estructura en la cual actualmente confluyen las quebradas La Gallinaza y La Gallinaza 1.

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 algunas edificaciones están dentro 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 de inundación asociados a 100 años periodo de retorno, 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 San Antonio. 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, que en este caso son del tipo estructural. En el Anexo 08 se presentan las memorias de diseño de las obras de mitigación recomendadas. En los Planos P-2445-SA-OM-01 a P-2445-SA-OM-04 del Anexo 09 se presentan los diseños de estas estructuras mencionadas que dan solución 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

problemática de riesgo del polígono. En el Anexo 11 se presentan las cantidades de obra, presupuesto y especificaciones.

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, catorce 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 151).

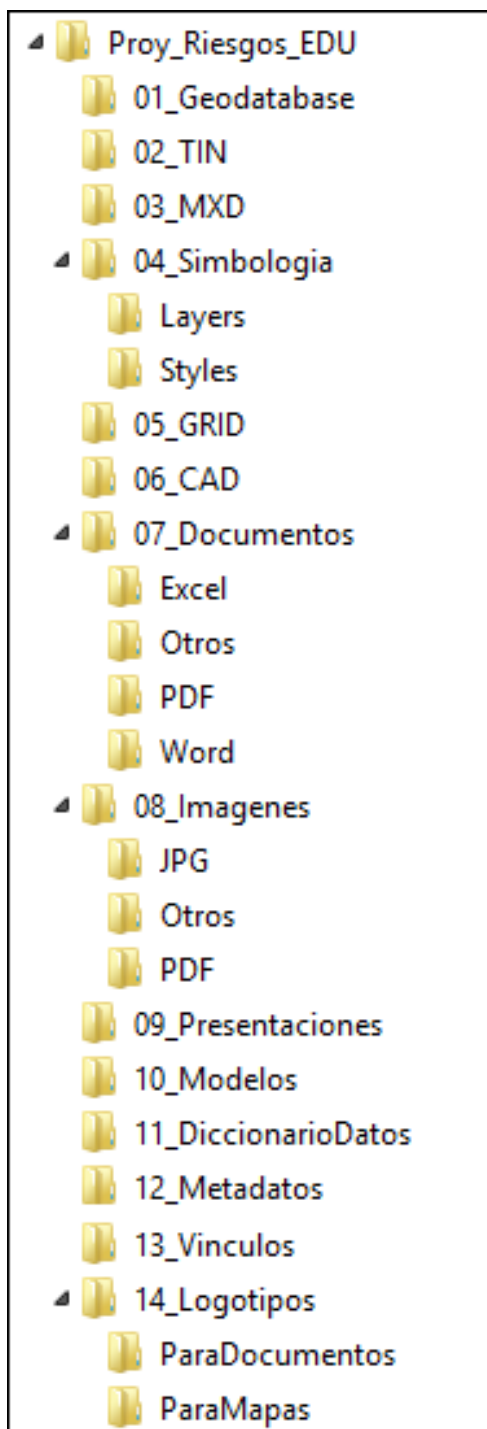




Figura 151. Estructura general de la información entregada

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

22. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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, (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, (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.

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.

Aristizábal, 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 POLÍGONO SAN ANTONIO</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.

Consulcivil, (2013). Estudios de zonificación y caracterización geológico – geotécnica del proyecto piloto cinturón verde metropolitano – Tramo 1- Sector C – Cerro Pan de Azucar en la ciudad de Medellín. GD-055 V.1.

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) Localen 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

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

Andorra”. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24.

FLO-2D, (2010). Reference Guide and GDS Manual.

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 Sacaojal. 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.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

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 - 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.

INCIGAM (2015). “Estudio Geotécnico preliminar para la construcción de la primera etapa del proyecto 13 de Noviembre en el Proyecto Barrios Sostenibles, en desarrollo del objeto de la Contratación Directa No. 67 de 2013, celebrado entre la Universidad y la Empresa de Desarrollo Urbano –EDU”.

INGEOCILCÓN LTDA (2014). “Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano”.

	<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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	--	---

INGEOCILCÓN LTDA (2009). “Estudio Geotécnico para el Parque de la Memoria de Villa Tina”. Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) – Proyectos Bordes Urbanos Rurales PUI COR. Informe Final. Medellín, Septiembre de 2009.

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.

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.

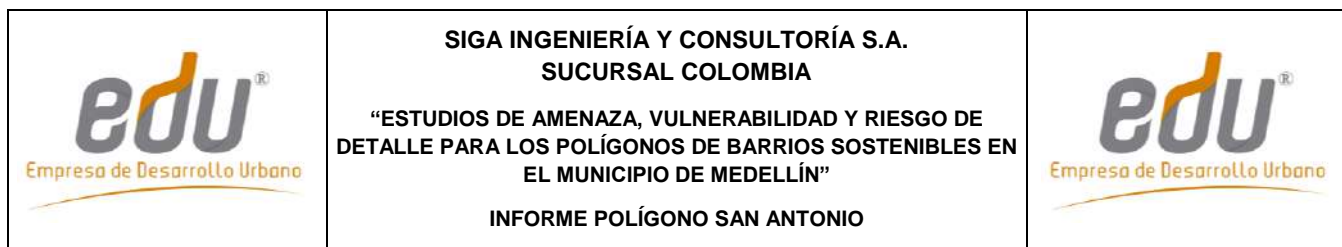
POT (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín. Acuerdo 48 de 2014.

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.

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.

TECNISUELOS LTDA (2013). Estudio para la construcción del parque ecoturístico y recreativo Trece de Noviembre, ubicado en el cerro Pan de Azúcar. Informe 87/2013

TECNISUELOS-ICC LTDA (2010). “Estudio de suelos para línea de metro cable Miraflores”. Informe 61/2010. Medellín.

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, 4375-4387.

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.

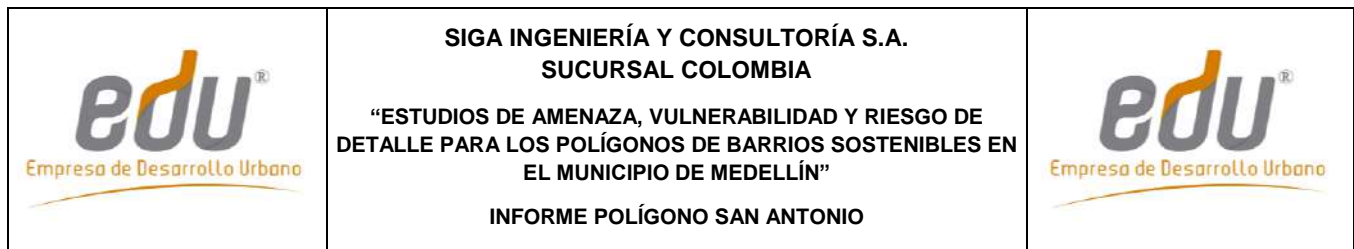
Universidad Nacional de Colombia, 2000, Investigación de aguas subterráneas en la región Valles de San Nicolás, Medellín.

UPB (2014). “Estudios, diagnóstico, formulación y diseños de los proyectos barrios sostenibles en el sector la arenera y tres sectores más al interior de los planes maestro 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”. Polígono de Intervención San Antonio La Torre. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Convenio 67 de 2014. Universidad Pontificia Bolivariana, Junio 2014.

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 Surface 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.

Velez, R. M. (2010). Estudio de suelos para el paseo de borde en la base del Cerro Pan de Azúcar y senderos peatonales a la cima del Cerro. Empresa Desarrollo Urbano (EDU) - Bordes Urbano Rurales. Medellín, Enero de 2010.



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>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 POLÍGONO SAN ANTONIO</p>	
---	---	---

23. 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.