

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

MAYO DE 2018

VERSIÓN 6

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

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	15/07/2015	No Aplica	Documento Inicial
1	28/08/2015	Todos	Documento Final
2	26/10/2015	Todos	Revisión del documento Final
3	25/11/2015	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
4	11/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
5	21/12/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA	Revisión del documento Final
6	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 POLIGONO LA CRUZ	
---	---	---

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

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

TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE VERSIÓN	2
CONTROL DE DISTRIBUCIÓN.....	3
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE.....	7
3.1 GENERALIDADES	7
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN	9
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS	16
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL	16
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)	16
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv).....	18
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat).....	18
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)	18
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)	18
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	19
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)	19
4.2 GEOLOGÍA LOCAL	20
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)	25
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv)	27
4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt).....	28
4.2.4 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e).....	29

4.2.5	Dunitas de Medellín (JKuM)	31
5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	35
5.1	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	35
5.1.1	Macrounidades geomorfológicas.....	35
5.1.2	Unidades Geomorfológicas	38
5.2	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	41
5.2.1	Unidad de Lomeríos Amplios LRA	46
5.2.2	Unidad de Lomeríos Estrechos LRE	46
5.2.3	Unidad de Lomo Estrecho Con Vertientes Fuertes LEVF	47
5.2.4	Unidad de Peldaño Tectónico PÑT	47
5.2.5	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI	48
5.2.6	Unidad de Superficie Antrópica SA	49
5.2.7	Unidad de Vertiente Escarpada VE	49
5.2.8	Unidad de Escarpe E	50
5.3	MORFODINÁMICA REGIONAL	51
5.4	MORFODINÁMICA LOCAL	56
6.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	64
6.1	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL.....	64
6.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	64
6.2.1	Orientación y buzamiento.....	66
6.2.2	Espaciamiento	70
6.2.3	Continuidad.....	71
6.2.4	Abertura	72
6.2.5	Relleno.....	72
6.2.6	Alteración.....	74

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

6.2.7	Rugosidad.....	75
6.2.8	Agua	75
6.2.9	Resistencia de las paredes	77
6.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	78
7.	EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA	84
7.1	ASPECTOS GENERALES	84
7.2	MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS	85
7.3	MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA	89
7.4	MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA	91
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS.....	96
8.1	ASPECTOS GENERALES	96
8.2	LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG.....	98
8.3	EL GRADIENTE OROGRÁFICO	102
8.4	EL GRADIENTE NULO	106
8.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	110
8.5.1	Zonas de recarga	110
8.5.2	Caracterización del acuífero.....	110
8.5.3	Flujo regional y flujo local	111
8.5.4	Zonas de descarga	112
8.6	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA.....	112
8.6.1	Piezómetros P-LC-PZ-35 B y P-LC-PZ-35 D.....	115

8.6.2	Piezómetros P-LC-PZ-36B y P-LC-PZ-36D.....	116
8.6.3	Piezómetros P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D.....	116
8.6.4	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	117
8.7	AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	118
9.	ASPECTOS SÍSMICOS	122
10.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS	126
10.1	SONDEOS EXPLORATORIOS	126
10.1.1	Perforaciones.....	126
10.1.2	Líneas geofísicas	136
10.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	143
10.2.1	Ensayos de clasificación	144
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	149
10.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES	150
10.3.1	Aspectos generales.....	150
10.3.2	Lleno antrópico	151
10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros	152
10.3.4	Depósitos coluviales	153
10.3.5	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)	154
10.3.6	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte	156

11.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS.....	157
11.1	GENERALIDADES	157
11.2	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	157
11.3	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN	160
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa	162
11.3.2	Estación Mazo	162
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga.....	163
11.4	DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS	164
11.4.1	Parámetros morfométricos de la cuenca	167
11.4.2	Usos del suelo	167
11.4.3	Tiempo de concentración	169
11.5	CAUDALES MÁXIMOS	170
11.5.1	Intensidades de Diseño.....	170
11.5.2	Método Racional	171
11.5.3	Hidrogramas sintéticos.....	172
11.5.4	Regionalización de caudales.....	176
11.5.5	Resumen de caudales.....	179
12.	ASPECTOS HIDRÁULICOS.....	181
12.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	181
12.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES	181
12.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES	185
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D	186
12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	186
12.3.3	Información topográfica.....	187

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

12.3.4	Tamaño de la malla.....	187
12.3.5	Condiciones de frontera	187
12.3.6	Condiciones iniciales.....	188
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica	188
12.3.8	Coeficiente de rugosidad.....	188
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	188
12.3.10	Resultados en Quebrada La Chorrera o El Molino (Condiciones Actuales)	189
13.	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	191
13.1	METODOLOGÍA	191
13.1.1	Objetivo y aspectos generales	191
13.1.2	Escenarios de análisis.....	191
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad.....	193
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla.....	196
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)	198
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza	201

	<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 POLIGONO LA CRUZ</p>	
--	--	--

13.2	RESULTADOS	202
14.	AMENAZA POR INUNDACIONES	212
14.1	ASPECTOS GENERALES	212
14.2	METODOLOGÍA	212
14.3	RESULTADOS	215
15.	AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	217
15.1	ASPECTOS GENERALES	217
15.2	AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	217
15.3	AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL MATERIAL DEL LECHO	218
15.4	METODOLOGÍA	220
15.5	2RESULTADOS	223
15.6	AMENAZAS POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES PARA PLANIFICACIÓN DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL	227
16.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	228
16.1	ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL	228
16.2	VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....	229
16.2.1	Metodología de análisis.....	229
16.2.2	Calibración de la metodología	236
16.2.3	Levantamientos de campo y análisis de la información	245

	<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 POLIGONO LA CRUZ</p>	
--	--	--

16.2.4	Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas	258
16.3	VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES.....	268
16.4	SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS	280
17.	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA	283
17.1	ASPECTOS GENERALES	283
17.2	CÁLCULO DEL RIESGO.....	283
17.3	RESULTADOS	284
18.	RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES.....	294
18.1	METODOLOGÍA.....	294
18.2	RESULTADOS	294
19.	ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....	298
19.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES	298
19.3	SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA	298
19.4	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES	302
19.4.1	Tubería en concreto no reforzado (Clase 1)	302
19.4.2	Tubería en policloruro de vinilo (PVC)	302
19.4.3	Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes	302

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

19.5	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES.....	302
20.	PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO	304
20.1	OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA	304
20.2	OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	316
21.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	324
22.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	330
23.	LIMITACIONES	337

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Definición de los límites de la UMI del polígono al interior del Barrio La Cruz (Sin Escala)	10
Figura 2. Esquema de localización del límite nororiental en la UMI La Cruz	11
Figura 3. Panorámica general de los límites físicos surorientales de la UMI La Cruz.....	11
Figura 4. Esquema de localización del límite suroccidental en la UMI La Cruz	12
Figura 5. Panorámica general de pendientes parte alta UMI y Polígono La Cruz.....	13
Figura 6. Panorámica general de pendientes parte baja UMI y Polígono La Cruz.....	13
Figura 7. Lleno antrópico encontrado en la Perforación P-LC-PR-39.....	25
Figura 8. Lleno antrópico encontrado en la Estación de Campo AMD04-U-LC	26
Figura 9. Llenos con bloque de rocas como base para viviendas	27
Figura 10. Ceniza volcánica en parte alta de la UMI La Cruz.....	28
Figura 11. Ceniza volcánica encontrada en la Perforación P-LC-PR-36	28
Figura 12. Depósito aluviotorrencial en la Quebrada El Molino	29
Figura 13. Depósito de flujo de lodos y escombros ubicado en la parte central de la UMI La Cruz	30
Figura 14. Depósito encontrado en la Perforación P-LC-PR-35	31
Figura 15. Evidencias de dunita cizallada en la zona de estudio.....	31
Figura 16. Horizonte IB en la Estación de Campo AMD24-U-LC y en la Perforación P-LC-PR-36	32
Figura 17. Horizonte IC de las Dunitas de Medellín	33
Figura 18. Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.....	33
Figura 19. Arcilla de falla en la Perforación P-LC-PR-35.....	34
Figura 20. Horizonte IIB de las Dunitas de Medellín.....	34
Figura 21. Perfil geomorfológico A-A´ (A2).....	45
Figura 22. Perfil geomorfológico B-B´ (A4).....	45
Figura 23. Perfil geomorfológico C-C´ (A6)	46
Figura 24. Lomeríos Amplios LRA	46
Figura 25. Unidad de Lomeríos Estrechos LRE	47

Figura 26. Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	48
Figura 27. Unidad de Peldaño Tectónico PÑT	48
Figura 28. Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI.....	49
Figura 29. Superficie Antrópica SA	49
Figura 30. Vertiente Escarpada VE y Escarpe E.....	50
Figura 31. Unidad de Escarpe E	51
Figura 32. Distribución de los fenómenos	53
Figura 33. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos	54
Figura 34. Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987 (Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987)	56
Figura 35. Deslizamiento en Barrio La Cruz.....	60
Figura 36. Proceso morfodinámico activo sector El Hoyo	60
Figura 37. Proceso inactivo de mayor magnitud	61
Figura 38. Vaguada y zona de acumulación de agua.....	61
Figura 39. Escarpe en roca sobre la margen derecha de la quebrada El Molino, en la estación de campo MAD28-U-LC.....	62
Figura 40. Socavación de cauce antrópico	63
Figura 41. Desgarre localizado en la parte trasera de una vivienda	63
Figura 42. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades	67
Figura 43. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades	68
Figura 44. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las estaciones MAD29-U-LC y MAD34-U-LC.....	69
Figura 45. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades	71
Figura 46. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades	72
Figura 47. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades	73
Figura 48. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades.....	74
Figura 49. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades.....	75
Figura 50. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002)	76
Figura 51. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades	76

Figura 52. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades	77
Figura 53. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades	78
Figura 54. Secciones analizadas en la IMI La Cruz	79
Figura 55. Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	80
Figura 56. Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	81
Figura 57. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo	82
Figura 58. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica	84
Figura 59. Localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico	97
Figura 60. Recta Meteorica para Colombia	98
Figura 61. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio	100
Figura 62. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental	102
Figura 63. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	104
Figura 64. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	104
Figura 65. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	105
Figura 66. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	105
Figura 67. 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)	108
Figura 68. 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	111
Figura 69. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil	114
Figura 70. Cotas piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-35B y P-LC-PZ-35D	115
Figura 71. Cotas piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-36B y P-LC-PZ-36D	116
Figura 72. Cotas piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D	117

Figura 73. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono La Cruz	118
Figura 74. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica.....	120
Figura 75. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica.....	121
Figura 76. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999).....	122
Figura 77. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz	129
Figura 78. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	130
Figura 79. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	131
Figura 80. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	132
Figura 81. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	133
Figura 82. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	134
Figura 83. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación).....	135
Figura 84. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-01	137
Figura 85. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-01	138
Figura 86. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-01	138
Figura 87. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-02.....	139
Figura 88. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-02	139
Figura 89. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-02	139
Figura 90. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-03.....	140
Figura 91. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-03	140
Figura 92. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-03	140
Figura 93. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-LC-LG-15.....	141
Figura 94. Dispersión y ajuste para la Línea U-LC-LG-15.....	141
Figura 95. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-LC-LG-15	142

Figura 96. Perfil de velocidad de onda de corte (S) Línea 3 (Bioexplora, 2005)	142
Figura 97. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande	146
Figura 98. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad	147
Figura 99. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.	147
Figura 100. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad.....	148
Figura 101. Resultados corte directo Muestra ULC-M1 (1) a 0.45 m de profundidad	150
Figura 102. Resultados corte directo Muestra ULC-M1 (2) a 0.45 m de profundidad	150
Figura 103. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico.	151
Figura 104. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente.....	152
Figura 105. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos	154
Figura 106. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas.....	155
Figura 107. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa	162
Figura 108. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo	163
Figura 109. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga	163
Figura 110. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)	164
Figura 111. Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILÓN (2014)	180
Figura 112. Cañón de la quebrada El Molino	184
Figura 113. Materiales en el fondo del cauce de la Quebrada El Molino	184
Figura 114. Vegetación en la quebrada La Chorrera o El Molino	185
Figura 115. Saltos y pozos en el cauce de la Quebrada La Chorrera o El Molino	185
Figura 116. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar	194
Figura 117. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa.....	200
Figura 118. Esquema de localización en planta de la sección analizada	210

Figura 119. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera	211
Figura 120. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)	213
Figura 121. Asignación de la amenaza por Inundación a partir de la Intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al. (1997 y Fiebigier (1997) en López y Courtel 2006)	214
Figura 122. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Chorrera o El Molino	220
Figura 123. Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno	223
Figura 124. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa.....	231
Figura 125. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables	235
Figura 126. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa	236
Figura 127. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo	237
Figura 128. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías	238
Figura 129. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973	239
Figura 130. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	241
Figura 131. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	244
Figura 132. Zonificación del Polígono La Cruz.....	247
Figura 133. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras.....	262
Figura 134. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales	270
Figura 135. Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	294
Figura 136. Esquema de localización en planta de los Perfiles analizados incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles.....	305

Figura 137. Análisis de estabilidad del Perfil 1 en condiciones naturales	306
Figura 138. Análisis de estabilidad del Perfil 1 implementando solución con reconfiguración	307
Figura 139. Análisis de estabilidad del Perfil 1 implementando solución con reconfiguración y una pantalla de pilas	307
Figura 140. Análisis de estabilidad del Perfil 2 en condiciones naturales	310
Figura 141. Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución con una pantalla de pilas	310
Figura 142. Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución con dos pantallas de pilas	311
Figura 143. Análisis de estabilidad del Perfil 3 en condiciones naturales	312
Figura 144. Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución con una pantalla de pilas	313
Figura 145. Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución con dos pantallas de pilas	313
Figura 146. Estructura general de la información entregada	329

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local	41
Tabla 2. Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles	53
Tabla 3. Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio	55
Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor	56
Tabla 5. Colores definidos para los procesos según año	59
Tabla 6. Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006	64
Tabla 7. Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas de campo	67
Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos levantados en campo	68
Tabla 9. Familias de discontinuidades en la estación MAD29-U-LC	69
Tabla 10. Familias de discontinuidades en la estación MAD34-U-LC	70
Tabla 11. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades	71
Tabla 12. Descripción de la continuidad de las discontinuidades	72
Tabla 13. Descripción de la abertura de las discontinuidades	73
Tabla 14. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas	79
Tabla 15. Resumen resultados análisis cinemático	82
Tabla 16. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas	85
Tabla 17. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas	87
Tabla 18. Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica	89
Tabla 19. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio	100
Tabla 20. Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	101
Tabla 21. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	103

Tabla 22. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás	106
Tabla 23. Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10	124
Tabla 24. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños.....	125
Tabla 25. Exploración geotécnica utilizada en la UMI La Cruz.....	128
Tabla 26. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI La Cruz	137
Tabla 27. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio.....	144
Tabla 28. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas	145
Tabla 29. Resumen de resultados de ensayos de corte directo CD	149
Tabla 30. Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales	156
Tabla 31. Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual	160
Tabla 32. Coordenadas del punto de salida del flujo en la cuenca.....	167
Tabla 33. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en La Cruz.....	167
Tabla 34. Usos del suelo en las cuencas de influencia en La Cruz	169
Tabla 35. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración	169
Tabla 36. Tiempos de concentración calculados para las cuencas.....	170
Tabla 37. Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)	170
Tabla 38. Intensidades de precipitación en mm/h para la cuenca	171
Tabla 39. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca	172
Tabla 40. Coordenadas para puntos de salida de cuencas consideradas en regionalización.....	177
Tabla 41. Resultados de regionalización de caudales máximos	179
Tabla 42. Resumen de caudales máximos para TR 2.33 Años.....	179
Tabla 43. Resumen de caudales máximos para TR 10 Años.....	179
Tabla 44. Resumen de caudales máximos para TR 50 Años.....	179
Tabla 45. Resumen de caudales máximos para TR 100 Años.....	180
Tabla 46. Resumen de caudales empleados en la modelación hidráulica.....	187
Tabla 47. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el tramo de estudio en la Quebrada La Chorrera o El Molino (Condiciones actuales).....	189

Tabla 48. Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad	201
Tabla 49. Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años	202
Tabla 50. Asignación de la calificación de la Probabilidad de Inundaciones	213
Tabla 51. Asignación de la calificación de la Intensidad de Inundaciones	213
Tabla 52. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el Polígono La Cruz	219
Tabla 53. Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales	222
Tabla 54. Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996)	232
Tabla 55. Factor por tipo de estructura	233
Tabla 56. Factor por altura de la estructura	233
Tabla 57. Factor de estado de la estructura	234
Tabla 58. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa	250
Tabla 59. Tipo de estructura – Movimiento en Masa	250
Tabla 60. Estado de la estructura – Movimiento en Masa	250
Tabla 61. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa	251
Tabla 62. Tipo de cubierta – Movimiento en Masa	251
Tabla 63. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa	258
Tabla 64. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa	263
Tabla 65. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono La Cruz	265
Tabla 66. Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales	268
Tabla 67. Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV	269
Tabla 68. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	271
Tabla 69. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	271
Tabla 70. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	271
Tabla 71. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales	272
Tabla 72. Registro fotográfico en el Polígono La Cruz	280

	<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 POLIGONO LA CRUZ</p>	
--	--	--

Tabla 73. Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total 288

Tabla 74. Categorización del riesgo total 288

Tabla 75. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono La Cruz 291

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles	6
Mapa 2. UMI asociada al Polígono La Cruz	8
Mapa 3. Usos generales del suelo urbano UMI La Cruz (POT, 2014).....	14
Mapa 4. Usos generales del suelo rural UMI La Cruz (POT, 2014).....	15
Mapa 5. Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006).....	17
Mapa 6. Geología local de la UMI La Cruz.....	22
Mapa 7. Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'	23
Mapa 8. Perfil estratigráfico C-C'	24
Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio	37
Mapa 10. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio	40
Mapa 11. Mapa de pendientes UMI La Cruz.....	42
Mapa 12. Unidades geomorfológicas de la UMI La Cruz.	44
Mapa 13. Procesos morfodinámicos UMI La Cruz	58
Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI La Cruz.....	65
Mapa 15. Criticidad geomorfológica UMI La Cruz	86
Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI La Cruz	88
Mapa 17. Criticidad morfodinámica UMI La Cruz.....	90
Mapa 18. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014).....	93
Mapa 19. Clasificación del suelo (POT, 2014)	94
Mapa 20. Aptitud Geológica - Geotécnica UMI La Cruz	95
Mapa 21. Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	113
Mapa 22. Localización de la exploración directa e indirecta.....	127
Mapa 23. Información cartográfica empleada en el estudio	159
Mapa 24. Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	161
Mapa 25. Red hídrica en la UMI La Cruz	165
Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre el Polígono La Cruz.....	166
Mapa 27. Usos del suelo en las cuencas de influencia sobre la UMI La Cruz Modificado del POT (2014).....	168

Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización	178
Mapa 29. Localización drenajes cercanos al Polígono La Cruz y mancha de inundación para los diferentes periodos de retorno Quebrada La Chorrera o El Molino	183
Mapa 30. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales para el Polígono La Cruz	190
Mapa 31. Análisis del factor de seguridad de la UMI La Cruz en condiciones estáticas	204
Mapa 32. Análisis del factor de seguridad de la UMI La Cruz en condiciones pseudo-estáticas con sismo de 0.25g	205
Mapa 33. Análisis de probabilidad falla de la UMI La Cruz en condiciones actuales y naturales	206
Mapa 34. Análisis de probabilidad de falla de la UMI La Cruz en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años	207
Mapa 35. Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI La Cruz en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g	208
Mapa 36. 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	209
Mapa 37. Amenaza por inundaciones en condiciones actuales en la Quebrada La Chorrera o EL Molino del Polígono La Cruz	216
Mapa 38. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz (Cv=0.3)	224
Mapa 39. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz (Cv=0.3)	225
Mapa 40. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales	226
Mapa 41. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	240
Mapa 42. Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono La Cruz	248
Mapa 43. Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono La Cruz	252
Mapa 44. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono La Cruz	253
Mapa 45. Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono La Cruz	254
Mapa 46. Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono La Cruz	255



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



Mapa 47. Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono La Cruz	256
Mapa 48. Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa.....	257
Mapa 49. Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono La Cruz .	259
Mapa 50. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono La Cruz.....	260
Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono La Cruz	261
Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono La Cruz.....	264
Mapa 53. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono La Cruz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	266
Mapa 54. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono La Cruz por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	267
Mapa 55. Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono La Cruz.....	273
Mapa 56. Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono La Cruz.....	274
Mapa 57. Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono La Cruz.....	275
Mapa 58. Localización espacial la densidad de la población en el Polígono La Cruz....	276
Mapa 59. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en condiciones actuales para el Polígono La Cruz	277
Mapa 60. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones para el Polígono La Cruz con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	278
Mapa 61. Análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales en el Polígono La Cruz para las Vías de Acceso y Equipamientos.....	279
Mapa 62. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono La Cruz.....	285
Mapa 63. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono La Cruz.....	286
Mapa 64. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa..	287
Mapa 65. Análisis de riesgo total de vivienda y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono La Cruz	290

Mapa 66. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para viviendas y construcciones	295
Mapa 67. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para viviendas y construcciones.....	296
Mapa 68. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para las vías de acceso y equipamientos	297
Mapa 69. 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	300
Mapa 70. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.....	301
Mapa 71. Áreas de riesgo no mitigable del Polígono la Cruz, según el POT (2014)	309
Mapa 72. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz	315
Mapa 73. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz	317
Mapa 74. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en la Quebrada La Chorrera o El Molino. Polígonos La Cruz	318
Mapa 75. Análisis de riesgo por inundaciones para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz.....	319
Mapa 76. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz (Cv=0.3).	320
Mapa 77. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz (Cv=0.3)	321
Mapa 78. Análisis de riesgo por torrencialidad para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz.....	322
Mapa 79. Retiro POT y retiro hidrológico por avenidas torrenciales para la Quebrada La Loca.....	323

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

LISTA DE MAPAS DEL ATLAS

- 01_LCHLocalizacionGeneral_Medellin_T
- 02_LCHLocalizacionUMI_Medellin_T
- 03_LCHGeologiaRegional_Medellin_T
- 04_LCHGeologiaLocalUMI_Medellin_T
- 05_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 06_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 07_LCHMacroUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 08_LCHUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 09_LCHPendientes_Medellin_T
- 10_LCHGeomorfologiaLocal_Medellin_T
- 11_LCHProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 12_LCHGeologiaEstructural_Medellin_T
- 13_LCHExploracion_Medellin_T
- 14_LCHClasificaciondelSuelo_Medellin_T
- 15_LCHCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T
- 16_LCHUsosdelSueloUrbano_Medellin_T
- 17_LCHUsosdelSueloRural_Medellin_T
- 18_LCHAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T
- 19_LCHAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T
- 20_LCHRedHidricaUMI_Medellin_T
- 21_LCHManchaInundaciones_Medellin_T
- 22_LCHManchaInundacionesCondProyecto_Medellin_T

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

- 23_LCHManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_T
- 24_LCHManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T
- 25_LCHAmenezalInundaciones_Medellin_T
- 26_LCHAmenezalInundacionesCondProyecto_Medellin_T
- 27_LCHAmenezaaAvenidasTorrenciales_Medellin_T
- 28_LCHAmenezaaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T
- 29_LCHTipodeEstructura_Medellin_T
- 30_LCHDesplantedeFundaciones_Medellin_T
- 31_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_T
- 32_LCHTipodeCubierta_Medellin_T
- 33_LCHAlturadelaConstrucción_Medellin_T
- 34_LCHMapadeResistencia_Medellin_T
- 35_LCHTipodeEstructura_Medellin_T
- 36_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_T
- 37_LCHAlturadelaConstrucción_Medellin_T
- 38_LCHDensidaddePoblacion_Medellin_T
- 39_LCHViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T
- 40_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 41_LCHVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 42_LCHVulnerabilidadFisica,InundacionesyAvenidasTorrenciales_Medellin_T
- 43_LCHRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 44_LCHRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 45_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T
- 46_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T

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

47_LCHRiesgoInundaciones_Medellin_T

48_LCHRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T

49_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_T

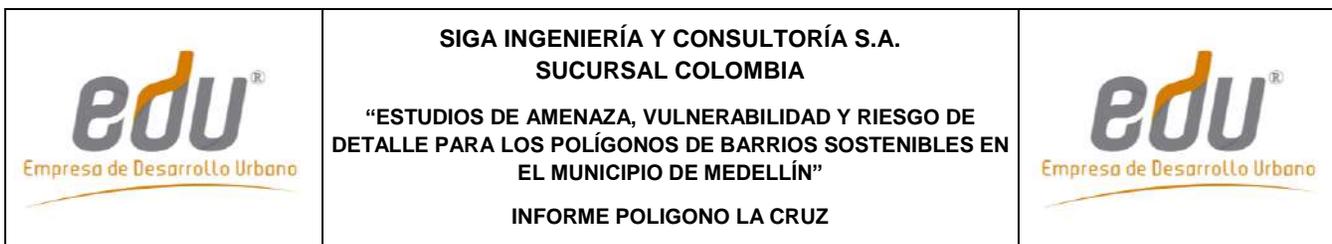
50_LCHRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T

51_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C

52_LCHVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_C

53_LCHRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C

54_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_C



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. Actas de instrumentación
- Anexo 09. Geodatabase

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 La Cruz. 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 La Cruz, 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 7 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 7 del informe, de tal manera que los de otras versiones no son válidos ni comparables con los acá presentados. Si se revisan en conjunto las entregas finales de los ocho polígonos estudiados, se puede ver incluso que hay una total coherencia en las metodologías de uno y otro sitio de estudio y que se han solucionado problemas de versiones anteriores tales como la excesiva importancia que sobre los mapas finales de riesgo de algunos polígonos tenían variables tales como la vulnerabilidad.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Los resultados del estudio se presentan en los 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 POLIGONO LA CRUZ</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.

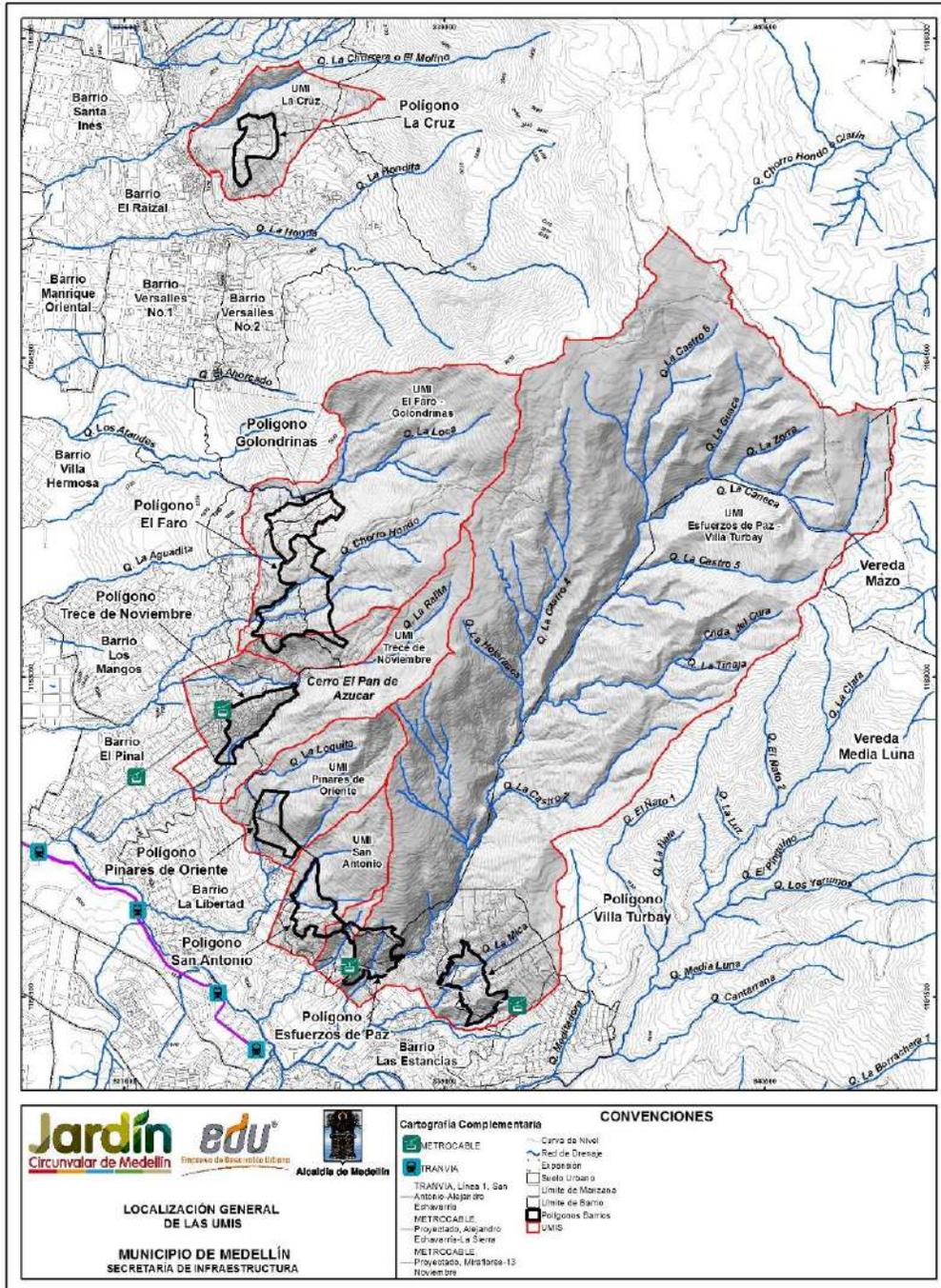
	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p style="text-align: center;">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p style="text-align: center;">INFORME POLIGONO LA CRUZ</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). El polígono localizado al interior de la Comuna 3 corresponde al Barrio La Cruz. 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.

En el Mapa 1 se presenta la localización general de todas las UMI definidas para cada uno de los polígonos de estudio. El Polígono La Cruz el cual es objeto principal de este estudio, tiene un área aproximada 4.16 hectáreas.

El Barrio La Cruz está ubicado en la Zona Nororiental del municipio de Medellín, Comuna 3 (Manrique) bajo el Cerro La Cruz. Los barrios aledaños son, al norte el Barrio Bello Oriente, al sur el Barrio La Honda, al occidente el Barrio El Raizal y al oriente la Vereda Piedras Blancas y Matasanos del Corregimiento de Santa Elena. El Barrio La Cruz se encuentra ubicado en la vertiente sur de la microcuenca de la Quebrada El Molino y la vertiente norte de la microcuenca de la Quebrada La Honda.



Mapa 1. Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles (01_LCHLocalizacionGeneral_Medellin_C y 01_LCHLocalizacionGeneral_Medellin_T)

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

3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE

3.1 GENERALIDADES

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

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

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

La unión de todas las UMI de la Comuna 8 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. La UMI del polígono ubicado al interior del Barrio La Cruz tiene un área aproximada de 29 hectáreas.

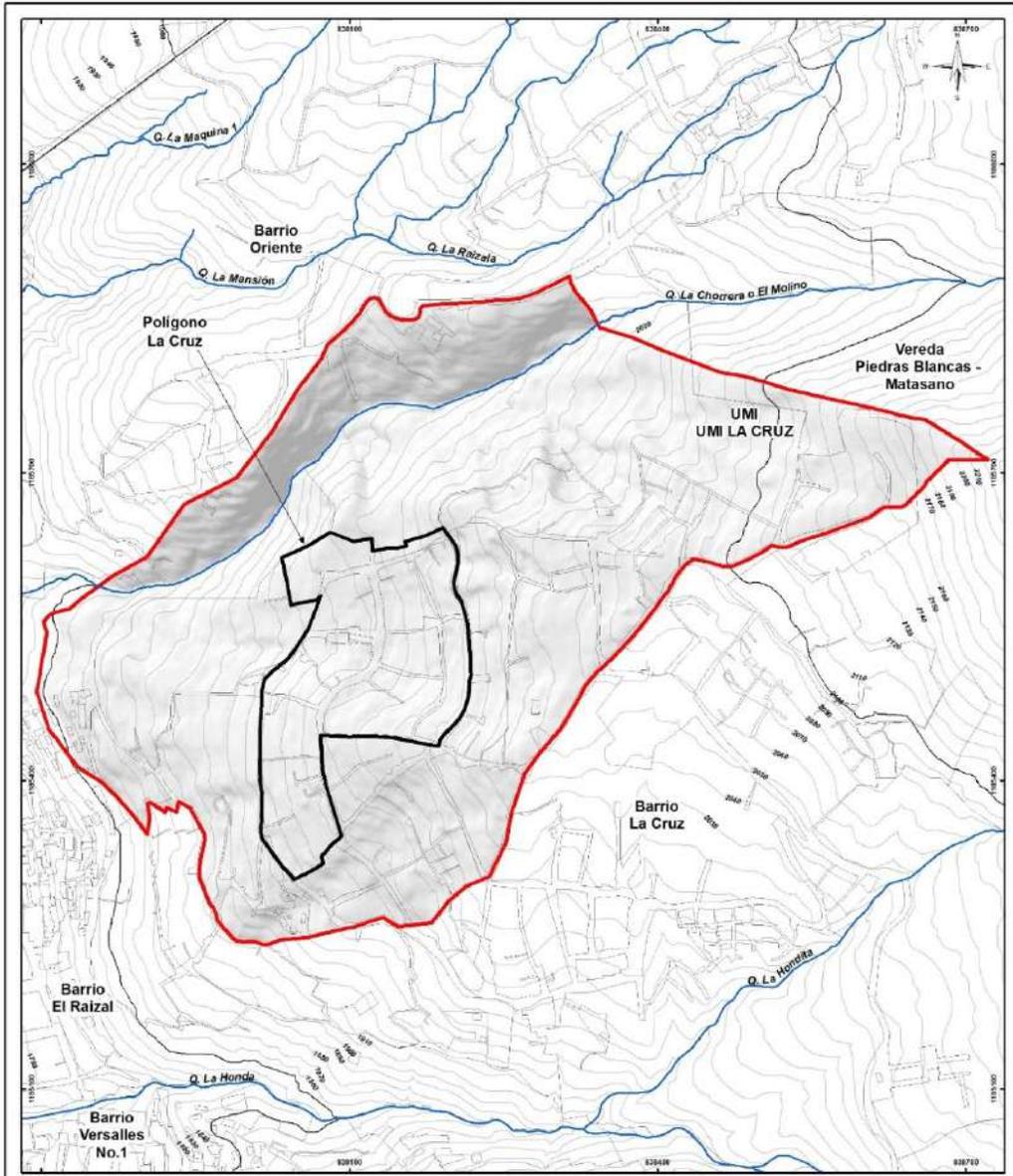
El Mapa 2 ilustra la UMI asociada al polígono de estudio en el Barrio La Cruz. De forma resumida, puede decirse que se incluyó el área en la que cualquier proceso de inestabilidad, potencial o existente, pudiera afectar las estructuras existentes y programadas, bien fuera porque las impactara directamente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



SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL
COLOMBIA

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

INFORME POLIGONO LA CRUZ



LOCALIZACIÓN
UMI LA CRUZ

MUNICIPIO DE MEDELLÍN
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

CONVENCIONES	
	Red de Drenaje
	Curva de Nivel
	Límite de Manzana
	Límite de Barrio
	Polígono La Cruz
	Límite UMI

Mapa 2. UMI asociada al Polígono La Cruz
(02_LCHLocalizacionUMI_Medellin_C y 02_LCHLocalizacionUMI_Medellin_T)

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

En el numeral siguiente, se hace referencia a la UMI correspondiente al polígono ubicado dentro del Barrio La Cruz, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI La Cruz o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono la Cruz, correspondiente al polígono en estudio dentro del barrio con este mismo nombre.

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

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

La UMI se localiza en el extremo centro oriental de la Comuna 3. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI está flanqueada al sur por la divisoria de aguas de las Quebradas La Honda y El Molino. Hacia el norte, el límite está definido por parte de la margen derecha de la Quebrada El Molino.

Dada la posición del Polígono La Cruz, el cual coincide con un lomo redondeado sobre la ladera, la elección de los límites de la UMI está orientada principalmente en la actividad y afectación de procesos de inestabilidad que puedan generarse en la parte alta y baja del polígono, y que por su direccionamiento pueden afectar el Polígono La Cruz. Así pues, la UMI La Cruz contiene cuatro límites que encierran las problemáticas morfodinámicas más relevantes de la zona y que podrían afectar directamente, por efectos de amenaza de movimientos en masa el Polígono La Cruz. Estos límites son, el límite suroriental, suroccidental, nororiental y noroccidental como se ilustra en la Figura 1.

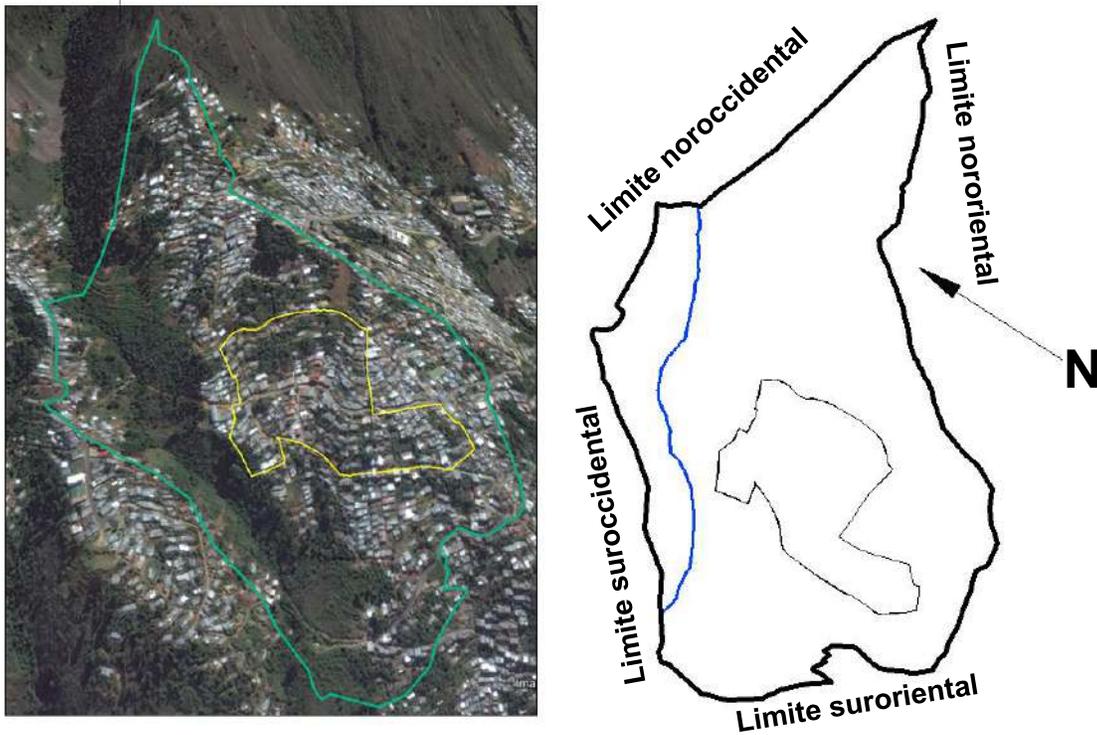


Figura 1. Definición de los límites de la UMI del polígono al interior del Barrio La Cruz (Sin Escala)

El límite nororiental define la parte más alta de la UMI y está seleccionado a partir de una geoforma que resalta en el terreno en especie de filo. Se consideró este límite como un trayecto estable del terreno donde se modifica el sentido de los procesos morfodinámicos que ocurren en la margen derecha de la Quebrada El Molino, de tal forma que todo proceso de inestabilidad que se podría generar en la parte alta de la UMI, no afectará la zona del Polígono La Cruz. En la Figura 2 se muestra la localización del límite nororiental de la UMI La Cruz, resaltándose la geoforma que ocasiona el direccionamiento de las vertientes.

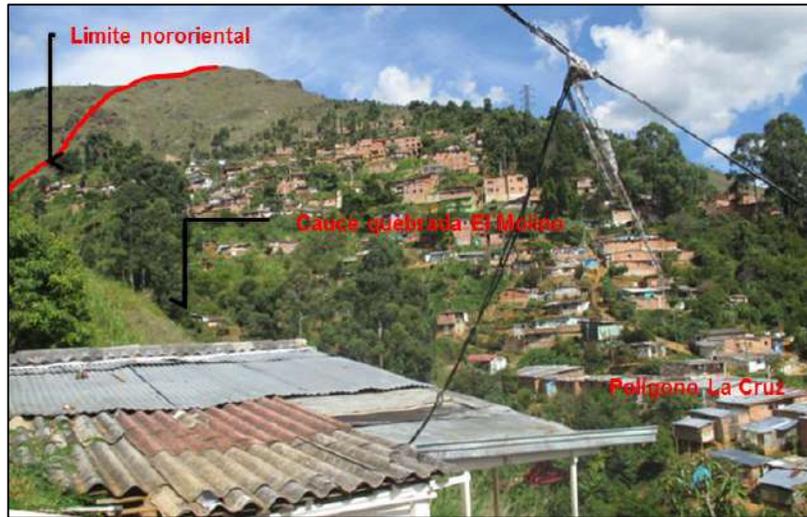


Figura 2. Esquema de localización del límite nororiental en la UMI La Cruz

El límite sur oriental, por su parte, desciende por la divisoria de aguas de las Quebradas El Molino y La Honda, cruzando la zona rural y urbana del sector, a través del límite físico de la Calle 79C. Esta última corresponde a una vía de aproximadamente 3.0 m de ancho, pavimentada en material de fresado, con condiciones regulares, más por el deterioro del material de rodadura que por la presencia de fenómenos morfodinámicos (Figura 3). El límite sigue descendiendo por la Carrera 24C (Figura 3), la cual es una vía de mayor amplitud, en pavimento flexible en buenas condiciones, para finalmente cortar por la Carrera 25 que es la vía principal de acceso a la zona y continuar por la divisoria de aguas. Todas estas vías por las cuales se delimitó el suroriente de la UMI, no presentan indicios de problemas de inestabilidad, por lo que se consideran aptas como límite para la UMI.



Carrera 24C



Calle 79C

Figura 3. Panorámica general de los límites físicos surorientales de la UMI La Cruz

El límite sur occidental continua considerando límites físicos de la zona, esta vez a través de la Carrera 27C encerrando todas aquellas zonas con evidencias de inestabilidad más cercanas al Polígono La Cruz y que podrían actuar como fenómenos de desconfinamiento de la zona inferior del mismo (Figura 4).



Figura 4. Esquema de localización del límite suroccidental en la UMI La Cruz

Finalmente, el límite noroccidental cierra la UMI La Cruz tomando en consideración un tramo de la margen derecha de la Quebrada El Molino limitado por las Calles 83 y 83B. A pesar de que esta margen de la quebrada no juega un papel fundamental en las condiciones de amenaza del Polígono La Cruz, debe ser considerado para efectos de las modelaciones proyectadas desde el punto de vista hidráulico en términos de inundaciones y avenidas torrenciales y se requiere de la caracterización del mismo por considerarse un cauce con caudal base y una dinámica hidráulica importante.

Se observa que las condiciones más relevantes en esta UMI son las que tienen que ver con la parte de procesos morfodinámicos. Se resalta que los límites escogidos se manifiestan estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales del Polígono La Cruz específicamente.

Desde el punto de vista de las pendientes, la UMI se caracteriza por tener laderas moderadas a muy altas con inclinaciones que van entre 15° a más de 30°. Las mayores pendientes se concentran sobre la margen izquierda de la Quebrada El Molino, justo debajo de la zona límite del Polígono La Cruz. Por esta razón, se consideró importante involucrar parte del drenaje de la Quebrada El Molino ya que su dinámica podría generar condiciones adversas en la parte baja de la margen amenazando el extremo norte del polígono que limita con este drenaje.

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

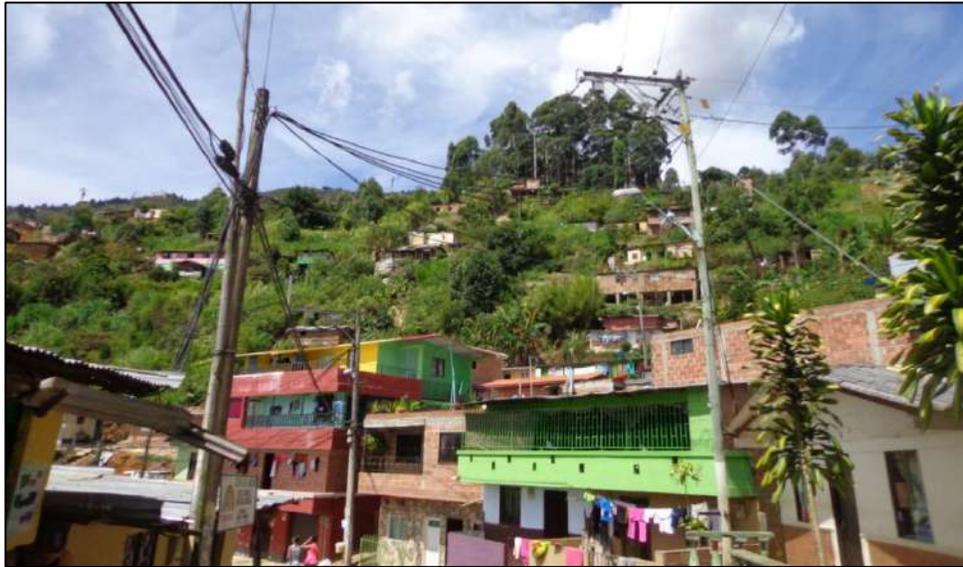


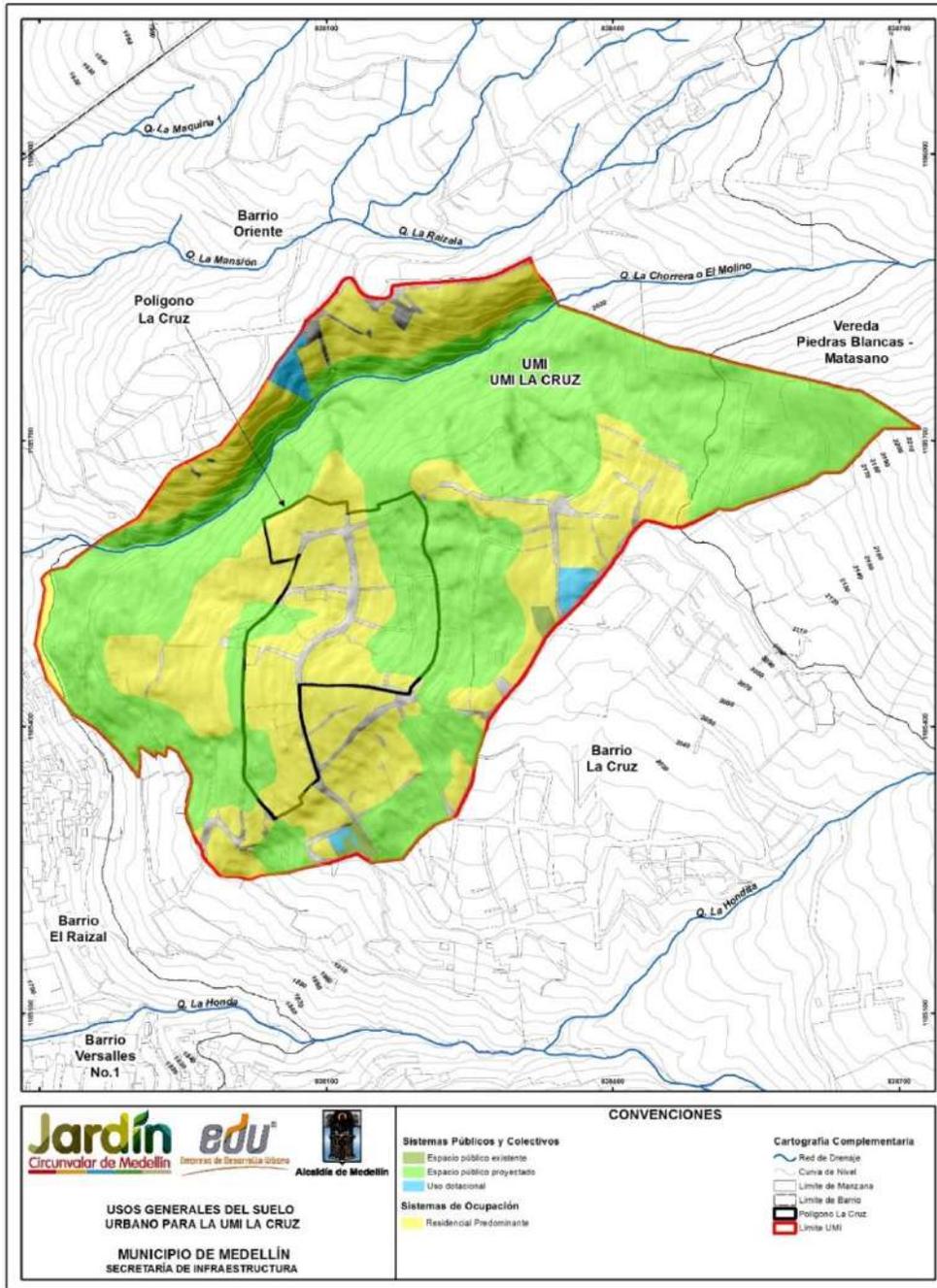
Figura 5. Panorámica general de pendientes parte alta UMI y Polígono La Cruz



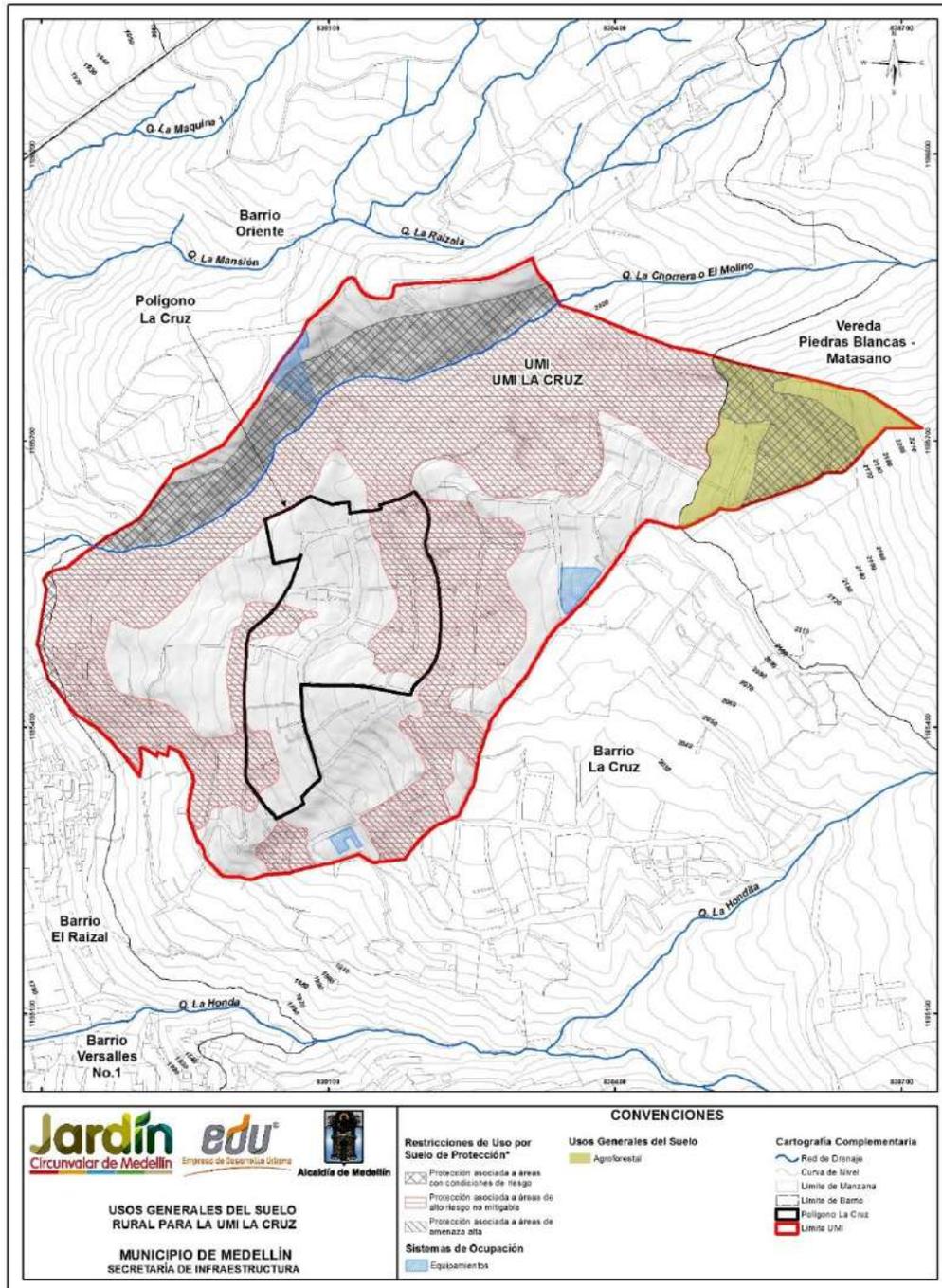
Figura 6. Panorámica general de pendientes parte baja UMI y Polígono La Cruz

Desde el punto de vista hidráulico, la incidencia de la Quebrada El Molino debe ser revisada a pesar de que este drenaje tenga una distancia considerable de la zona urbanizable.

Desde el punto de vista del uso del suelo, en la UMI se destaca un alto nivel de urbanismo residencial en la zona urbana (Mapa 3) como en la zona rural (Mapa 4). En estos mismos términos también se destaca la presencia de áreas de alto riesgo no mitigable y amenaza alta que involucran aproximadamente el 80% de la UMI. Hacia el cauce de la quebrada El Molino se destaca la presencia de zonas de inundación y los niveles coinciden con los límites establecidos para la UMI.



Mapa 3. Usos generales del suelo urbano UMI La Cruz (POT, 2014)
 (16_LCHUsosdelSueloUrbano_Medellin_C y 16_LCHUsosdelSueloUrbano_Medellin_T)



Mapa 4. Usos generales del suelo rural UMI La Cruz (POT, 2014)
 (17_LCHUsosdelSueloRural_Medellin_C y 17_LCHUsosdelSueloRural_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 La Cruz se ubica sobre las unidades geológicas denominada como Dunitas de Medellín (JKuM). 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.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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(Consortio 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 (Consortio 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 (Consortio 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 (Consortio 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(Consortio Microzonificación, 2006).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 las Dunitas de Medellín y del Stock de Las Estancias, principalmente.

4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)

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

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

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

4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)

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

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

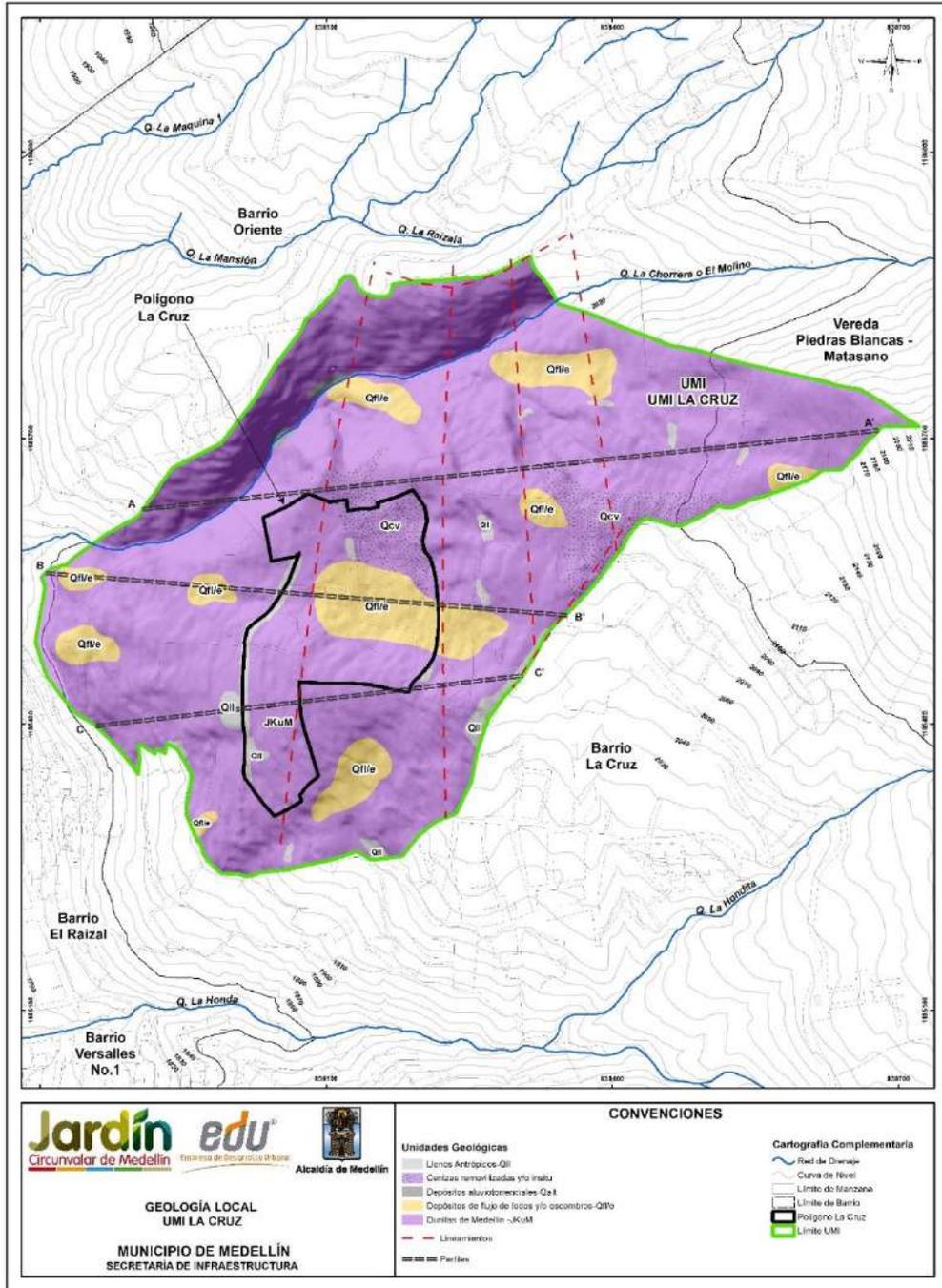
4.2 GEOLOGÍA LOCAL

Como base geológica para este estudio, se hizo una recopilación de información secundaria de estudios realizados por diferentes empresas en el área, tales como INTEINSA (2010) y DEACIVIL (2014). En el Numeral 10.1.1 se presenta la localización de las perforaciones de dichos estudios, las cuales fueron consultadas para la elaboración del modelo geológico y fueron clasificadas en “Perforaciones Estudios Anteriores Utilizadas” y “Perforaciones Estudios Anteriores No Utilizadas” (Mapa 22).

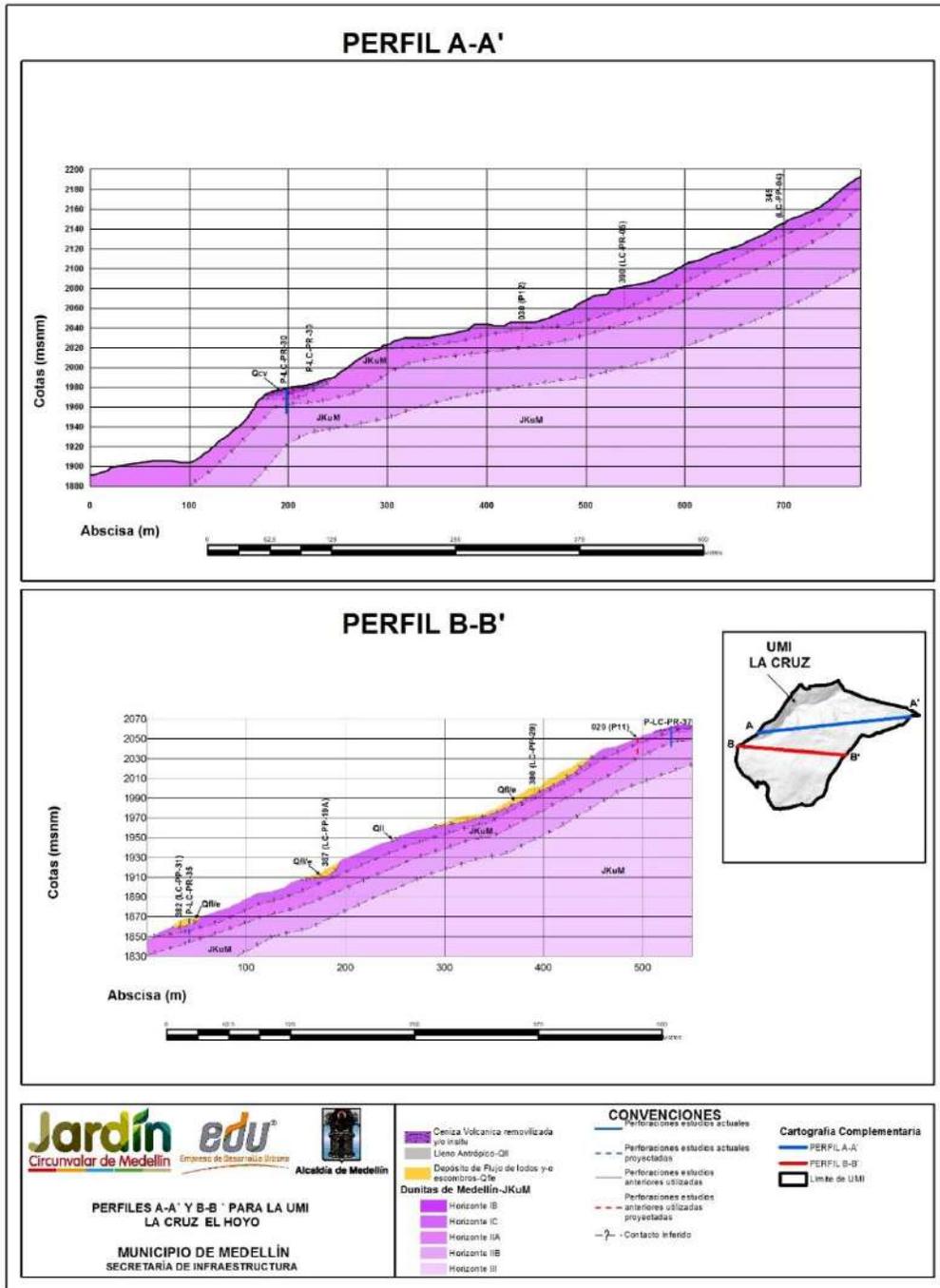
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO LA CRUZ</p>	
---	--	---

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 La Cruz mostrado en el Mapa 6. Las unidades geológicas encontradas en la UMI La Cruz corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), suprayacidos por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), cenizas volcánicas (Qcv) y llenos antrópicos. En el Mapa 7 y en el Mapa 8 se muestran los perfiles geológicos definidos para esta UMI.

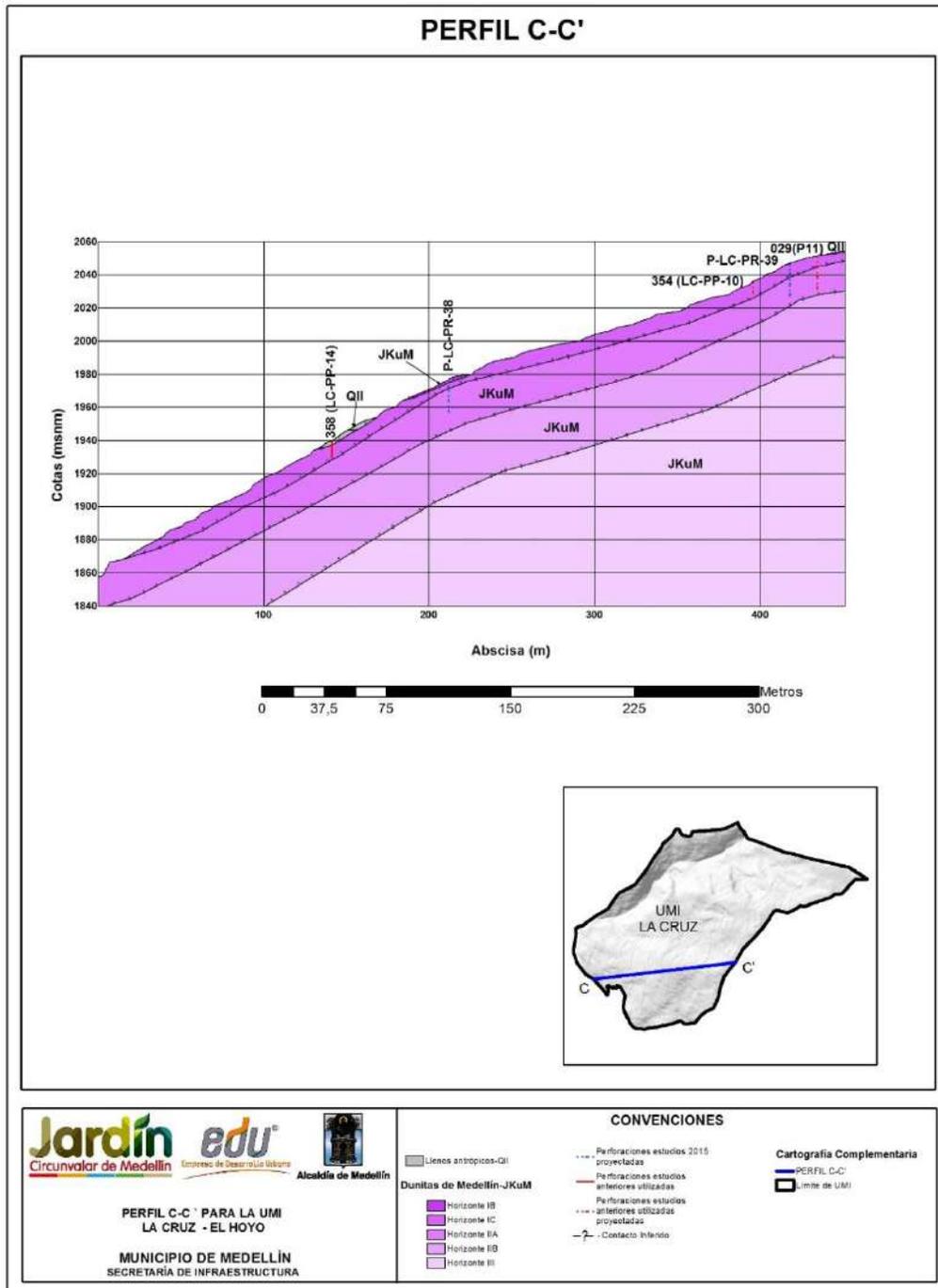
El Mapa 7 muestra el Perfil Geológico B-B' que atraviesa el Polígono La Cruz y una parte de la UMI. En este perfil se observan los depósitos de flujos de lodos y/o escombros sobre el Horizonte IC de las Dunitas de Medellín, y los Horizontes IIA, IIB y III, como también algunos llenos antrópicos.



Mapa 6. Geología local de la UMI La Cruz
(04_LCHGeologiaLocalUMI_Medellin_C y 04_LCHGeologiaLocalUMI_Medellin_T)



Mapa 7. Perfiles estratigráficos A-A' y B-B'
 (05_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_C y 05_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_T)



Mapa 8. Perfil estratigráfico C-C'
(06_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_C y 06_LCHPerfilesGeologicos_Medellin_T)

A continuación se describen las unidades geológicas mencionadas anteriormente, comenzando por la más reciente (Llenos antrópicos) hasta la más antigua (Dunitas de Medellín).

4.2.1 Llenos antrópicos (QII)

En la UMI La Cruz se encuentran cuerpos distribuidos aleatoriamente en toda la UMI a manera de parches. Se asocian principalmente con la construcción de viviendas, vías y caminos. En superficie abarcan longitudes entre 5 m y 24 m, estando los de mayor longitud asociados a las vías. En cuanto al espesor, varían entre 1.5 m y 4.5 m.

Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-LC-PR-40, P-LC-PR-39, 357 (LC-PP-13), 354 (LC-PP-10) suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizaron líneas geofísicas, la Línea Geofísica P-LC-LG-03 y la Línea Geofísica L3 del Proyecto Barrios Sostenibles realizada por Bioexplora (2015), como apoyo para delimitar algunos cuerpos, y las Estaciones de Campo MAD02-U-LC, MAD04-U-LC, MAD16-U-LC, MAD35-U-LC, MAD41-U-LC, MAD48-U-LC, AMD04-U-LC, AMD08-U-LC, AMD18-U-LC, AMD23-U-LC y AMD27-U-LC.

El lleno encontrado en la Perforación P-LC-PR-39 tiene 2.5 m de espesor, formado por material limo arenoso de color pardo rojizo a pardo naranja, húmedo, de consistencia blanda y tenacidad alta, con fragmentos de neis subredondeados, moderadamente meteorizados, de tamaños entre 5 mm y 2.5 cm, contiene escombros como ladrillos (Figura 7).

El lleno caracterizado en la Perforación P-LC-PR-40, se encuentra en el extremo sur de la UMI (hacia la parte inferior de la UMI). Está formado por material limo arenoso de color café con naranja, rojo y gris, húmedo, de consistencia firme y tenacidad media.



Figura 7. Lleno antrópico encontrado en la Perforación P-LC-PR-39

Otros llenos como el encontrado en la Estación de Campo AMD04-U-LC se asocian a caminos y construcciones de viviendas. Este lleno tiene entre 1 m y 2 m de espesor, formado por material limoso de color pardo, con zonas donde predomina la matriz y otras de acumulación de fragmentos de roca (Figura 8).

En la parte inferior del polígono se encuentra un lleno que va a lo largo de una vía que atraviesa el sector, con un espesor variable entre 1 m y 4 m aproximadamente. El resultado de la Línea Geofísica P-LC-LG-03 reporta una primera capa de 3.9 m de espesor (capa superficial) con velocidad de onda de corte de 145 m/s, pudiéndose asociar este tipo de material al lleno de la vía. Además, en esta zona se encuentra la Línea Geofísica L3, realizada por Bioexplora para el Proyecto Barrios Sostenibles, que muestra una capa de 2.5 m de espesor con una velocidad de onda de corte 141 m/s que se asocia al lleno.

En esta UMI es frecuente encontrar llenos conformados por bloques de rocas configurando bases para las viviendas con alturas entre 1 m y 3 m, tal como se muestra en la Figura 9.



Figura 8. Lleno antrópico encontrado en la Estación de Campo AMD04-U-LC



Figura 9. Llenos con bloque de rocas como base para viviendas

4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv)

En la UMI La Cruz se presentan superficialmente capas discontinuas de cenizas volcánicas, que cubren el suelo de las Dunitas de Medellín. Por lo general, se encuentran in-situ, o algunas veces mezcladas con materia orgánica o suelo residual de dunita, con evidencia de haber sido removilizadas. Cabe resaltar que en la zona del proyecto, las capas de cenizas volcánicas se encuentran de forma discontinua (a manera de parches) y no siempre son cartografiables a la escala de este estudio.

En la parte alta de la UMI se encuentran en la unidad geomorfológica denominada como superficies de baja incisión. Fue caracterizada en las Estaciones de Campo AMD01-U-LC, AMD06-U-LC y en la Perforación 030 (P12), con espesor variable de 0.7 m a 2 m. Se trata de material limoso de color amarillo pardo, seco, de consistencia dura y tenacidad media, que se deshace fácilmente y en algunas partes (Estación de Campo AMD01-U-LC) se encuentra mezclado con suelo de dunita (Figura 10).



Estación AMD06-U-CL



Estación AMD01-U-LC

Figura 10. Ceniza volcánica en parte alta de la UMI La Cruz

En la parte superior del polígono, en el extremo norte, se encuentra una capa de ceniza volcánica, caracterizada en la Estación de Campo MAD08-U-LC y en la Perforación P-LC-PR-36, con un espesor de 3 m (Figura 11).

4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)

Ubicados en el extremo norte de la UMI, en las márgenes de la Quebrada El Molino, con una extensión de 9 m a 50 m y un espesor aproximado de 50 m, encontrados en las Estaciones de Campo MAD28-U-LC y MAD50-U-LC.

Presentan relación matriz/fragmentos 40/60, formado por una matriz arenolimsa de color café, húmeda, con fragmentos de dunita, frescos a moderadamente meteorizados, subangulares, con tamaños menores a 2 m (Figura 12).



Figura 11. Ceniza volcánica encontrada en la Perforación P-LC-PR-36



Figura 12. Depósito aluviotorrencial en la Quebrada El Molino

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

Se encuentran varios cuerpos distribuidos en toda la UMI, desde la parte inferior hasta la superior, con el cuerpo de mayor extensión en la parte central. Presentan extensiones de 20 m a 208 m y espesores variables entre 2 m y 10 m, con variaciones en la relación matriz/fragmentos.

Fueron identificados en las Perforaciones P-LC-PR-35, 352 (LC-PP-08), 345 (LC-PP-04), 380 (LC-PP-29), 371 (LC-PP-22A), 367 (LC-PP-19A) y 383 (LC-PP-31A), y en las Estaciones de Campo MAD39-U-LC, MAD40-U-LC, AMD15-U-LC, AMD21-U-LC, MAD05-U-LC, MAD06-U-LC, MAD07-U-LC y MAD49-U-LC. Además, se utilizaron líneas geofísicas para delimitar algunos cuerpos.

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

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

En la parte central de la UMI, abarcando la parte superior del polígono, se encuentra el depósito caracterizado en las Estaciones de Campo AMD21-U-LC, MAD05-U-LC, MAD06-U-LC y MAD07-U-LC, en la Perforación 380 (LC-PP-29) y la Línea Geofísica

P-LC-LG-02, la cual presenta una capa de 4 m de espesor con una velocidad de 150 m/s. Suprayace el Horizonte IC del perfil de meteorización de las Dunitas de Medellín. Tiene un espesor variable entre 2 m y 6 m, y la relación matriz/fragmentos varía de 80/20 a 60/40, la matriz es limosa con variaciones a limo arenosa y arcillosa, de color naranja a pardo amarillo, húmeda, de consistencia blanda a firme y tenacidad baja. Los fragmentos son subredondeados y subangulares, de dunitas ligeramente meteorizados, con tamaños de 10 cm a 40 cm (Figura 13).



Figura 13. Depósito de flujo de lodos y escombros ubicado en la parte central de la UMI La Cruz

Hacia el extremo norte de la UMI, en la vertiente izquierda de la Quebrada El Molino, se encuentran dos depósitos de flujo de lodos y/o escombros, con forma irregular alargada, identificados en las Estaciones de Campo MAD39-U-LC, MAD40-U-LC, AMD15-U-LC y MAD27-U-LC. Tienen espesores variables entre 2 m y 7 m y relación matriz/fragmentos de 70/30, la matriz es limosa a limo arenosa de color pardo a naranja, se encuentra húmeda, presenta consistencia firme y tenacidad baja. Los fragmentos son subangulares, de dunitas ligeramente meteorizados menores que 30 cm.

El depósito caracterizado en la Perforación P-LC-PR-35, se encuentra en la parte inferior de la UMI, con un espesor de 2 m. Se trata de un depósito matriz soportado con trazas de fragmentos de dunitas menores que 2 cm, la matriz es limosa de color naranja, húmedo, de consistencia muy blanda y tenacidad alta.



Figura 14. Depósito encontrado en la Perforación P-LC-PR-35

En la parte inferior se encuentran también los depósitos identificados en las Perforaciones 371 (LC-PP-22A), 367 (LC-PP-19A) y 383 (LC-PP-31A), con formas ovaladas y espesores entre 2.0 m y 6.5 m. Finalmente, en la parte superior se encuentra el cuerpo identificado en la Perforación 345 (LC-PP-04) con un espesor de 6.0 m.

4.2.5 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad fue identificada en la zona de estudio, mediante los recorridos de campo y la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC, IIA y IIB según la clasificación de Deere y Patton (1971). Halladas en las Perforaciones P-LC-PR-34, P-LC-PR-35, P-LC-PR-36, P-LC-PR-37, P-LC-PR-38, P-LC-PR-39, P-LC-PR-40, 027 (P9), 028 (P10), 029 (P11) y 030 (P12), entre otras realizadas para estudios anteriores. También en las Líneas Geofísicas P-LC-LG-01, P-LC-LG-02, P-LC-LG-03 y U-LC-LG-15.

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 15).



Figura 15. Evidencias de dunita cizallada en la zona de estudio

Los Horizontes IB y IC se encuentran en la mayor parte de la UMI y en todo el Polígono La Cruz. El Horizonte IB fue identificado en las perforaciones P-LC-PR-36, P-LC-PR-37 y P-LC-PR-38, 390 (P-LC-PR-05), 358 (LC-PP-14), 394 (LC-PR-09), en las Estaciones de Campo AMD01-U-LC, AMD10-U-LC, AMD11-U-LC, AMD25-U-LC, AMD24-U-LC, y en las Líneas Geofísicas P-LC-LG-01 y U-LC-LG-15. Este material presenta espesores entre 3 m y 6 m, se trata de un suelo limoso, de color pardo naranja a rojizo, húmedo, de consistencia firme a dura y tenacidad alta a baja, contiene nódulos de hierro de tamaños milimétricos (Figura 16).



Figura 16. Horizonte IB en la Estación de Campo AMD24-U-LC y en la Perforación P-LC-PR-36

El Horizonte IC se encontró en las Perforaciones P-LC-PR-35, P-LC-PR-36, P-LC-PR-37, P-LC-PR-38, P-LC-PR-39, P-LC-PR-40, 027 (P9), 028 (P10), 029 (P11) y 030 (P12), en las Líneas Geofísicas P-LC-LG-01, P-LC-LG-02, P-LC-LG-03 y U-LC-LG-15 con velocidades de onda entre 433 m/s y 560 m/s, y en los recorridos de campo. Se trata del horizonte de meteorización de una brecha, que conserva la estructura heredada como venas, bandas y fragmentos angulares dentro de una matriz, el espesor varía de 3 m a 7 m. El suelo es limoso, con variaciones en el color de naranja, parado a rojizo, con zonas arcillosas de color verde, de tacto jabonoso (Figura 17). Generalmente se encuentra húmedo, con algunas zonas saturadas, presenta consistencia blanda y tenacidad alta.



Figura 17. Horizonte IC de las Dunitas de Medellín

El Horizonte IIA aflora hacia la parte norte e inferior de la UMI, especialmente en las vertientes y cauce de la Quebrada El Molino, en el resto de la zona infrayace el Horizonte IC del perfil de meteorización. Fue encontrado en las Perforaciones P-LC-PR-35, P-LC-PR-36, P-LC-PR-37, P-LC-PR-38, P-LC-PR-39, P-LC-PR-40, 027 (P9), 028 (P10), 029 (P11) y 030 (P12), con espesores entre 5 y 20 m, y en las Estaciones de Campo MAD10-U-LC, MAD22-U-LC, MAD29-U-LC, MAD30-U-LC, entre otras. En las líneas geofísicas presenta velocidades entre 560 m/s y 760 m/s. Consiste en bloques de dunita con longitudes entre 10 cm y 1 m en promedio, con una relación suelo/roca que varía entre 40/70 y 10/90. La roca se encuentra moderadamente meteorizada a meteorizada, altamente fracturada y diaclasada (Figura 18) presenta alteraciones a serpentina y talco, con pátinas de oxidación negras y pardas. Se observan igualmente espejos de falla y zonas de cizalla, fracturas rellenas de arcilla y tramos con arcilla de falla (Figura 19). El suelo es limo arcilloso, de color pardo anaranjado con manchas verdes, húmedo y con tenacidad media.



Figura 18. Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín



Figura 19. Arcilla de falla en la Perforación P-LC-PR-35

El Horizonte IIB fue identificado en las Perforaciones P-LC-PR-35, P-LC-PR-36, P-LC-PR-37 y P-LC-PR-38, cuyo espesor no pudo ser determinado pues no se alcanzó el límite inferior del horizonte en las perforaciones. Corresponde a una brecha, se encuentra moderada a ligeramente meteorizada, altamente fracturada, con pátinas de oxidación negras y pardas. Presenta espejos de falla y zonas de cizalla y fracturas rellenas de arcilla, así como alteraciones a serpentina y talco, similares a la roca del Horizonte IIA (Figura 20).



Perforación P-LC-PR-36



Perforación P-LC-PR-38

Figura 20. Horizonte IIB de las Dunitas de 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 POLIGONO LA CRUZ</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.

A continuación se presenta la descripción de todas las macrounidades correspondientes a toda la zona de estudio del Proyecto Barrios Sostenibles. La UMI La Cruz se ubica sobre la macrounidad denominada como Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA).

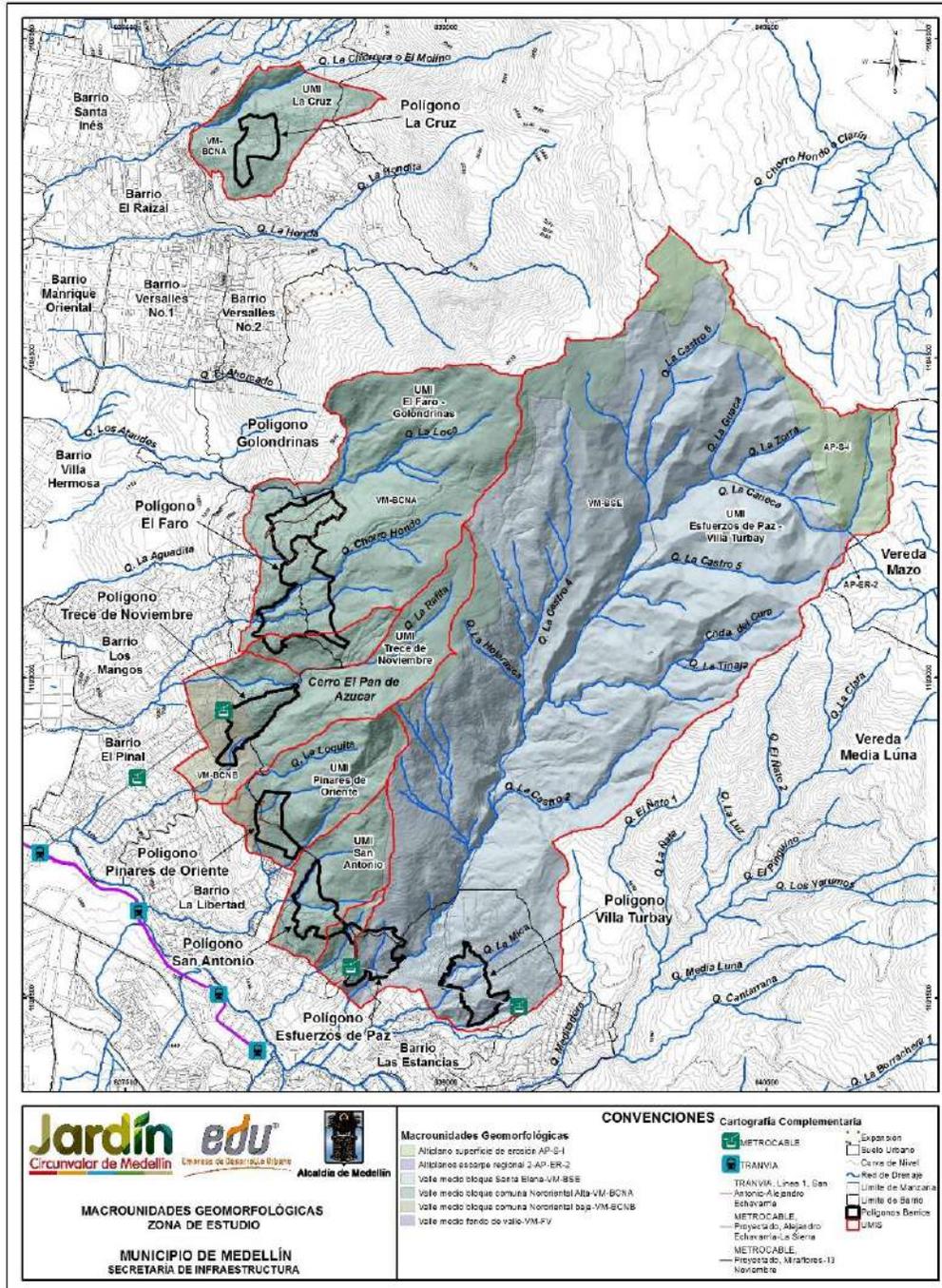
- ✓ Superficie de erosión S-I (AP-S-I), ubicada a altura del corregimiento de Santa Elena hacia el oriente de Medellín. Se encuentran entre alturas de 2500 msnm y 2600 msnm y se caracterizan por ser superficies con baja incisión pertenecientes al altiplano mencionado anteriormente en medio de sistemas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

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

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

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

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



Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio (07_LCHMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y 07_LCHMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)

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

5.1.2 Unidades Geomorfológicas

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

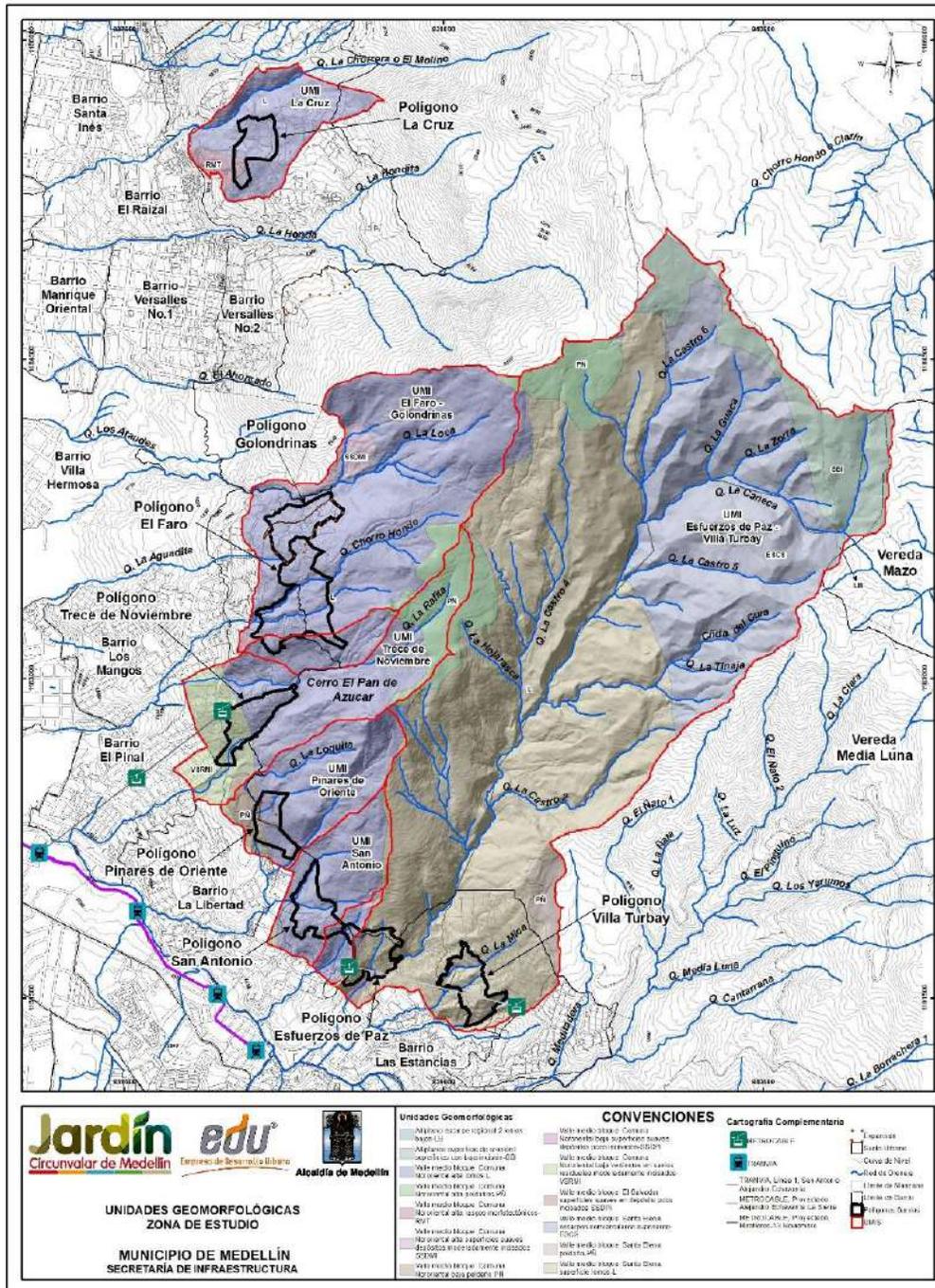
La UMI La Cruz se ubica sobre la Unidad de Lomos (L), Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados (SSDMI) y Peldaños (PÑ). A continuación se presenta la descripción de todas las unidades geomorfológicas y se menciona la macrounidad donde se encuentran.

- ✓ Unidad de lomos bajos (LB), la cual se encuentra en la macrounidad denominada Altiplano Escarpe Regional 2. Son lomos alargados sin ninguna orientación y con bajo grado de disección.
- ✓ Unidad de superficies con baja incisión (SBI), la cual se encuentra en la macrounidad denominada como Altiplanos Superficie de Erosión I y corresponde a geoformas de lomos alargados localizadas cerca de zonas escarpadas.
- ✓ Unidad de lomos (L), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y Valle Medio Bloque Santa Elena. Se caracterizan por estar orientados hacia el eje fluvial principal, corresponden a filos alargados y estrechos.
- ✓ Unidad de Peldaños (PÑ): la cual se encuentra en las macrounidades: Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta, Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja, y Valle Medio Bloque Santa Elena. Corresponden a superficies de baja inclinación de gran continuidad.
- ✓ Unidad de rasgos morfotectónicos (RMT), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y corresponden a geoformas asociadas estructuralmente a lineamientos, fallas y contactos entre unidades geológicas.
- ✓ Unidad de superficies suaves depósitos moderadamente incisados (SSDMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta. Se desarrolla sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponde a zonas continuas de baja inclinación e incisión moderada.
- ✓ Unidad de superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas como Valle Medio Bloque El Salvador y Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja. Se desarrollan sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponden a zonas continuas de baja inclinación y poca incisión.

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

- ✓ 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 estas unidades geomorfológicas que acaban de ser descritas se muestra en el Mapa 10.



Mapa 10. Unidades geomorfológicas de la zona de estudio
(08_LCHUnidadesGeomorfológicas_Medellin_C y
08_LCHUnidadesGeomorfológicas_Medellin_T)

5.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En este capítulo se realiza el análisis para la definición de las unidades geomorfológicas de la UMI La Cruz, 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.

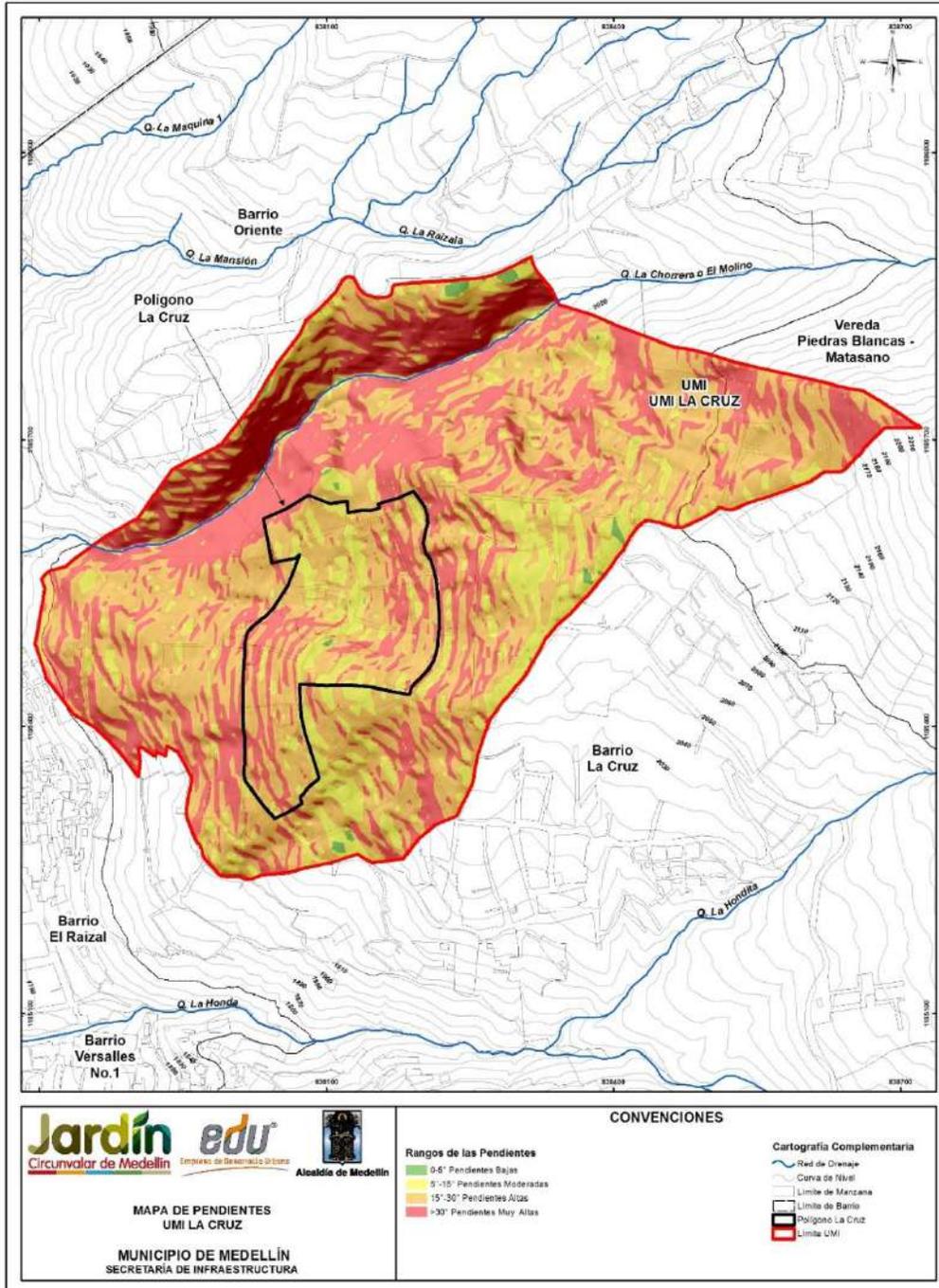
Tabla 1. Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local

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.

La UMI La Cruz presenta una disposición morfológica con un frente de pendiente de moderada a muy alta-escarpada, y está limitado por quebradas con cauces escarpados, así los rangos de pendientes más abundante son los moderados, correspondientes a la parte alta del barrio La Cruz, principalmente.

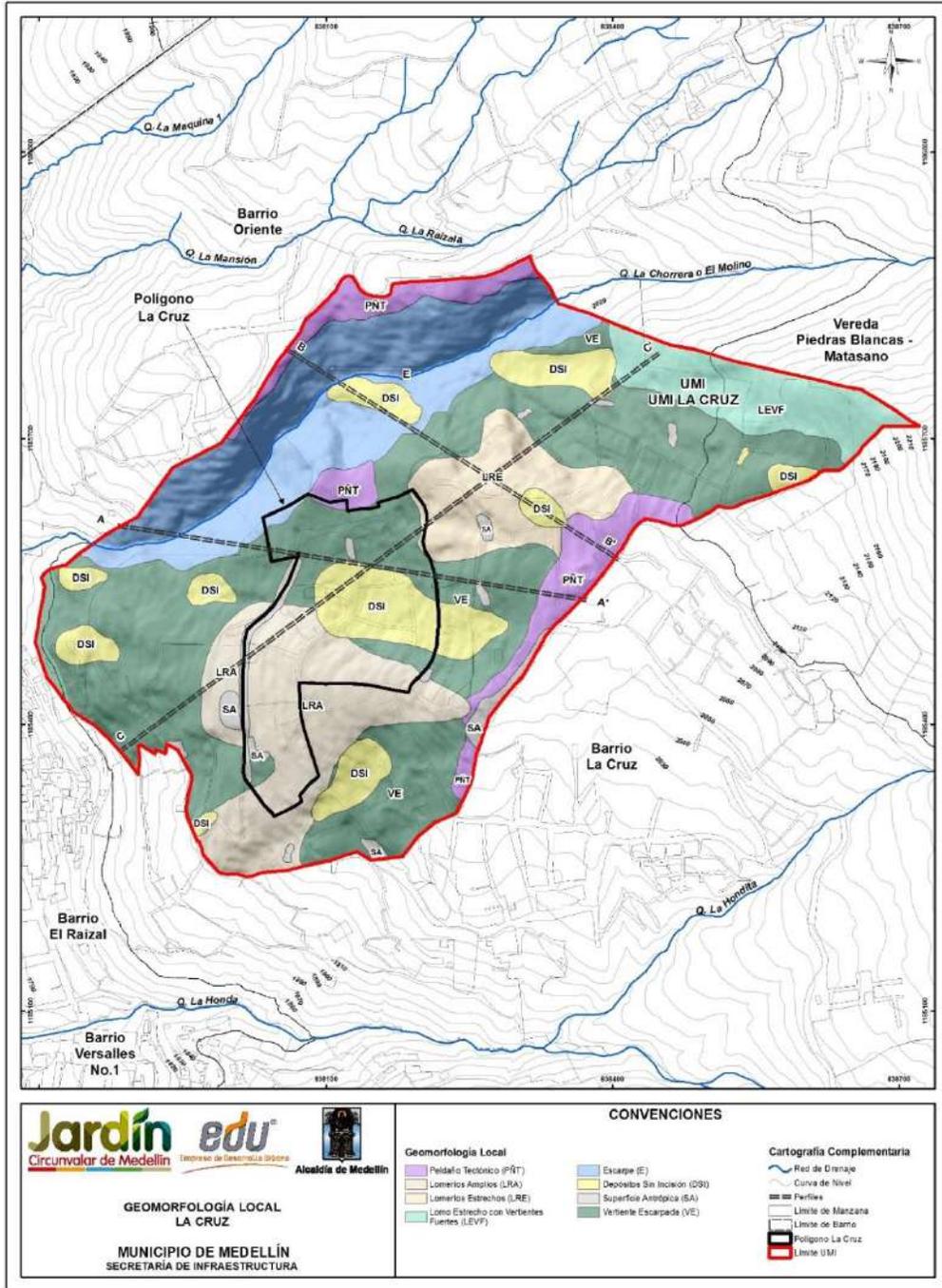


Mapa 11. Mapa de pendientes UMI La Cruz
(09_LCHPendientes_Medellin_C y 09_LCHPendientes_Medellin_T)

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

Posteriormente, teniendo en cuenta el análisis del mapa de pendientes, los recorridos de campo, la geología local y la actividad morfodinámica de la zona de estudio, se lograron definir ocho unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los Numerales 5.2.1 al 5.2.8 de este capítulo.

En el Mapa 12 se presentan las unidades geomorfológicas de la UMI La Cruz, incluye planta con cada una de las unidades geomorfológicas, así como se muestran los perfiles esquemáticos de las unidades más sobresalientes de la Figura 21 a la Figura 23.



Mapa 12. Unidades geomorfológicas de la UMI La Cruz.
(10_LCHGeomorfologiaLocal_Medellin_C y 10_LCHGeomorfologiaLocal_Medellin_T)

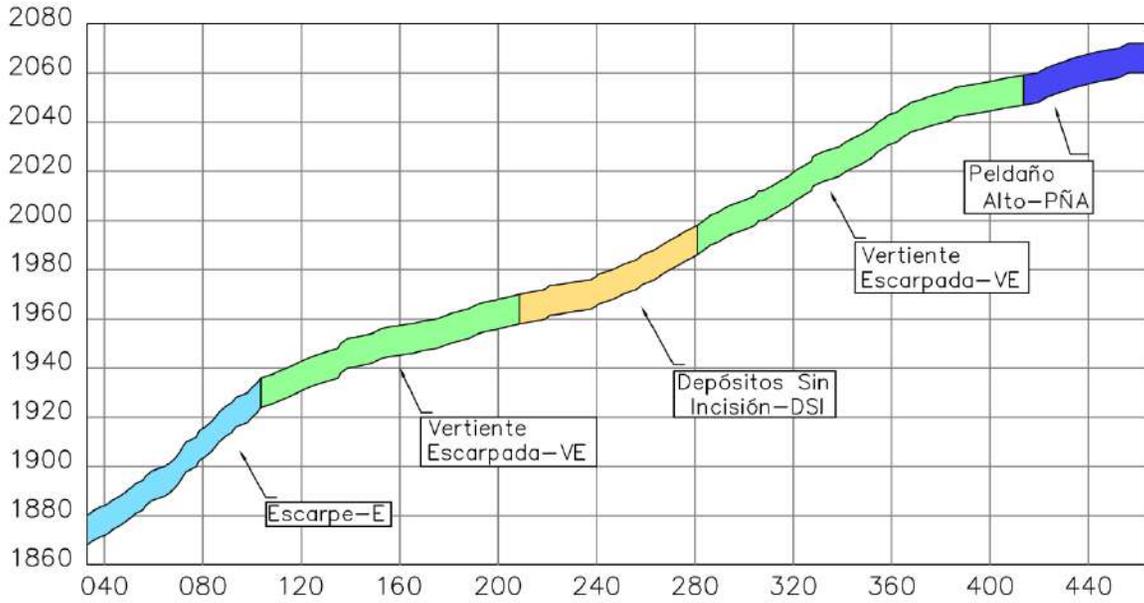


Figura 21. Perfil geomorfológico A-A' (A2)

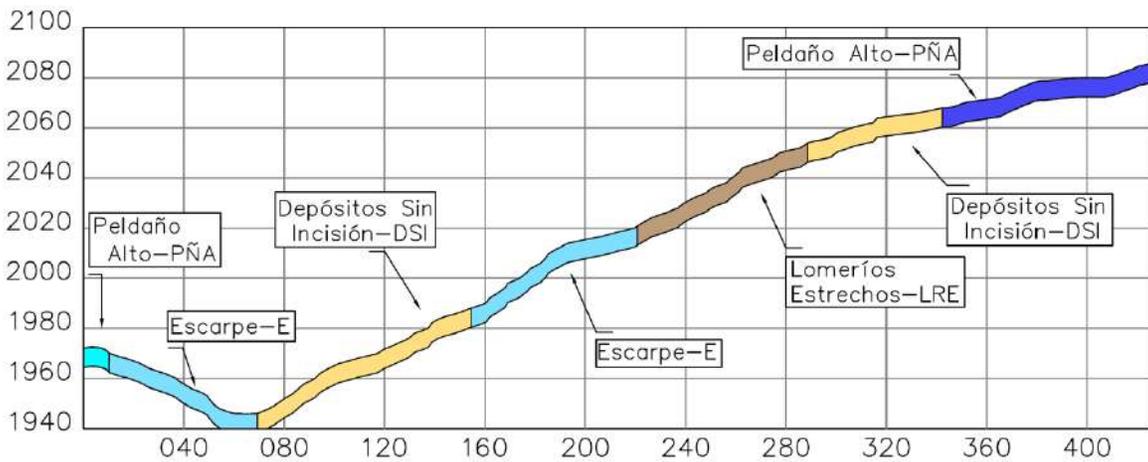


Figura 22. Perfil geomorfológico B-B' (A4)

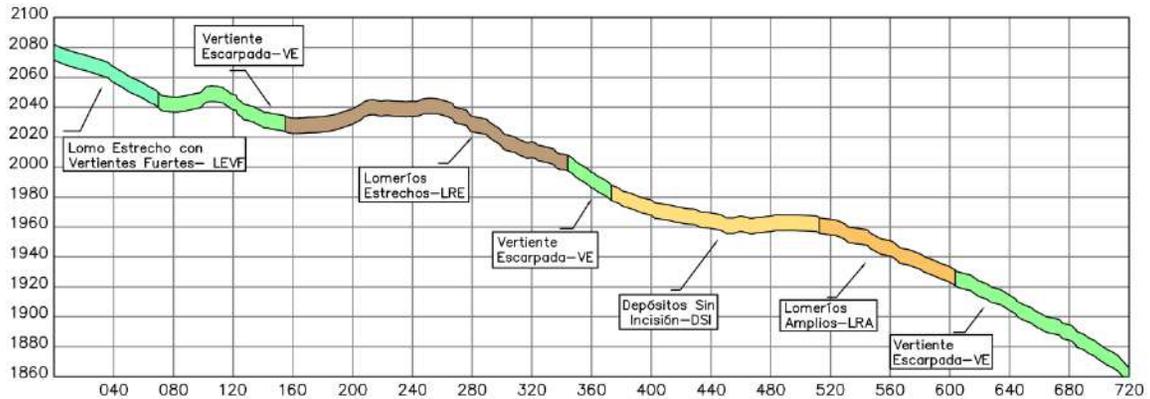


Figura 23. Perfil geomorfológico C-C' (A6)

5.2.1 Unidad de Lomeríos Amplios LRA

Se localiza hacia el sur de la UMI, conformando cerca del 40% del polígono La Cruz. Limita en la parte superior por la unidad de Peldaño Alto-PÑA, en la parte inferior por Vertientes Escarpadas-VE y Escarpes-E. Se caracteriza por presentar topes suaves con pendientes menores de 15°, laderas cortas e irregulares con pendientes moderadas entre 15°-30°. Presenta cicatrices de deslizamiento hacia el centro de la UMI. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín y superficies antrópicas en su parte media (Figura 24).

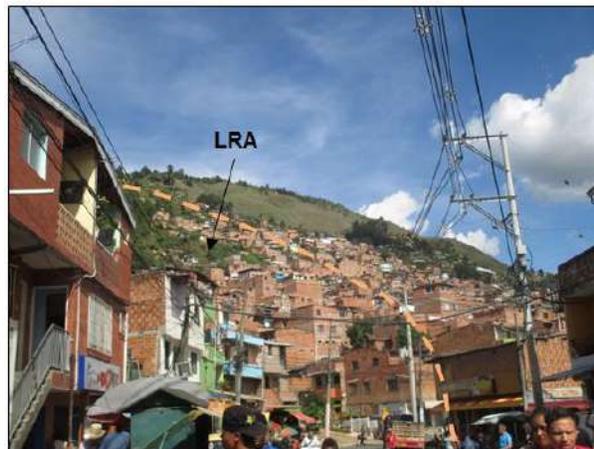


Figura 24. Lomeríos Amplios LRA

5.2.2 Unidad de Lomeríos Estrechos LRE

Se localiza hacia el norte de la UMI. Limita en la parte superior por la unidad de Peldaño Alto-PÑA, en la parte inferior por Vertientes Escarpadas VE y Escarpes E. Se caracteriza por presentar topes suaves poco continuos con pendientes menores de 15°, laderas muy

cortas, irregulares y poco continuas con pendientes moderadas entre 15° y 30°. Presenta cicatrices de deslizamiento en su parte baja. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín y superficies antrópicas en su parte media.

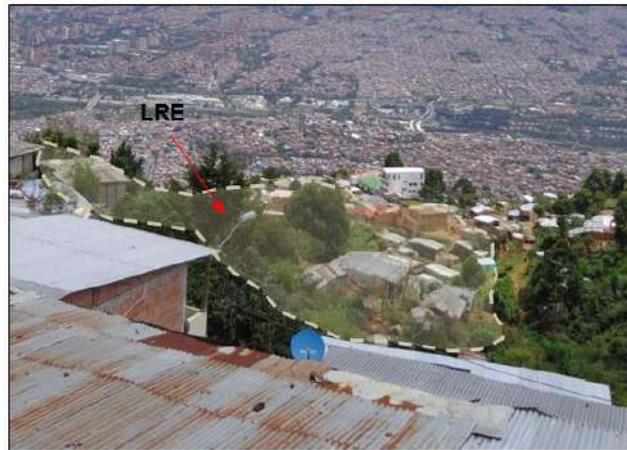


Figura 25. Unidad de Lomeríos Estrechos LRE

5.2.3 Unidad de Lomo Estrecho Con Vertientes Fuertes LEVF

Se encuentra localizada en el extremo norte de la UMI. Se encuentra limitada hacia el sur por geofomas escarpadas. Exhibe topes agudos estrechos con pendientes entre 15° y 30°, vertientes cóncavas escarpadas con pendientes mayores de 45°, presenta dirección preferencial en sentido E-W, como se ilustra en la Figura 26. Esta unidad se desarrolla litológicamente sobre material residual de las Dunitas de Medellín.

5.2.4 Unidad de Peldaño Tectónico PÑT

Se localiza en varios sectores de la UMI La Cruz, encontrándose entre las cotas 2036-2194 msnm. Presenta topes suaves de moderada continuidad con pendientes menores de 5°, sus laderas son cortas y convexas con pendientes suaves menores de 15° de inclinación y bajo grado de incisión. Estas geofomas presentan diferentes niveles altitudinales, haciendo parte de antiguos peldaños o escalones, cuyo origen está asociado a fenómenos erosivos y tectónicos. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín como se ilustra en la Figura 27.



Figura 26. Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF

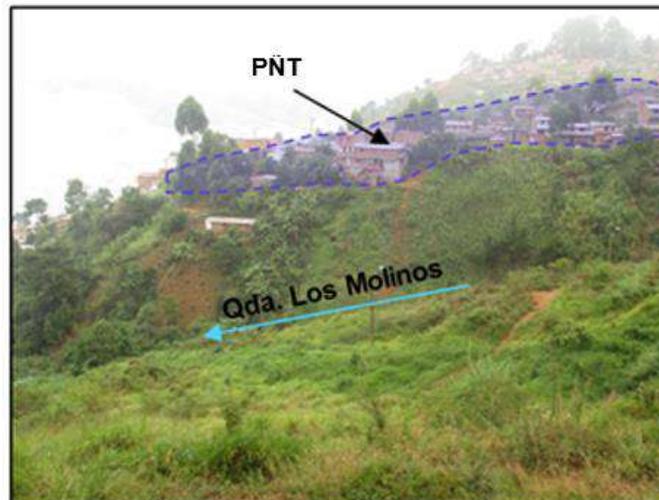


Figura 27. Unidad de Peldaño Tectónico PÑT

5.2.5 Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI

Esta geoforma se encuentra distribuida en toda la zona de estudio. Corresponden a zonas con pendientes suaves menores de 15° sin incisión, presentan formas variadas desde alargadas hasta ovaladas. Son producto del desprendimiento de materiales provenientes de las vertientes y se desarrollan sobre flujos de lodos y/o escombros (Figura 28).



Figura 28. Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI

5.2.6 Unidad de Superficie Antrópica SA

Localizada en la parte media y baja de la zona de estudio. Corresponden a superficies explanadas con formas irregulares modificadas antrópicamente, presenta pendientes suaves entre 0°-5° de inclinación (Figura 29).



Figura 29. Superficie Antrópica SA

5.2.7 Unidad de Vertiente Escarpada VE

Localizada en la parte media y baja de la UMI, sobre la margen izquierda de la quebrada La Chorrera o El Molino. Limita en la parte superior por Lomos Amplios con Vertientes Moderadas-LAVM e inferior por Escarpes-E, como se ilustra en la Figura 30. Se caracteriza por tener pendientes moderadas e irregulares. En la zona en estudio se encuentra hacia el suroccidente de la UMI y ocupa la parte central del polígono La Cruz. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.



Figura 30. Vertiente Escarpada VE y Escarpe E

5.2.8 Unidad de Escarpe E

Localizada sobre ambos márgenes de la quebrada La Chorrera o El Molino. Se encuentra limitada por la unidad de Superficies con Baja Incisión-SBI, Lomos Estrechos, Vertientes fuertes LEVF. Esta geoforma presenta vertientes largas, restas e irregulares con pendientes mayores de 60°. Sobre esta unidad se tienen bloques en superficie de dunita, los cuales pueden ser removilizadas por agentes erosivos como el agua (Figura 31).

Las vertientes de esta unidad son escarpadas, largas, rectas e irregulares, con un sistema de drenajes que las atraviesan de manera perpendicular, con fuerte incisión hasta definir cauces encañonados en forma de “V” profundos y estrechos.

Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín.



Figura 31. Unidad de Escarpe E

5.3 MORFODINÁMICA REGIONAL

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

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

avenidas torrenciales han sido fenómenos naturales frecuentes, asociados al origen y evolución del Valle de Aburrá. Sin embargo, las afectaciones producto de éstos han aumentado considerablemente en las últimas décadas, debido a la creciente ocupación de terrenos en condiciones de amenaza.

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

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

El AMVA cuenta con una base de datos actualizada en el DesInventar. Ésta integra las bases de datos elaboradas por la Universidad EAFIT, lo que antiguamente era el SIMPAD y ahora se conoce como el DAGRD. Además, trabaja en un proceso diario de actualización de datos, que incluye los registros de eventos publicados en los periódicos locales y nacionales, los reportes de los Comités Locales de Emergencia y de la comunidad.

A través de la base de datos DesInventar, se logró consultar que cerca de la zona de estudio se tienen unos 322 registros de eventos que involucran movimientos en masa, avenidas torrenciales, inundaciones y caídas de roca desde 1981 hasta 2006. Estos eventos se reportaron en 12 barrios de la Comuna 8 y la Comuna 3, entre los cuales se encuentran los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de los diferentes eventos que ocurren en cada uno de los 12 barrios que se encuentran cerca de los polígonos. Por su parte, la Figura 32 y la Figura 33 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%

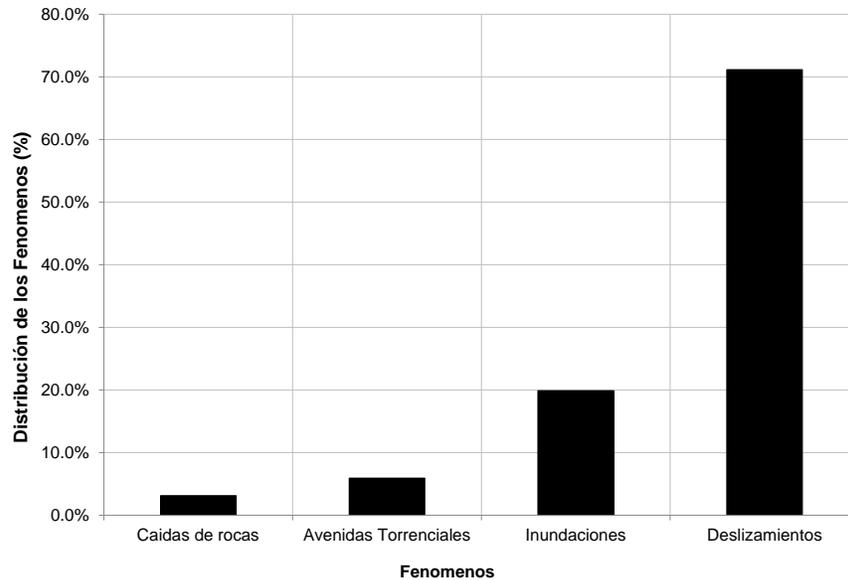


Figura 32. Distribución de los fenómenos

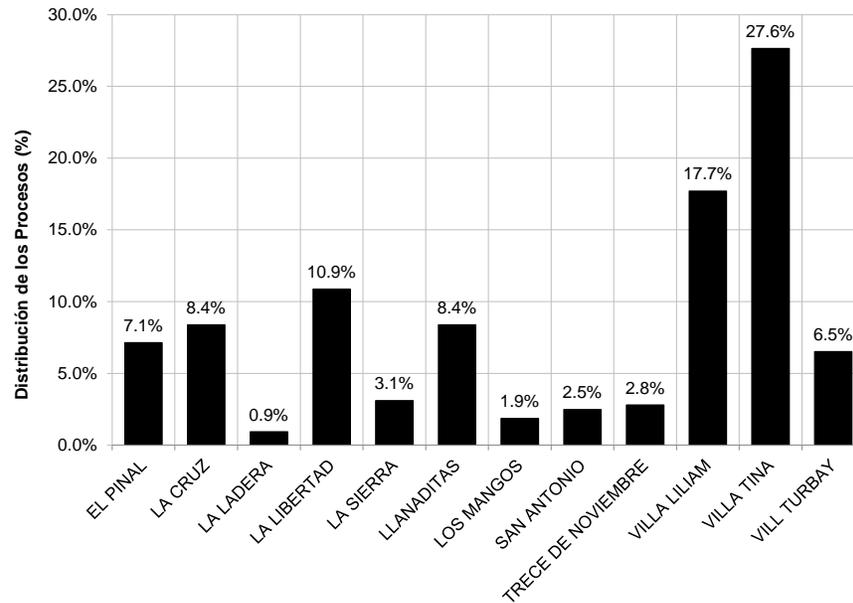


Figura 33. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos

Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes (Figura 32) en la zona de estudio (Figura 33), 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 33 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villatina, Villa Liliam y La Libertad. Respecto a los barrios de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles, el barrio más afectado es La Cruz, seguido de Llanaditas donde se localizan los Barrios Golondrinas y El Faro y finalmente el Barrio Villa Turbay.

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

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

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	ocutbre 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 Mirlas	Abril de 2011	Deslizamientos flujo de lodos
Villa Turbay - Colegio Diana Turbay	Marzo de 2011	Deslizamientos traslacionales
La Sierra	8 de diciembre de 2014	Flujo de escombros, posible ingenerencia de redes de servicios públicos

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

También se destaca el movimiento en masa de Villatina, el 27 de septiembre de 1987 (Figura 34). 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 34. 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 La Cruz, 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.

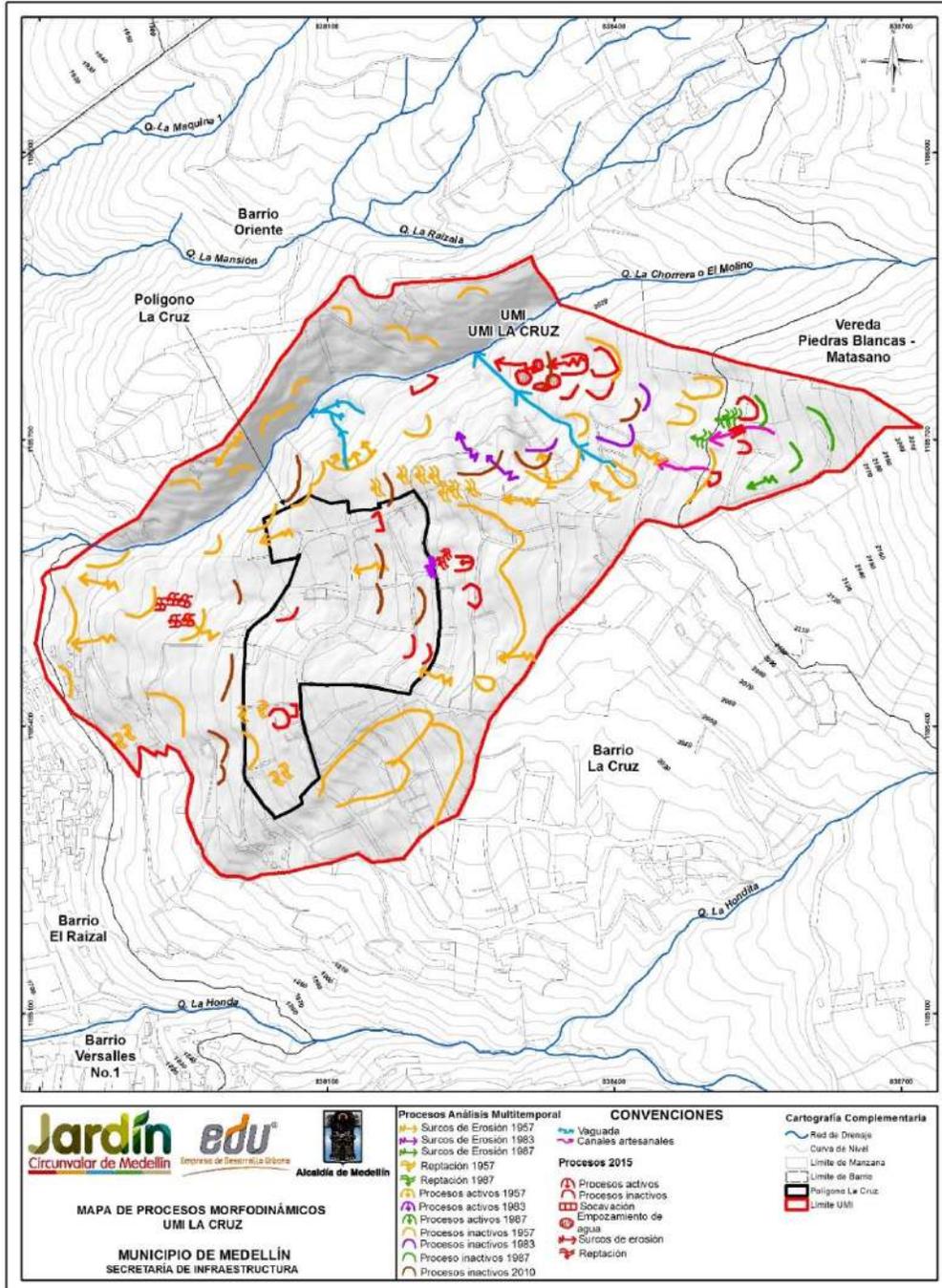
Las fotografías aéreas fueron clasificadas por año, línea de vuelo y número de fotos como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1959	C-889	1	013-015	1 : 5.000
1959	C-889	3	045-052	1 : 5.000

AÑO	VUELO	FAJA	FOTOS	ESCALA
1976	FD-87	3	29-35	1 : 10.000
1977	Vuelo de prueba	3	310-313	1 : 10.000
1981-1983	R-898	1	261-271	1 : 5.160
1981-1983	R-893	8B	55-61	1 : 5.000
1981-1983	R-898	13A	229-231	1 : 6.000
1987	Geovial-18	19	232-240	1 : 5.300
1987	Geovial-18	20	212-22	1 : 4.600
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	730-731	1 : 10.700
2004	AE-183	3	984-985	1 : 19.900

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



Mapa 13. Procesos morfodinámicos UMI La Cruz
(11_LCHProcesosMorfodinamicos_Medellin_C y
11_LCHProcesosMorfodinamicos_Medellin_T)

Tabla 5. Colores definidos para los procesos según año

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

Los procesos morfodinámicos identificados consisten en deslizamientos y caída de rocas, cárcavas, surcos, zonas de empozamiento de agua y socavación y bloques en superficie por erosión. Aunque la mayoría de los procesos son inactivos, se presentan procesos activos para el año 2010.

En el año 1957, en la UMI La Cruz se presentaban sobrepastoreos o terraceos localizados en el extremo norte del barrio y en la parte alta, erosión superficial concentrada en la parte alta y hacia la ladera de la quebrada La Honda. En la parte baja de la ladera occidental se encuentran cicatrices de deslizamientos y erosión superficial concentrada. La ladera de la quebrada La Honda, localizada al sur del barrio presenta abundantes cicatrices de deslizamientos en ambas márgenes de esta corriente de agua.

Para el año 1983 hay presencia de cicatrices de deslizamientos en el extremo norte del barrio, en sitios que a 1957 eran de erosión superficial concentrada. En el extremo sur del barrio se observa a esa fecha unas cicatrices en la ladera alta de la quebrada La Honda, límite del barrio.

En la actualidad, la zona presenta procesos de gran intensidad en los cañones de las Quebradas La Honda y La Hondita, donde se tiene deslizamientos activos con coronas de más de 20 m de ancho, los cuales amenazan viviendas construidas sobre esta vertiente. Igualmente se presentó un proceso de importancia hacia la zona de la parte baja del CAI, el cual ocurrió hace algunos años, destruyó viviendas y causó víctimas mortales (Figura 35).

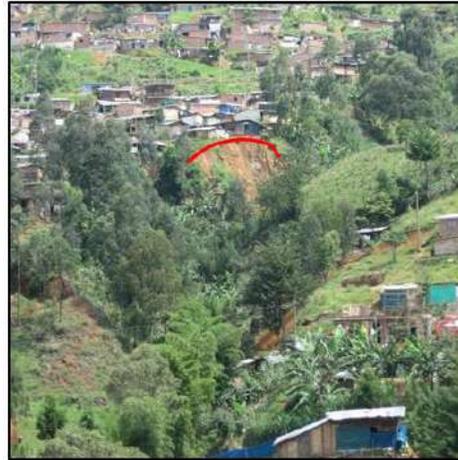


Figura 35. Deslizamiento en Barrio La Cruz

Hacia la zona oriental del polígono en el sector conocido como El Hoyo se encontró un proceso morfodinámico activo. Mide aproximadamente 10 m de longitud y 5.0 m de ancho. Este proceso está afectando el corredor (andén) de las viviendas cercanas tal como lo ilustra la Figura 36, en el cual se muestra desplazamiento hundimiento de la losa de concreto. A nivel superficial en el sitio se encuentra una capa de residuos sólidos (basuras) de poco espesor y debajo de esta se encuentra el suelo residual de las Dunitas de Medellín.



Figura 36. Proceso morfodinámico activo sector El Hoyo

Los procesos morfodinámicos inactivos consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y reptación.

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 UMI. El mecanismo

de falla de estos materiales varía entre superficies de falla planares y/o rotacionales, principalmente inactivos, tienen coronas con anchos que varían entre 5 m y 200 m y escarpes que pueden llegar a ser de hasta 10 m principalmente sobre los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín.

En la UMI La Cruz predominan procesos inactivos localizados en la unidad geomorfológica de Escarpe-E, Vertiente Escarpada-VE y Vertiente Moderada-VM, con cicatrices de hasta 50 m de largo con 20 m de ancho el cual obedece a un mecanismo de falla del tipo rotacional, generándose sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 37.).



Figura 37. Proceso inactivo de mayor magnitud

En la zona donde se localiza el proceso anterior, en su parte central-baja se tiene una vaguada de 40 m a 50 m de longitud, la cual inicia desde la parte alta del proceso hasta la pata del mismo, allí inicia otra cicatriz de magnitudes similares, como se ilustra en la Figura 38.

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en la unidad geomorfológica denominada como Escarpe E, el cual se localiza en las vertientes derecha e izquierda de la quebrada La Chorrera o El Molino, sobre el horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

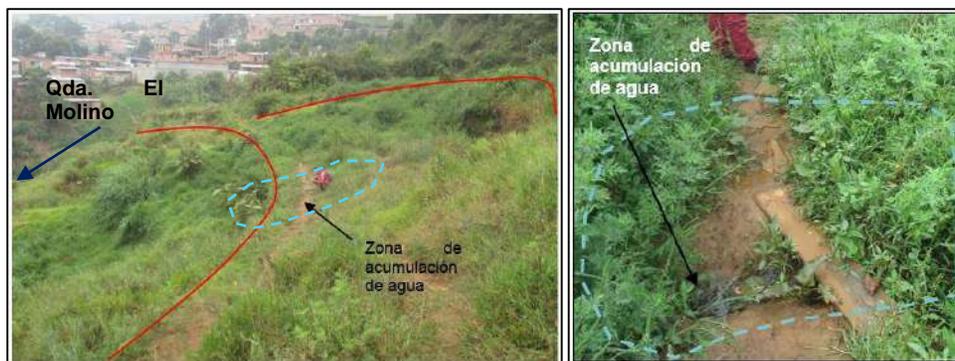


Figura 38. Vaguada y zona de acumulación de agua

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 39).

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



Figura 39. Escarpe en roca sobre la margen derecha de la quebrada El Molino, en la estación de campo MAD28-U-LC

Los surcos, las cárcavas, la socavación y los bloques en superficie son producto de procesos erosivos superficiales, tanto eólicos como fluviales. Se encuentran procesos de socavación de pequeños cauces generados por la actividad antrópica producto de las aguas servidas (Figura 40) hacia el norte de la UMI, sobre los horizontes IC-IIA de las Dunitas de Medellín, con aproximadamente 30 cm de ancho, 60 cm de profundidad y cuya longitud es variable.



Figura 40. Socavación de cauce antrópico

Los desgarres son procesos igualmente comunes en toda la UMI, se presentan sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín (Figura 41). En general dan lugar a escarpes no mayores de 2 m de altura, no obstante pueden tener hasta 15 m de ancho y 5 m de largo.

Respecto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI La Cruz, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa, en las márgenes de la quebrada El Molino. Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de esta quebrada.



Figura 41. Desgarre localizado en la parte trasera de una vivienda

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).

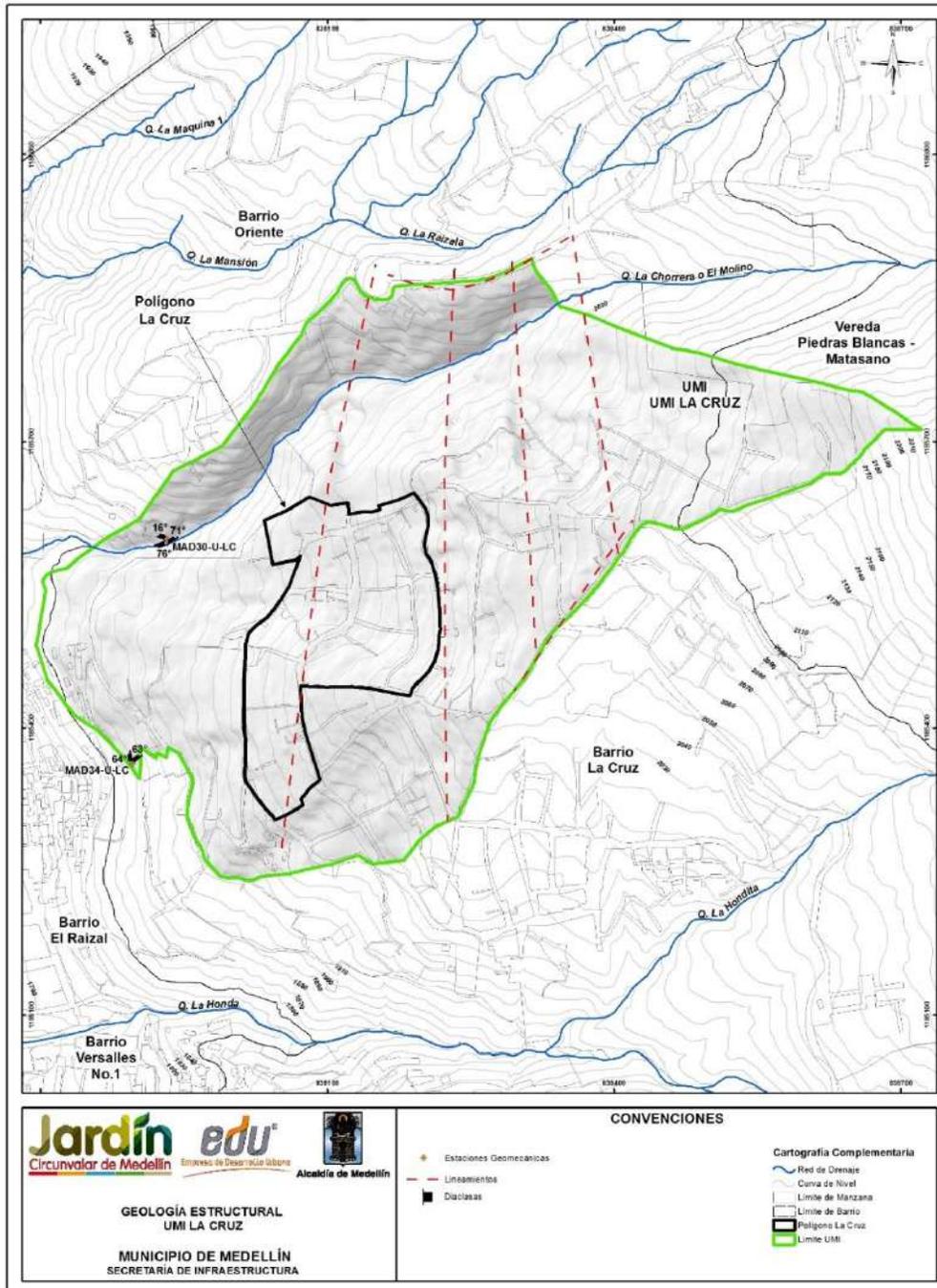
En la zona de estudio, el Consortio Microzonificación (2006) reporta estructuras geológicas para las Dunitas de Medellín, tales como diaclasas, cizallas y fallas, cuyos datos de rumbo/buzamiento fueron tomados en el municipio de Envigado y en el corregimiento de Santa Elena, tal y como se muestra en 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 Anfíbolitas Dunitas	N80°W/45°S
Quebrada Rodas Autopista Medellín-Bogotá	Falla Normal Contacto Anfíbolitas Dunitas	NS/45°NS-45°E

6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la UMI La Cruz se encontraron estructuras tales como lineamientos geológicos y discontinuidades, las cuales se muestran en el Mapa 14.



Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI La Cruz
(12_LCHGeologiaEstructural_Medellin_C y 12_LCHGeologiaEstructural_Medellin_T)

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

Los lineamientos se identificaron a través de los análisis geomorfológicos y fotogeológicos, encontrando tendencias N-S, NE y NW. La primera de estas tendencias se relaciona con la dirección del contacto Anfibolitas Dunitas de Medellín (Falla Rodas) y la segunda coincide con la fuerte tendencia encontrada en la Quebrada La Castro. Además, cabe resaltar la posible relación de estos lineamientos geológicos con las evidencias de falla reportadas antes en este informe, 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 La Cruz, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas en cada afloramiento.

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

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

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

6.2.1 Orientación y buzamiento

En cada una de las estaciones geomecánicas al interior de la UMI La Cruz, se midieron la orientación y el buzamiento de los planos de discontinuidad. La orientación fue tomada con la notación buzamiento/dirección de buzamiento. En total se recolectaron 27 datos distribuidos en dos estaciones geomecánicas, como se indica en la Tabla 7. En el Mapa 14 se presenta la localización de las estaciones geomecánicas mostradas en la Tabla 7 donde se realizaron las medidas de discontinuidades. En el Anexo 01 de este informe se presentan los formatos de levantamiento en campo, en los cuales se establecen las características de las discontinuidades medidas en campo.

Los análisis se ejecutaron de dos formas diferentes, primero teniendo en cuenta todas las discontinuidades medidas en las dos estaciones geomecánicas, denominándose como el análisis general. De esta forma, se pretende entender inicialmente el patrón de fracturamiento general del macizo que aflora en la UMI La Cruz para poder juzgarlo en función de la tectónica regional.

Posteriormente, se hizo un análisis local, comenzando con cada una de las estaciones geomecánicas. De esta forma se quiere entender si el patrón de fracturamiento general se puede particularizar por zonas.

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

Estación	Coordenadas		Numero de Datos
	Norte	Este	
MAD29-U-LC	838011.361	1185655.851	19
MAD34-U-LC	837896.118	1185362.796	8

La Figura 42 presenta el diagrama de polos y en la Figura 43 el diagrama de rosas, obtenidos con todas las discontinuidades tomadas en las estaciones geomecánicas. Se pueden observar concentraciones de polos que permiten definir, en principio, tres tendencias (familias) principales, con las características que se muestran en la Tabla 8.

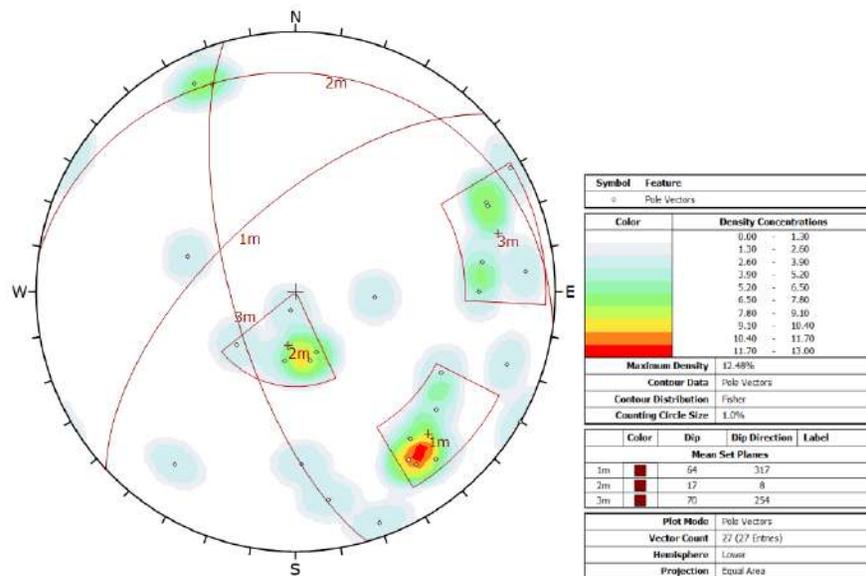


Figura 42. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

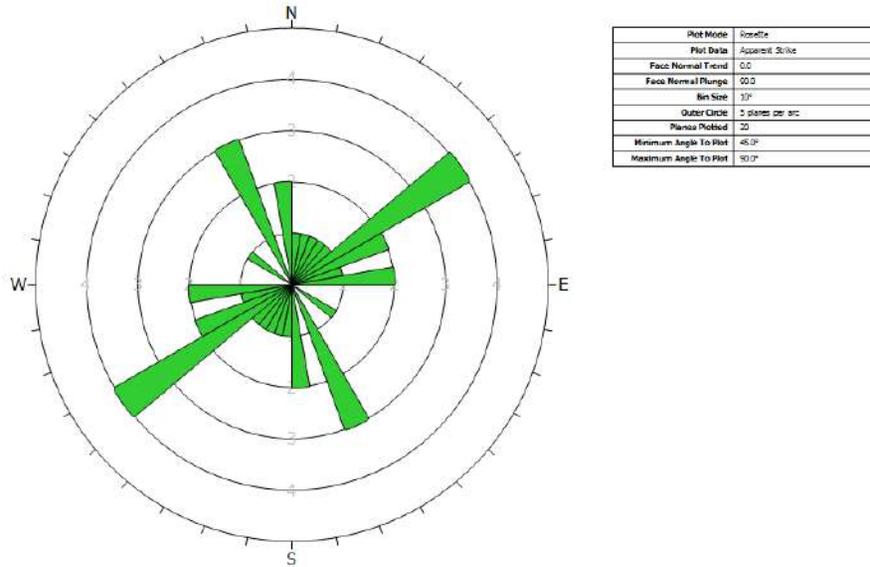
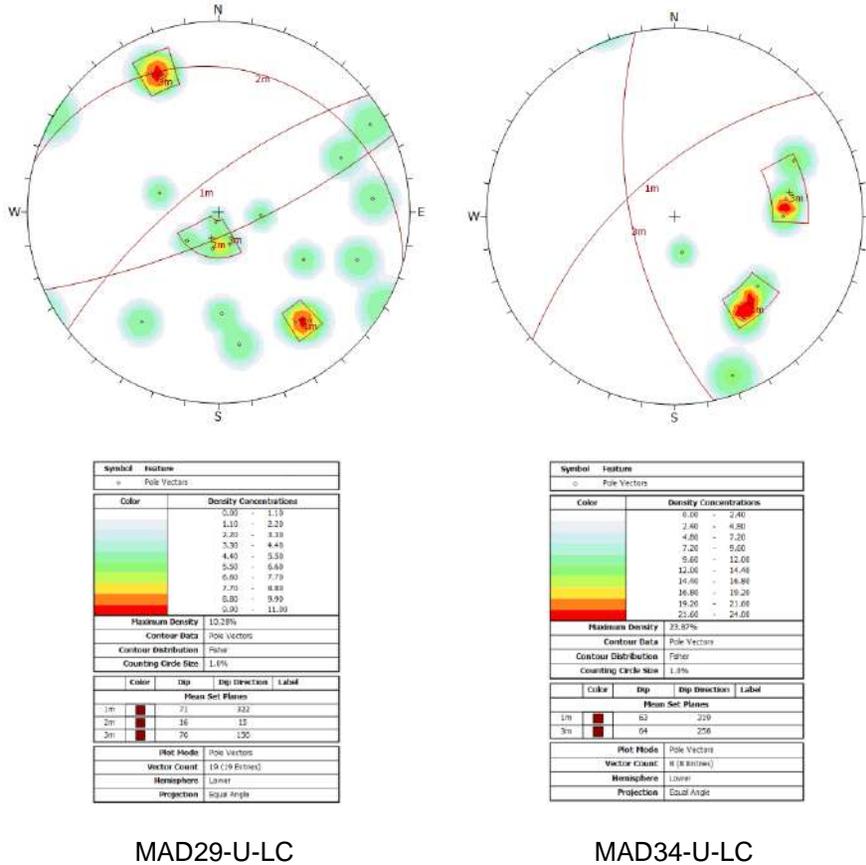


Figura 43. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos levantados en campo

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración
1	64°/317°	N47°E/64°NW	11.7 - 13
2	17°/008°	N82°W/17°NE	9.10 - 10.40
3	70°/254°	N16°W/70°SW	7.8 - 9.1

El análisis local de las discontinuidades consistió en revisar en la red estereográfica los datos levantados en cada una de las estaciones geomecánicas. El objetivo de este análisis es identificar la posible existencia de una tendencia especial en algunas de las familias principales observadas en el análisis general. Los diagramas de polos para las estaciones geomecánicas se muestran en la Figura 44.



MAD29-U-LC

MAD34-U-LC

Figura 44. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las estaciones MAD29-U-LC y MAD34-U-LC

La estación MAD29-U-LC presenta tres familias de discontinuidades, mientras que la estación MAD34-U-LC muestra dos familias de discontinuidades, las cuales se detallan en la Tabla 9 y en la Tabla 10.

Tabla 9. Familias de discontinuidades en la estación MAD29-U-LC

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	71°/322°	N52°E/71°NW	9.9 -11.
2	16°/015°	N75°W/16°NE	9.9 -11
3	76°/156°	N66°E/76°SE	7.7 – 8.8

Tabla 10. Familias de discontinuidades en la estación MAD34-U-LC

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	63°/319°	N49°E/63°NW	21.6 – 24
3	64°258°	N12°W/64°SW	21.6 – 24

De las familias de discontinuidades presentes en la estación MAD29-U-LC, dos de ellas coinciden con la tendencia general de la UMI (Familias 1 y 2), mientras que la familia 3 tiene una tendencia diferente.

En la estación MAD34-U-LC las dos familias de discontinuidades que se presentan coinciden con las familias 1 y 3 del análisis general de la UMI.

Los resultados indican que la zona de estudio está dominada por tres familias de discontinuidades principales (Tabla 8), y una familia secundaria que solo se presenta en la Estación de Campo MAD29-U-LC con orientación N66°E/76°SE (Familia 3 de la Tabla 9). Además de poderse anotar lo siguiente:

- ✓ La Familia 2 no se relaciona de forma directa con las estructuras geológicas reportadas a nivel regional en las Dunitas, lo que indica que corresponden a una estructura local del macizo rocoso.
- ✓ La Familia 3 (N16°W/70°SW) del análisis general, tiene orientación similar a las diaclasas de la vía al plan en Envigado (N5°W/17°SW).
- ✓ La Familia 1 del análisis general (N47°E/64°NW), tiene orientación similar a la zona de cizalla de la vía al plan en Envigado (S35°W/55°W-N35°E/64°NW)
- ✓ La Familia 3 del análisis local (N66°E/76°SE), encontrada en la estación MAD29-U-LC coincide en orientación con las diaclasas de la vereda Pericos de Envigado (N50°E/45°SE).

6.2.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad en una misma familia. Influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques. Los rangos empleados para la categorización de esta propiedad son los indicados a continuación en la Tabla 11 y en la Figura 45 los respectivos resultados.

Tabla 11. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades

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

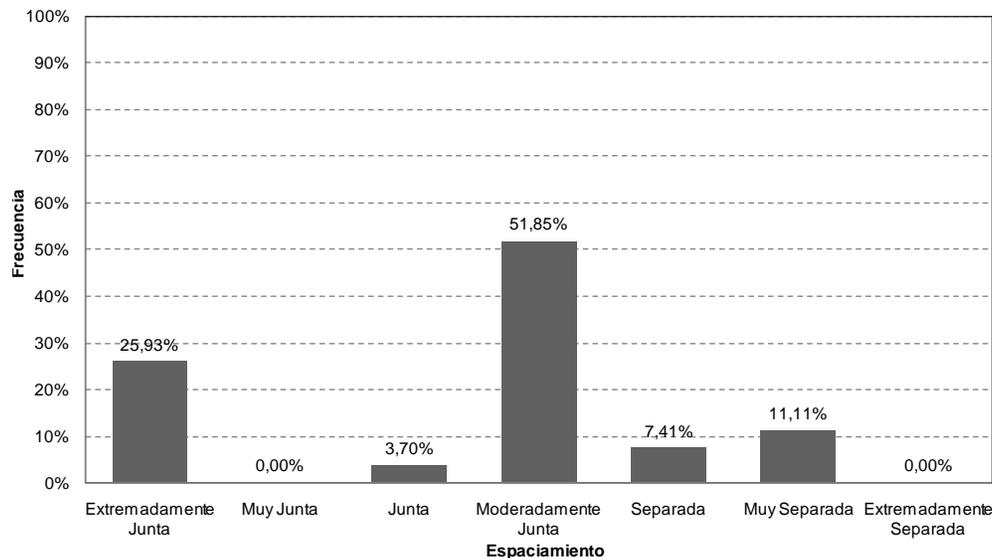


Figura 45. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades

En los levantamientos realizados predominan discontinuidades moderadamente juntas, que corresponden a casi al 52% de los datos, seguidas de las discontinuidades extremadamente juntas. Con el 25% de los datos, lo que indica que el macizo rocoso presenta un grado importante de fracturamiento.

6.2.3 Continuidad

Se trata de la extensión del plano de discontinuidad en el rumbo. Los rangos para la categorización de esta propiedad son los mostrados en la Tabla 12. Se obtuvieron finalmente los resultados que se muestran en la Figura 46. En términos de la continuidad, el 67% de las discontinuidades levantadas presentan continuidad baja la cual corresponde a planos con longitudes entre 1.0 m y 3 m. El 33% restante presentan continuidades muy bajas, es decir menores a 1.0 m.

Tabla 12. Descripción de la continuidad de las discontinuidades

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

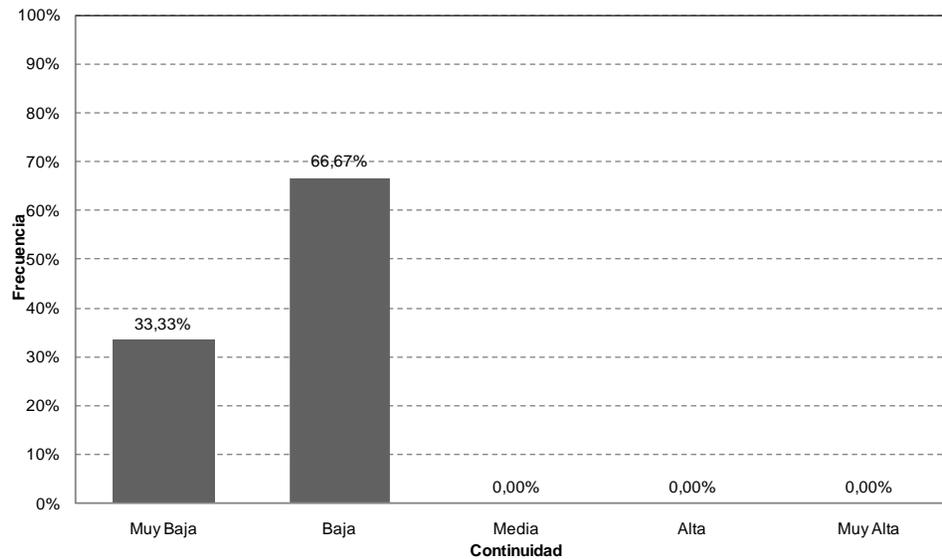


Figura 46. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades

6.2.4 Abertura

Corresponde a la distancia perpendicular al buzamiento que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede tener grandes cambios a lo largo del macizo rocoso. Los rangos para esta clasificación son los mostrados a continuación en la Tabla 13, con base en los cuales se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 47. La mayor parte de las discontinuidades tienen tendencia de ser parcialmente abiertas (48%) a cerradas (29%), esto equivale a tener discontinuidades con aberturas entre 0.1 mm hasta 0.5 mm.

6.2.5 Relleno

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

Para la UMI Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 48. Con respecto al relleno, cabe resaltar que el 63% de las discontinuidades no presentan ningún relleno. Por otra parte, el 37% presentan relleno blando igual o menor a 5 mm, el cual corresponde principalmente a material limoso y arcilloso.

Tabla 13. Descripción de la abertura de las discontinuidades

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

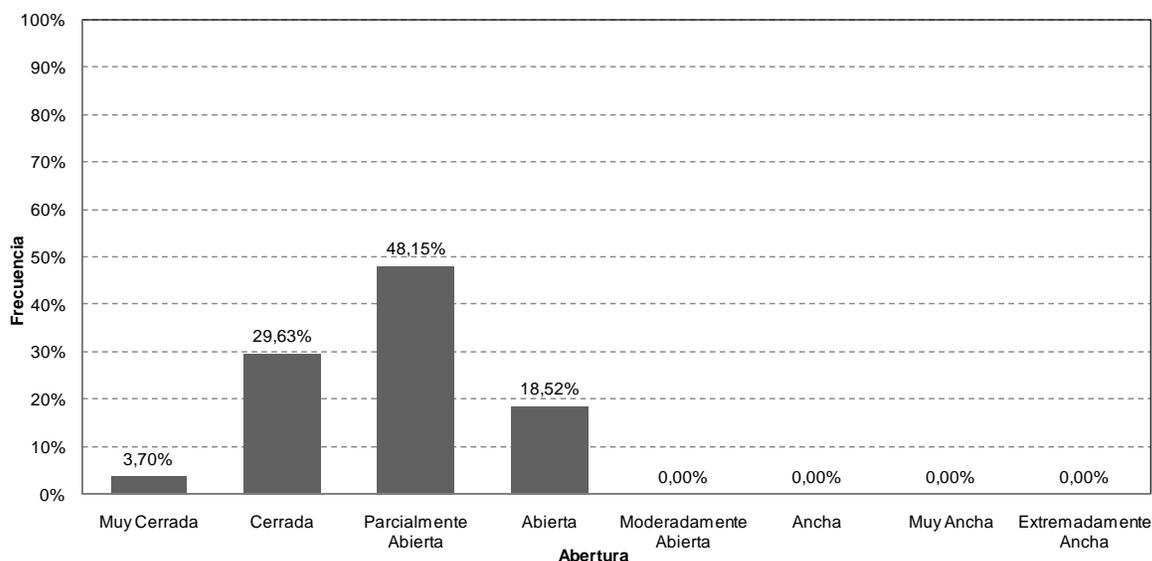


Figura 47. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades

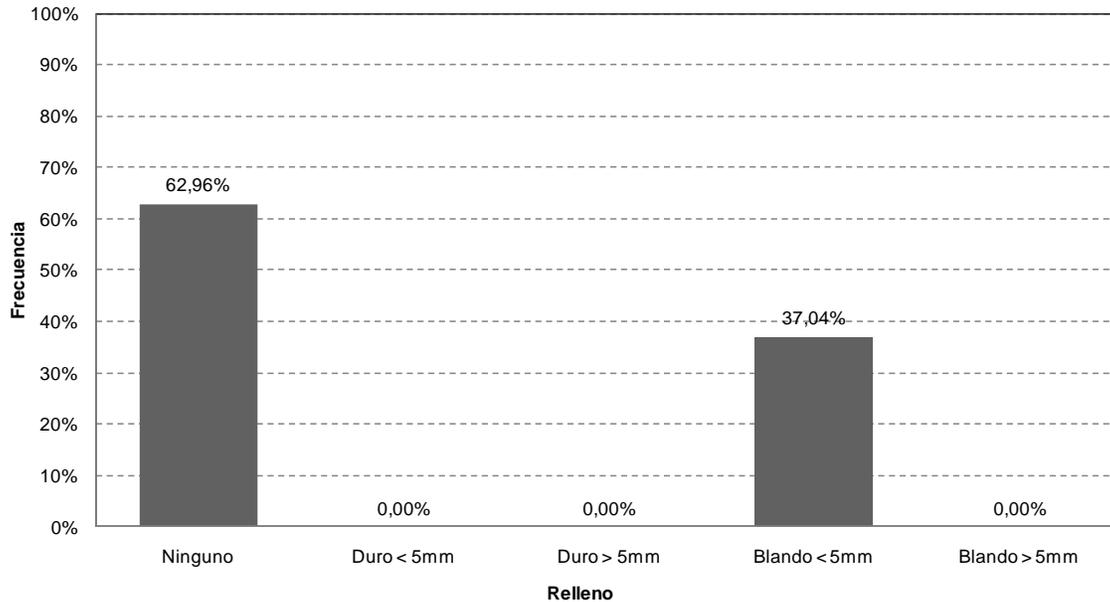


Figura 48. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades

6.2.6 Alteración

Es el cambio físico-químico que los agentes atmosféricos pueden producir sobre el macizo rocoso, afectando las propiedades geomecánicas. Los rangos de esta característica van desde inalterada, ligeramente alterada, moderadamente alterada, muy alterada hasta descompuesta. Para la UMI La Cruz se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 49. Las discontinuidades levantadas en las estaciones geomecánicas se encuentran moderadamente alteradas presentando cerca del 78% de los datos.

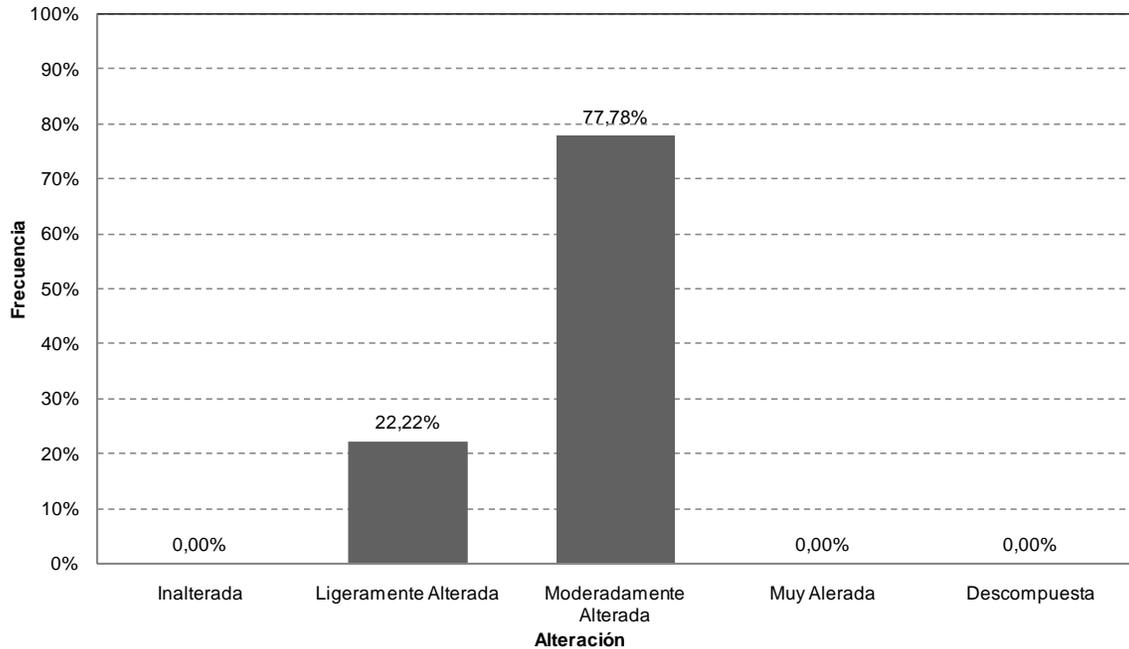


Figura 49. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades

6.2.7 Rugosidad

Esta propiedad determina la resistencia al corte de la discontinuidad. A mayor rugosidad, mayor es la resistencia. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. La rugosidad de las discontinuidades se calificó según dos escalas diferentes, como se muestra en la Figura 50. Primero la escala decimétrica o métrica, la cual puede ser escalonada, ondulada o plana. Luego se juzgó la escala centimétrica o milimétrica que da lugar a discontinuidades rugosas, lisas o planas.

Para la UMI La Cruz se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 51. En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentan predominantemente onduladas lisas con un 33% y escalonadas rugosas con un 29% y escalonadas con un 22%. Seguidas por las discontinuidades escalonadas lisas y onduladas rugosas representan la misma cantidad (18%).

Entre los tres tipos se resalta que la mayoría de las discontinuidades se presentan rugosas.

6.2.8 Agua

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

presentan en la Figura 52, donde se observa que las discontinuidades tomadas en este caso se encuentran secas.

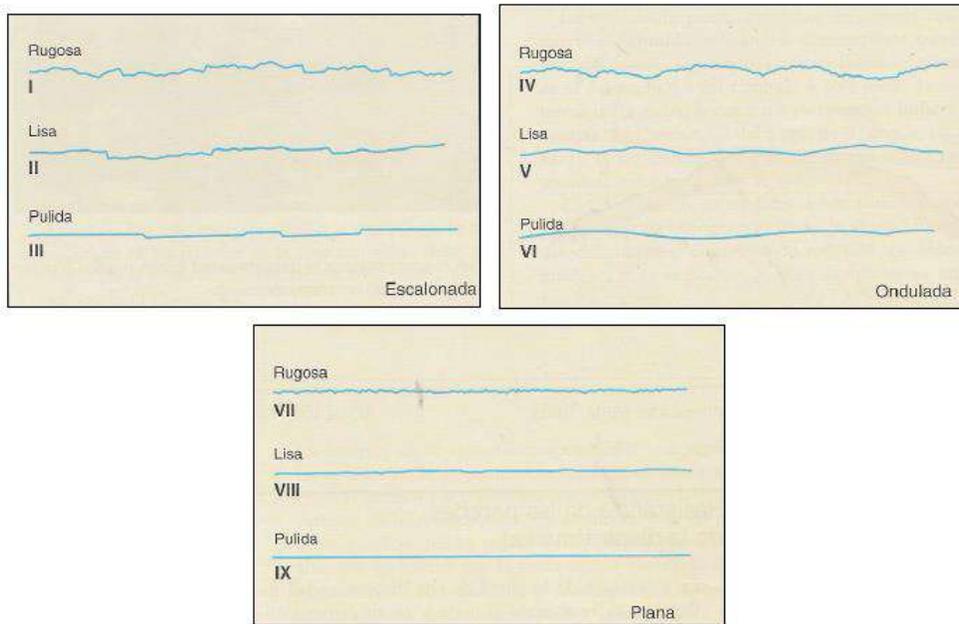


Figura 50. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002)

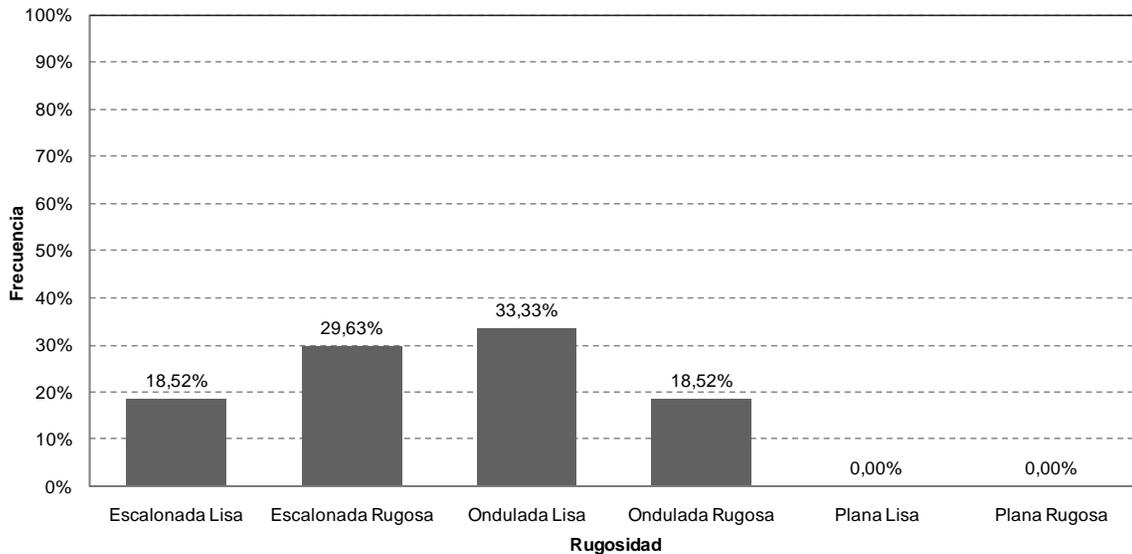


Figura 51. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades

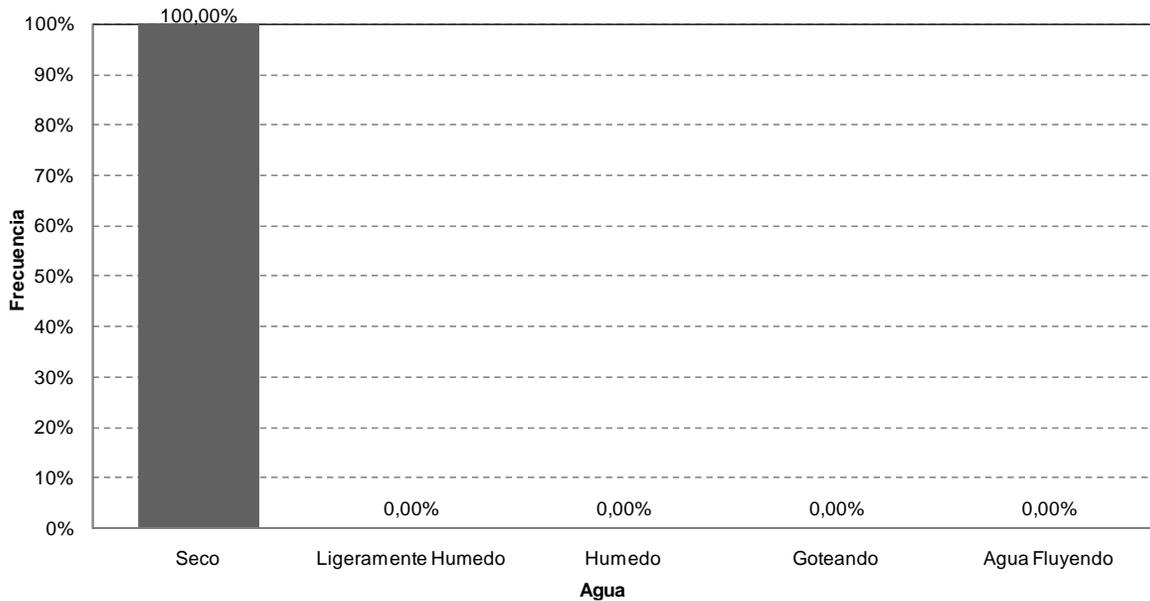


Figura 52. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades

6.2.9 Resistencia de las paredes

Es la resistencia a la compresión inconfiada, considerándose entonces que es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. Los rangos de esta característica son extremadamente blanda, muy blanda, blanda, moderadamente dura, dura, muy dura y extremadamente dura. Para la UMI La Cruz se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 53, donde se observa que las discontinuidades de esta UMI se encuentran moderadamente duras.

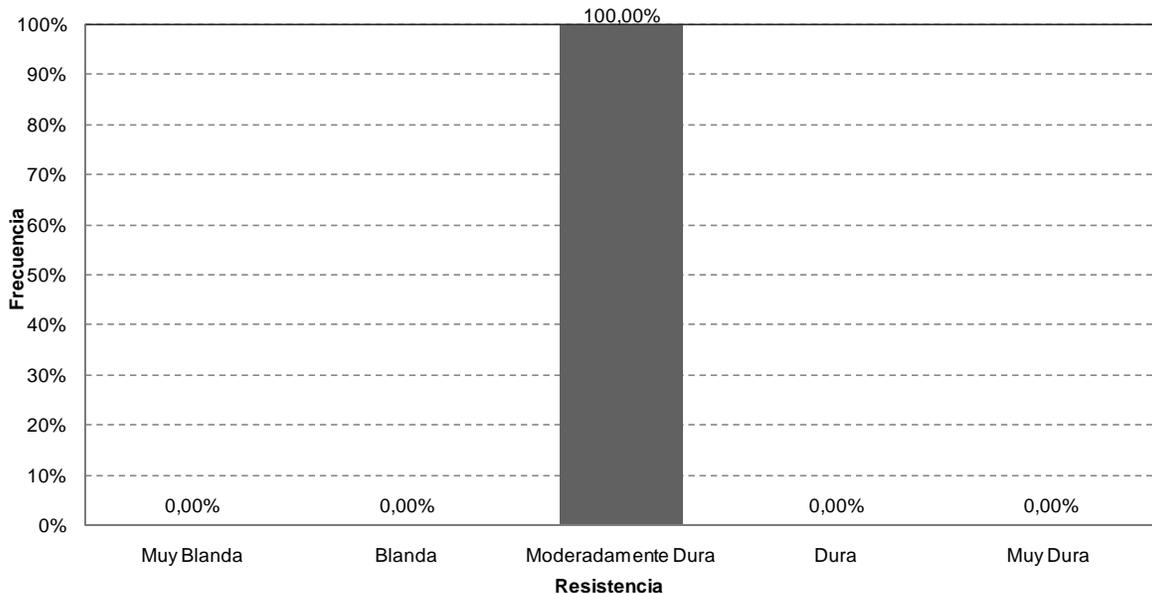


Figura 53. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades

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 tres secciones cerca de las cuales se tomaron datos estructurales o se observaron escarpes en roca, localizados en las vertientes de la parte baja de la quebrada El Molino y en la parte baja de la UMI, como se muestra en la Figura 54 y la Tabla 14.

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

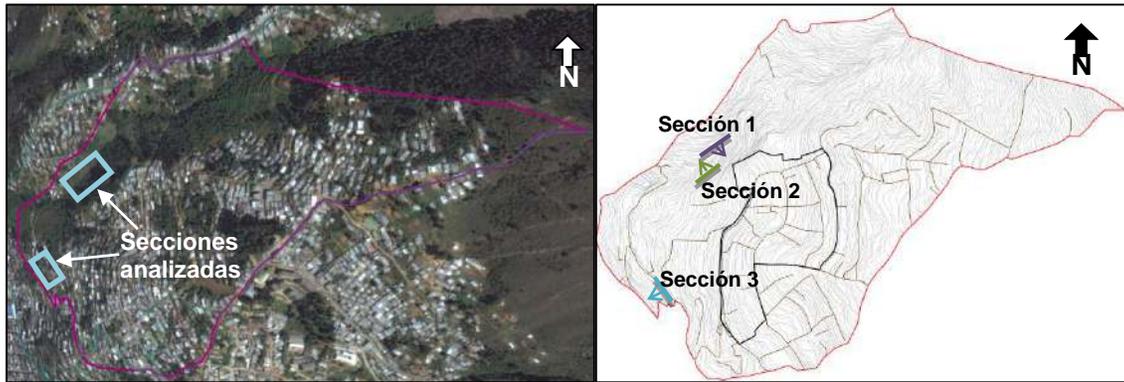


Figura 54. Secciones analizadas en la IMI La Cruz

Tabla 14. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas

Sección	Buzamiento	Dirección del Buzamiento
1	53	155
2	42	311
3	31	248

Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran de la Figura 55 a la Figura 57, mientras que los resultados numéricos se presentan en la Tabla 15. En las observaciones de la tabla se incluyen las probabilidades de falla para las familias más críticas de cada mecanismo.

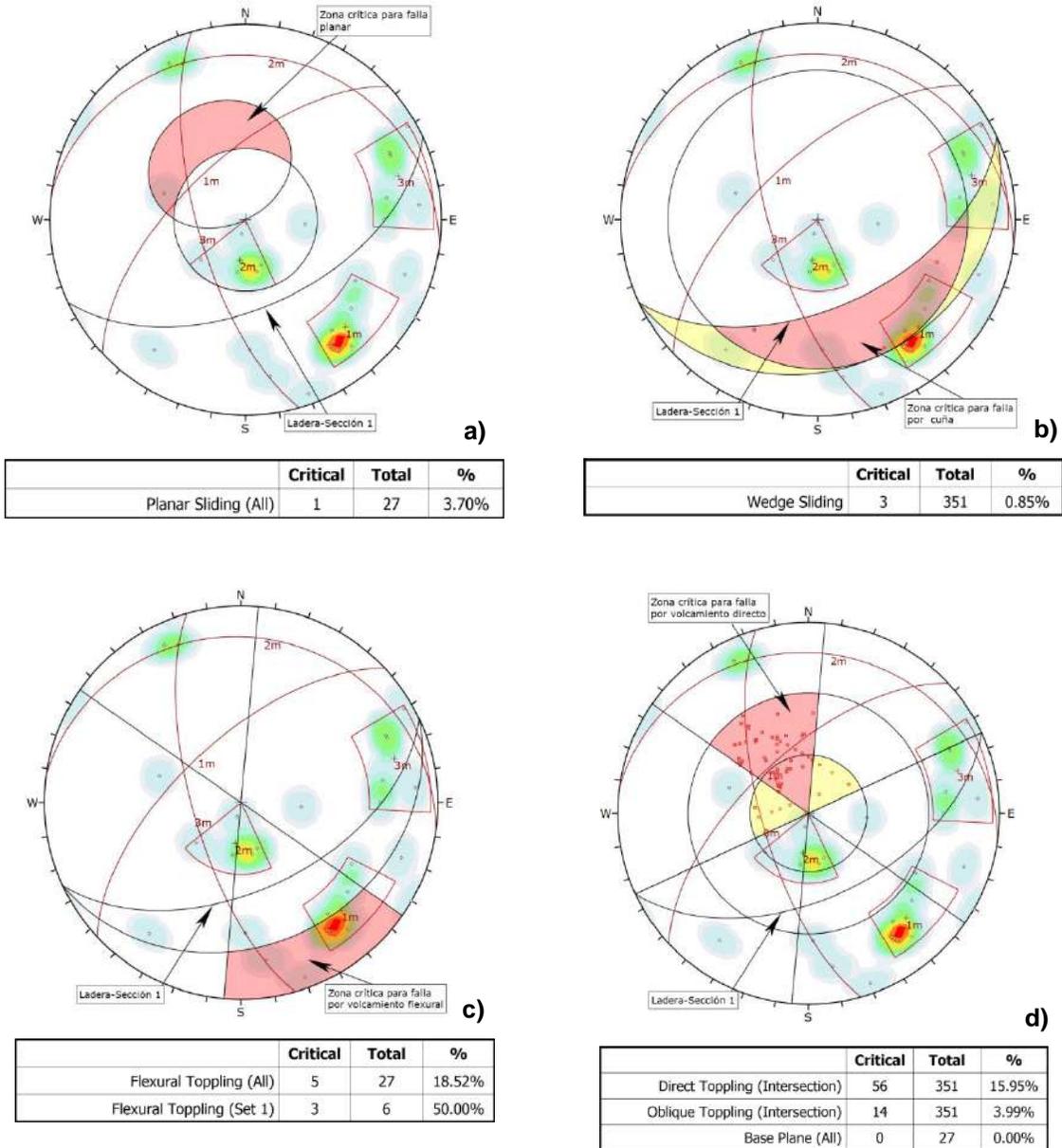


Figura 55. Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

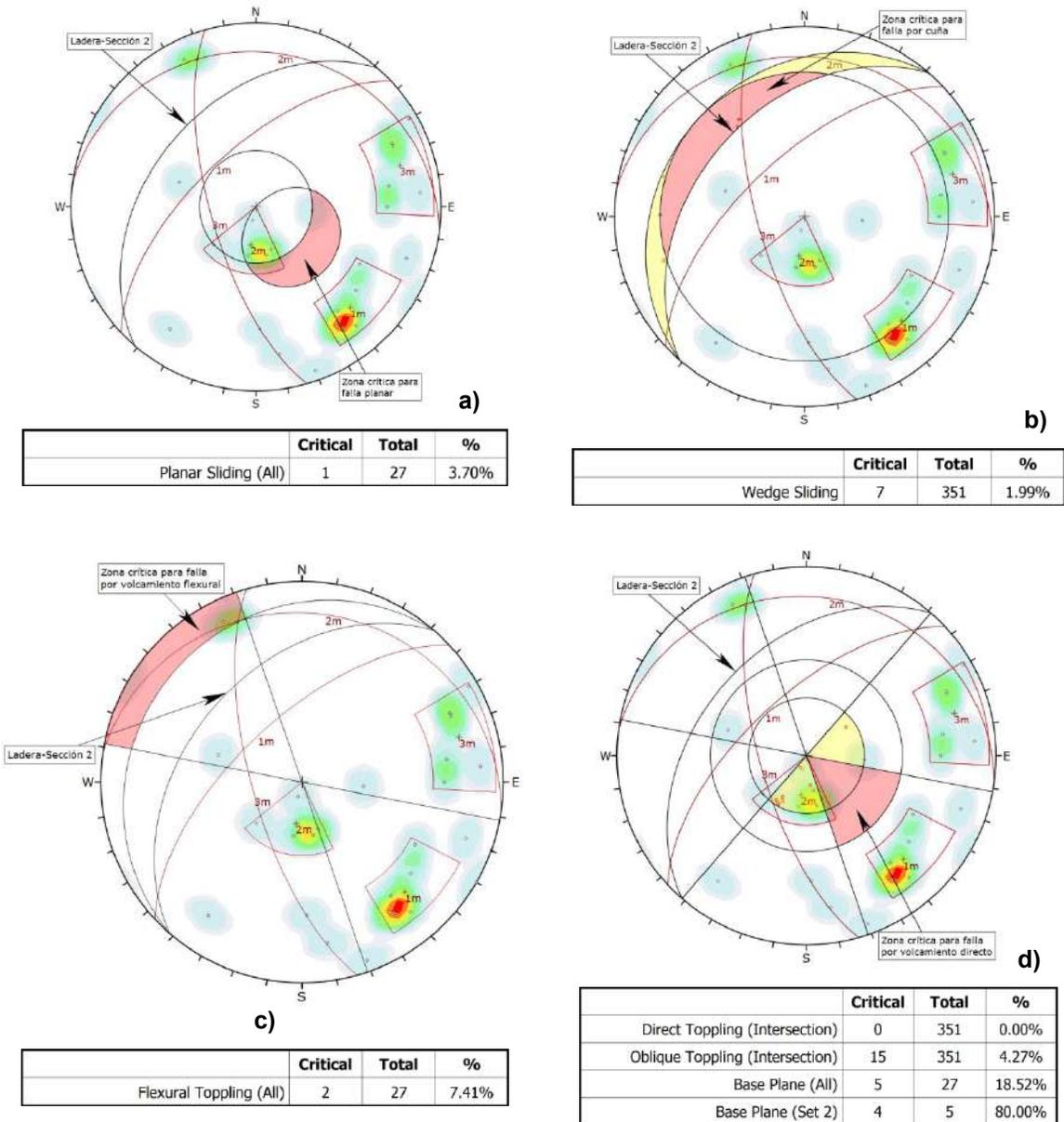


Figura 56. Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

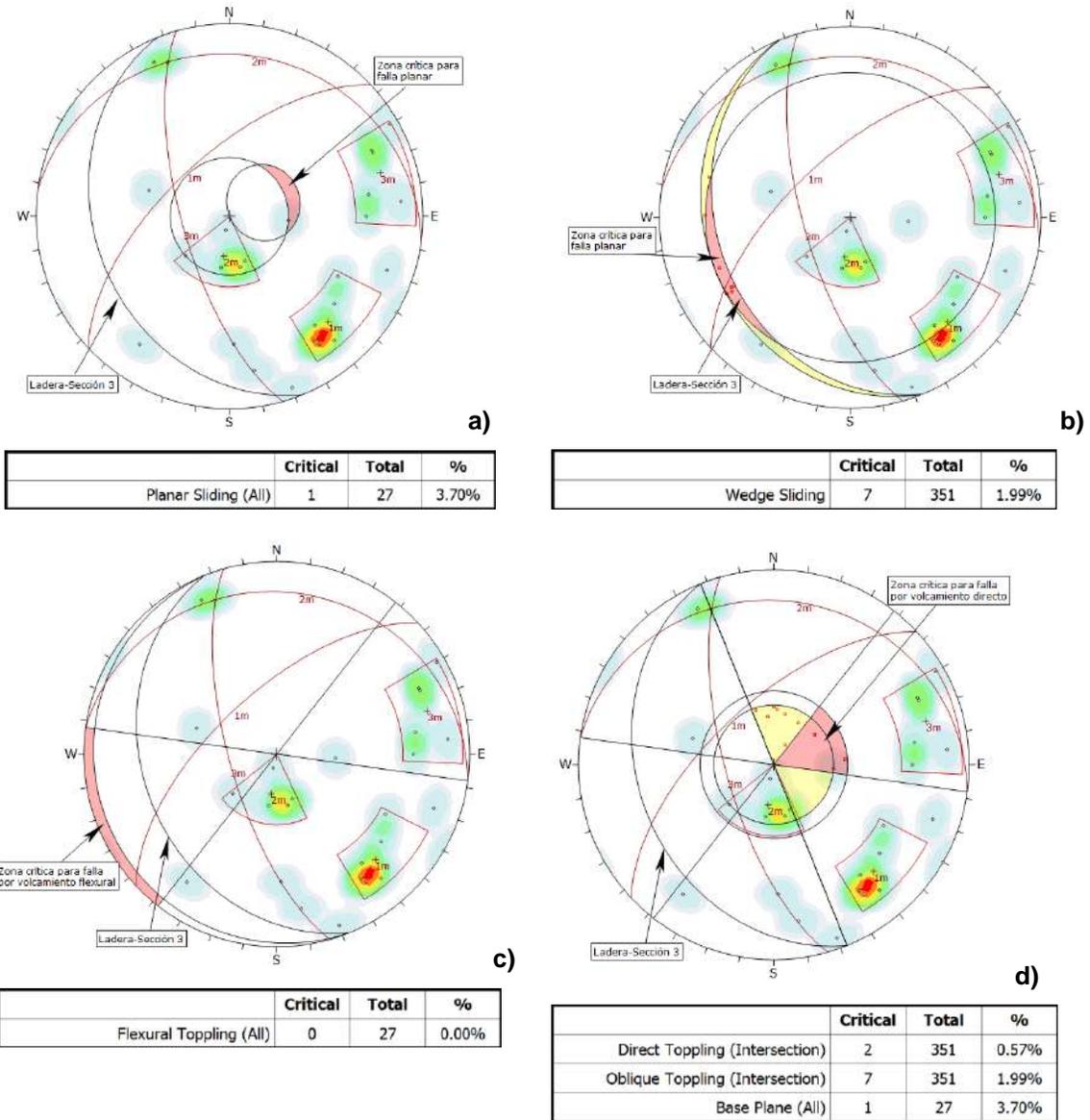


Figura 57. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

Tabla 15. Resumen resultados análisis cinemático

Sección	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base	Observaciones
1	3,70%	0,85%	18,58%	15,95%	3,99%	0,00%	Volcamiento Flexural familia 1 (50%).
2	3,70%	1,99%	7,41%	0,00%	4,27%	18,52%	Volcamiento por base familia 2 (80%).
3	3,70%	1,99%	0,00%	0,57%	1,99%	3,70%	No se encontraron familias críticas para los mecanismos de falla.

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

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis cinemático de la UMI La Cruz (Tabla 15) se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Aunque no hay un mecanismo de falla predominante en todas las secciones analizadas, el tipo de falla con más probabilidad de ocurrencia es el volcamiento, aunque con diferente mecanismo para cada sección (mecanismo por la base para la Sección 2, y volcamiento flexural y directo para la Sección 1).
- ✓ La falla por cuña es el mecanismo con menor probabilidad de ocurrencia para todas las secciones analizadas. En algunas secciones se presenta intersección de dos familias de discontinuidades, pero la orientación de los taludes no favorece este tipo de falla.
- ✓ La falla planar tiene la misma probabilidad de ocurrencia en las tres secciones (3.7%), aunque en las Secciones 1 y 3 existe una familia con orientación similar al talud (Familia 1 para la Sección 2, y Familia 3 para la Sección 3) el buzamientos de éstas es mayor que el buzamiento del talud, por lo que disminuye la probabilidad de ocurrencia de este tipo de falla.
- ✓ La Sección 1 presenta alta probabilidad de ocurrencia para el volcamiento flexural especialmente con la Familia 1, que tiene una probabilidad de 50%, seguido por el volcamiento directo (15.95%), pero sin una familia de discontinuidades preferencial.
- ✓ En la Sección 2 el mecanismo de falla con mayor probabilidad de ocurrencia es el volcamiento por la base, donde la Familia 2 es la más susceptible con un 80% de probabilidad.
- ✓ La Sección 3 tiene la menor probabilidad de ocurrencia para todos los mecanismos de falla.

7. EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA

7.1 ASPECTOS GENERALES

Basados en el Código de Laderas del AMVA (2012), una vez ejecutados 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 La Cruz.

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 58.

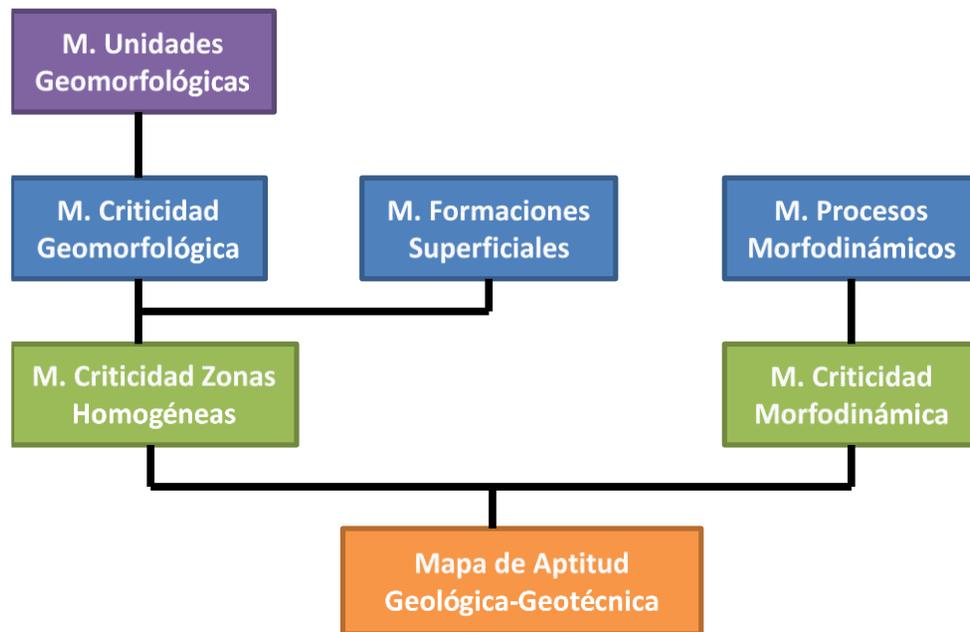


Figura 58. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica

Como se observa en la Figura 58, 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.

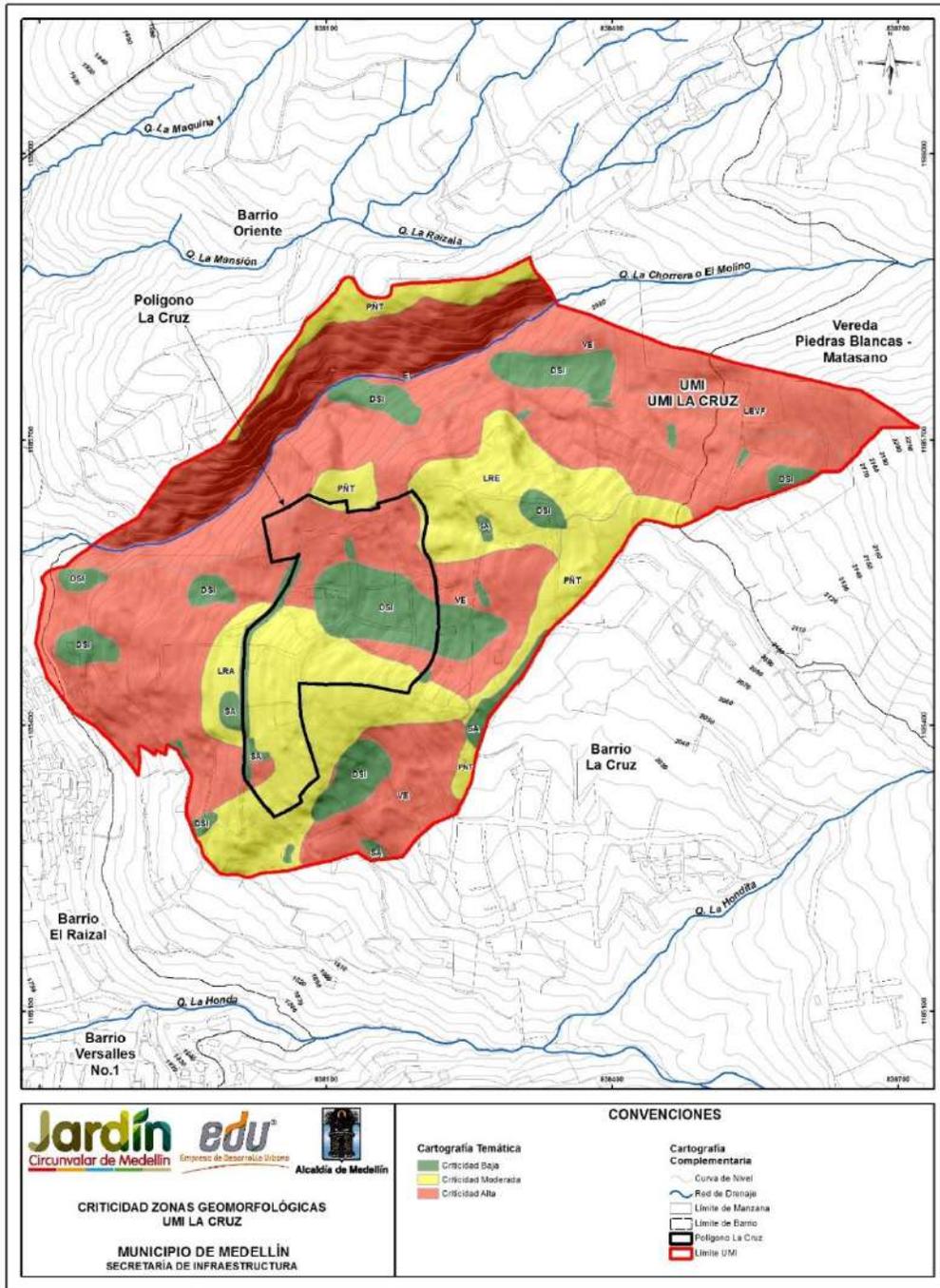
7.2 MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS

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 18). 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). En el Mapa 15 se muestra el análisis de la criticidad geomorfológica obtenido para la UMI La Cruz.

Tabla 16. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel de Criticidad
Depósitos Sin Incisión	1
Escarpe	3
Lomeríos Amplios	2
Lomeríos Estrechos	2
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Peldaño Tectónico	2
Superficie Antrópica	1
Vertiente Escarpada	3



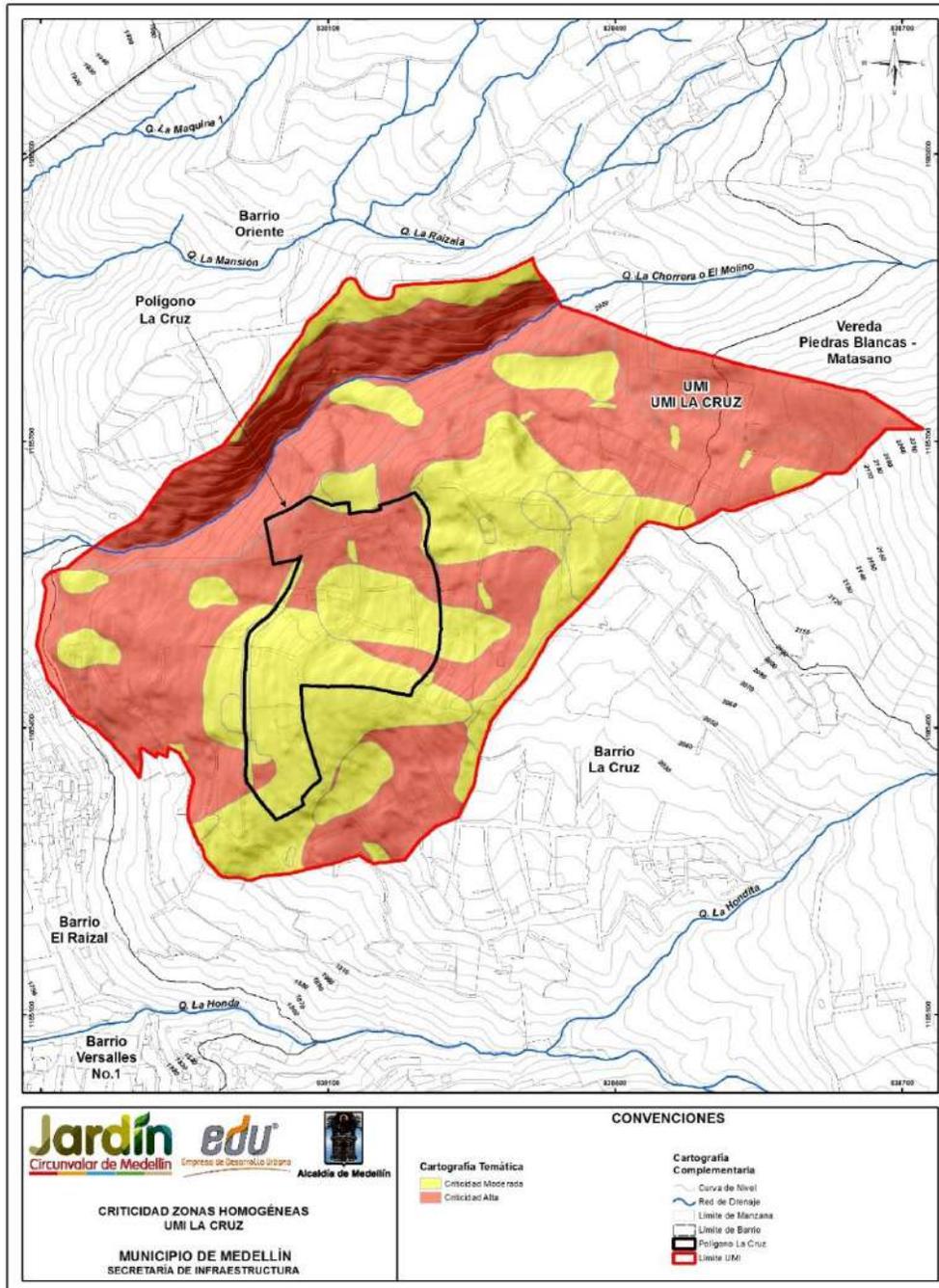
Mapa 15. Criticidad geomorfológica UMI La Cruz (LCH_CriticidadZonasGeomorfologicas_Medellin_C)

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 17.

Tabla 17. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas

Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
1	Lleno Antrópico	2
	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	2
	Depósitos (flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín	1
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
2	Lleno Antrópico	3
	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	2
	Depósitos (Flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín	2
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
3	Lleno Antrópico	3
	Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ	3
	Depósitos (Flujo de lodos y/o escombros)	3
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín	3
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	3

Finalmente, se genera el mapa de criticidad de las zonas homogéneas asignando un color para cada nivel de criticidad. El color verde se asigna para el Nivel 1 (Bajo), el color amarillo se asigna para el Nivel 2 (Moderado) y el color rojo se asigna para el Nivel 3 (Alto). Se obtuvo entonces el mapa de criticidad de zonas homogéneas que se muestra en el Mapa 16.



Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI La Cruz
(LCH_CriticidadZonasHomogeneas_Medellin_C)

7.3 MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA

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

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

Posteriormente, se definieron densidades para cada una de las UCT, con el fin de determinar concentraciones de los procesos morfodinámicos. Densidad baja es cuando se tiene menos que un proceso morfodinámico dentro de la UCT. Densidad moderada es cuando se tiene un proceso morfodinámico dentro de la UCT. Finalmente, densidad alta es cuando se tiene más de un proceso morfodinámico dentro de la UCT.

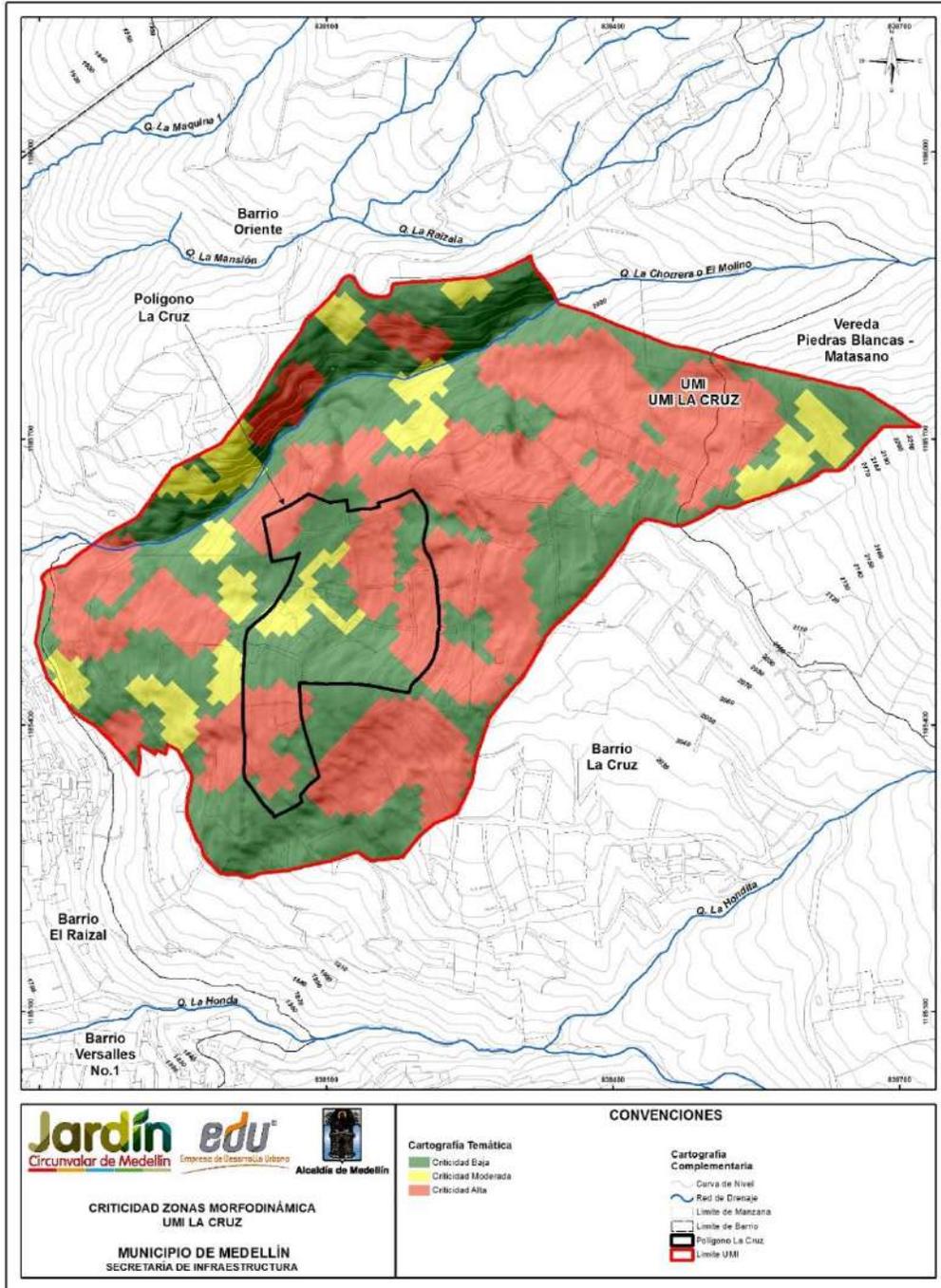
Luego de lo anterior, se hizo una zonificación de la zona de estudio de acuerdo con el grado de actividad de los procesos morfodinámicos, dividiéndose estos en activos e inactivos.

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 18.

Tabla 18. Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica

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

Una vez obtenido el mapa con la metodología planteada, se hicieron ajustes en la criticidad de las zonas, de acuerdo con lo observado en campo (método holístico). En el Mapa 17 se presenta el análisis de la criticidad morfodinámica de la UMI La Cruz 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 La Cruz
(LCH_CriticidadMorfodinamica_Medellin_C)

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

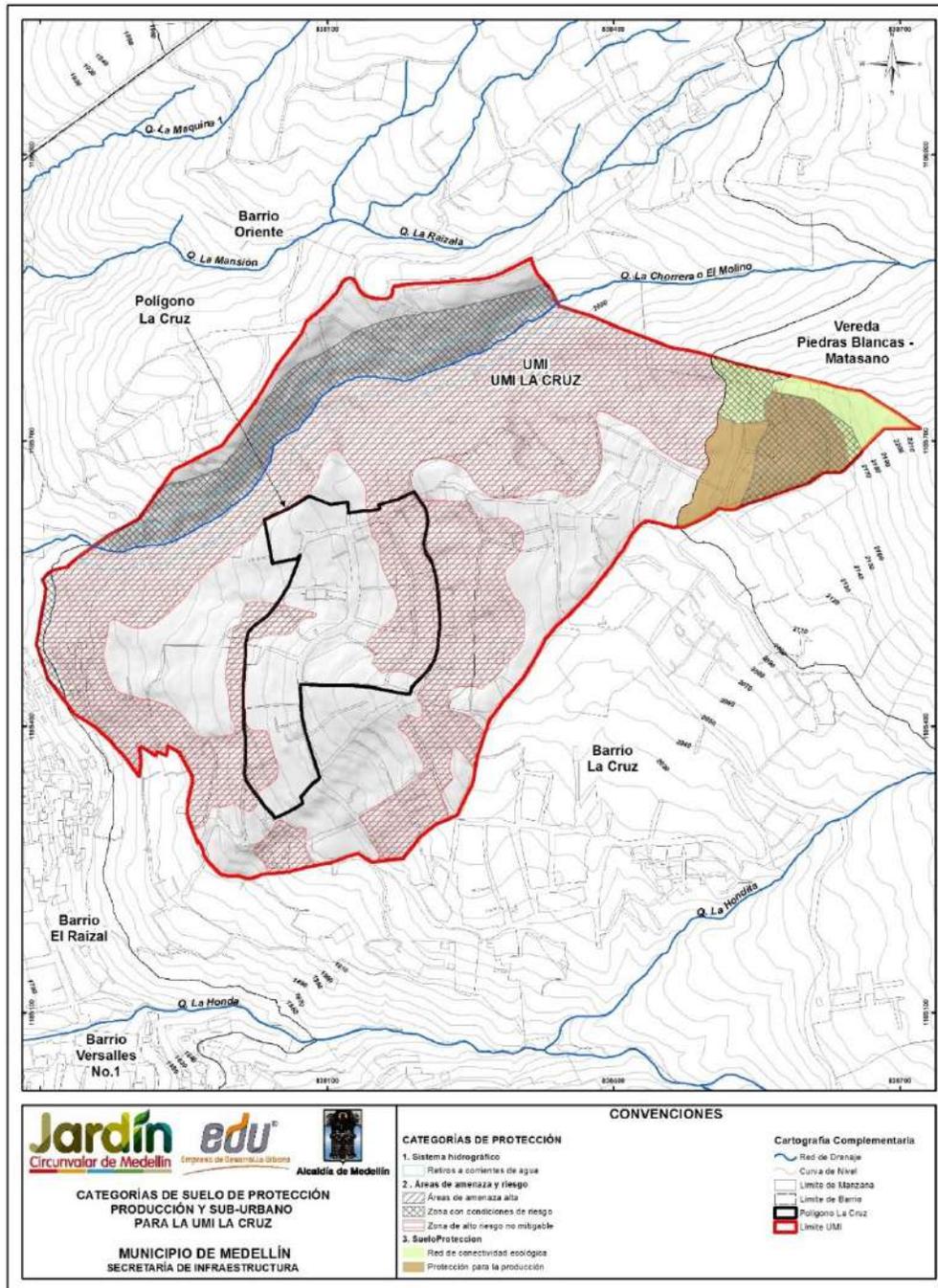
En el Mapa 20 se presenta la aptitud geológica y geotécnica de la UMI La Cruz obtenido con la metodología descrita anteriormente.

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

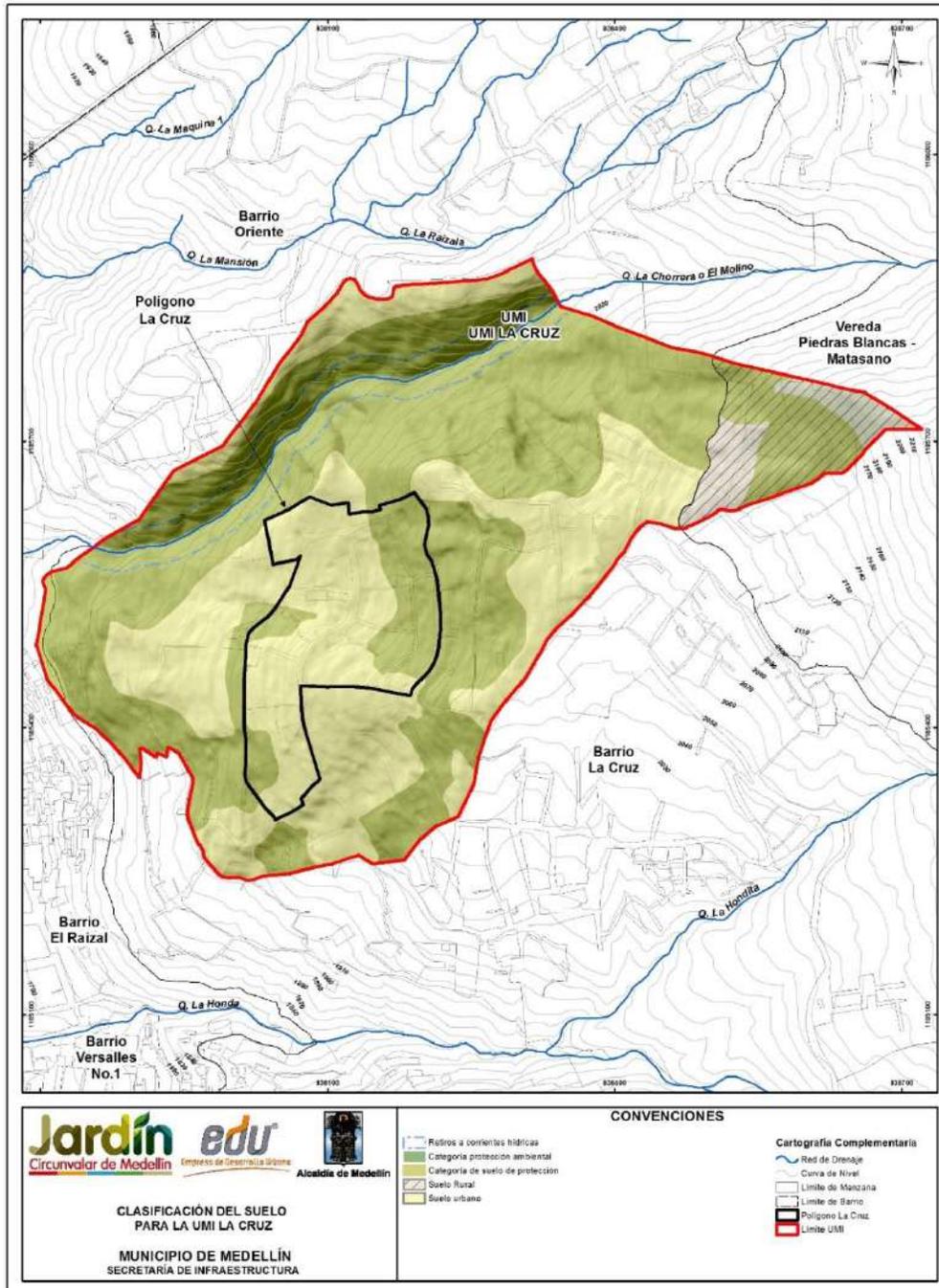
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</p>	
---	---	---

corrientes de agua, según las especificaciones del POT (2014) del municipio de Medellín, como se muestran en el Mapa 18 y en el Mapa 19 de este informe.

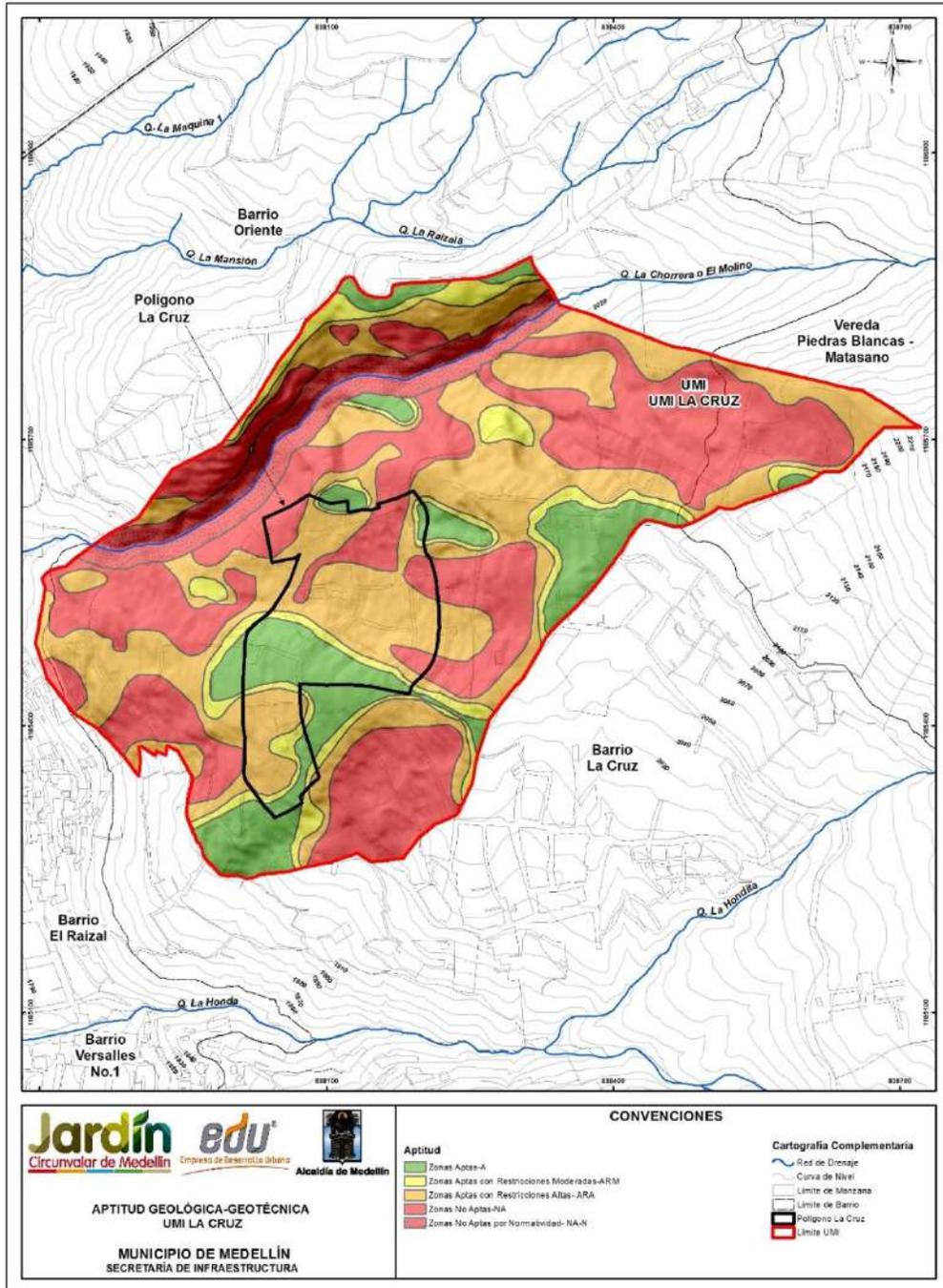
- ✓ Las zonas aptas en la UMI La Cruz se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. Al interior del Polígono La Cruz se encuentran en la parte central y sur.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones moderadas son las de menor ocurrencia en toda la UMI. Al interior del Polígono La Cruz se restringen a las franjas de transición entre zonas aptas y zonas aptas con restricciones altas.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones altas se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. Con esta clasificación se tienen áreas en la zona norte y sur del polígono en estudio.
- ✓ Las zonas no aptas se distribuyen a lo largo de toda la UMI de forma aleatoria. Con esta clasificación se tienen áreas en la zona norte y oriental del polígono La Cruz.
- ✓ La zona no apta por normatividad se encuentra en la parte occidental de la UMI dispuesta en una franja que demarca el drenaje conocido como El Molino definida por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014 como el retiro de la quebrada (Mapa 18 y Mapa 19). Los primeros 104 m que está quebrada recorre la UMI presenta un retiro de 30 m y los 485 m de longitud del drenaje dentro de la UMI el retiro aumenta a 40 m.
- ✓ En general la proporción de las zonas aptas con restricciones altas y no aptas es similar en toda la UMI. Al interior del Polígono La Cruz dominan las zonas aptas y aptas con restricciones altas.



Mapa 18. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)
(15_LCHCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_C y
15_LCHCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T)



Mapa 19. Clasificación del suelo (POT, 2014)
(14_LCHClasificaciondelSuelo_Medellin_C y 14_LCHClasificaciondelSuelo_Medellin_T)



Mapa 20. Aptitud Geológica - Geotécnica UMI La Cruz
(18_LCHAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_C y
18_LCHAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 59 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 59. Localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico

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 60 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:

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

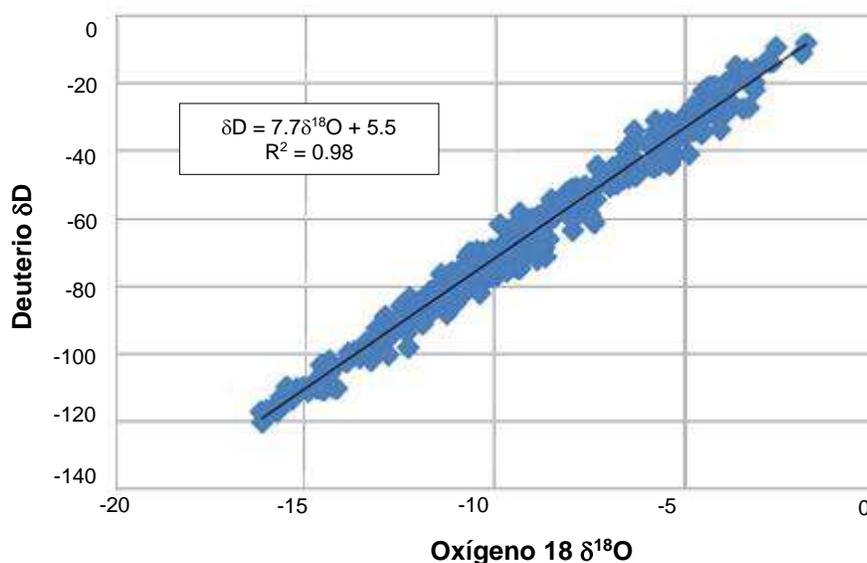


Figura 60. Recta Meteórica para Colombia

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada en la Figura 60 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 61). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

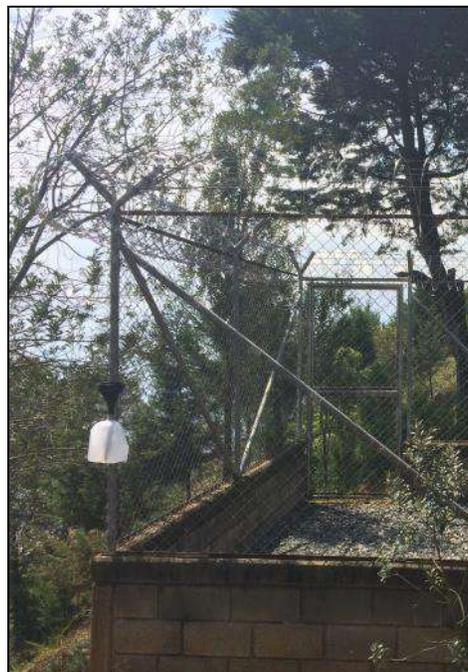
Específicamente en la Tabla 19 y en la Tabla 20 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 62 muestra gráficamente la relación Deuterio : Oxígeno 18 de estas muestras, diferenciando las aguas lluvias de las aguas de manantiales. Se 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 60 vs. Figura 62). 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 61. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio

Tabla 19. 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

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

Tabla 19. 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 20. Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

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

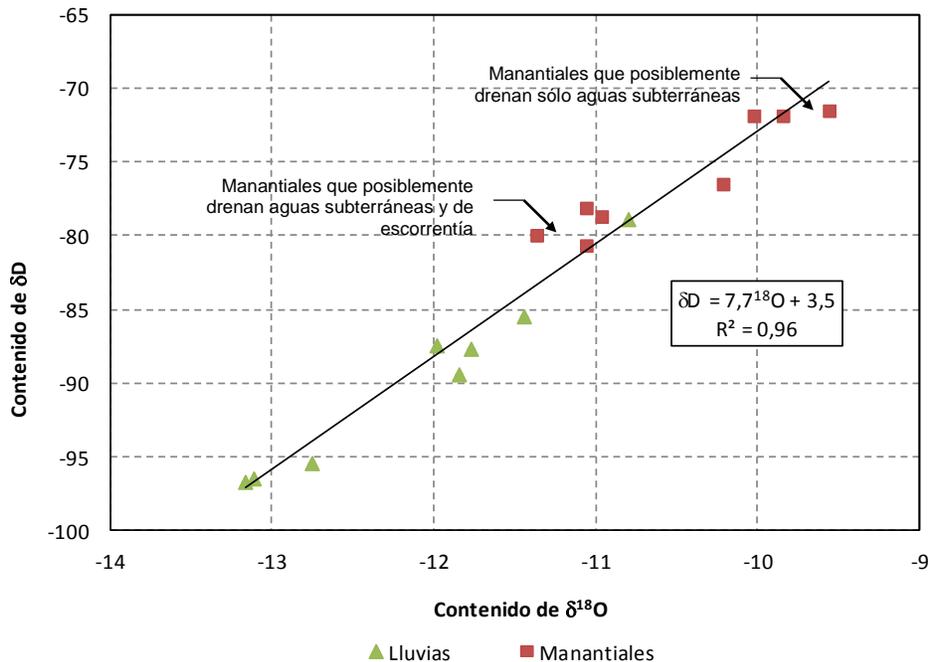
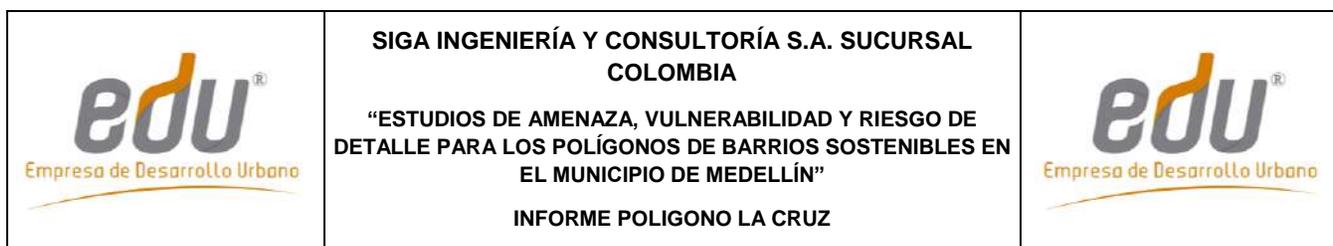


Figura 62. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental

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 63 y Figura 64 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 20 y complementados con los de la Tabla 21. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 65 y la Figura 66.

Tabla 21. 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.

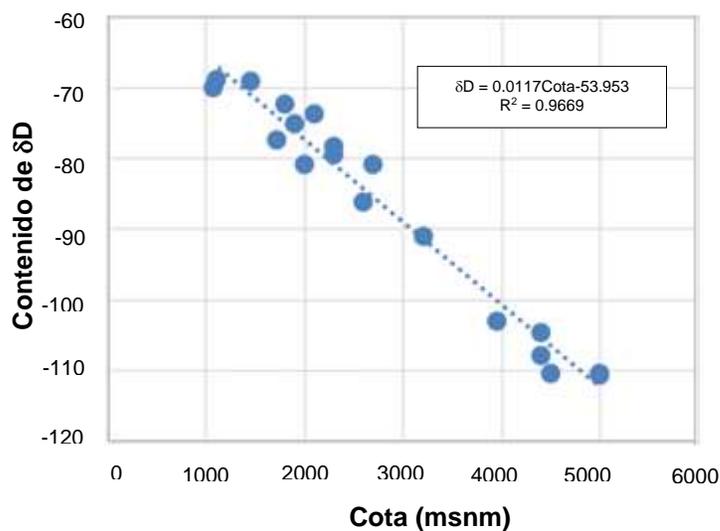


Figura 63. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

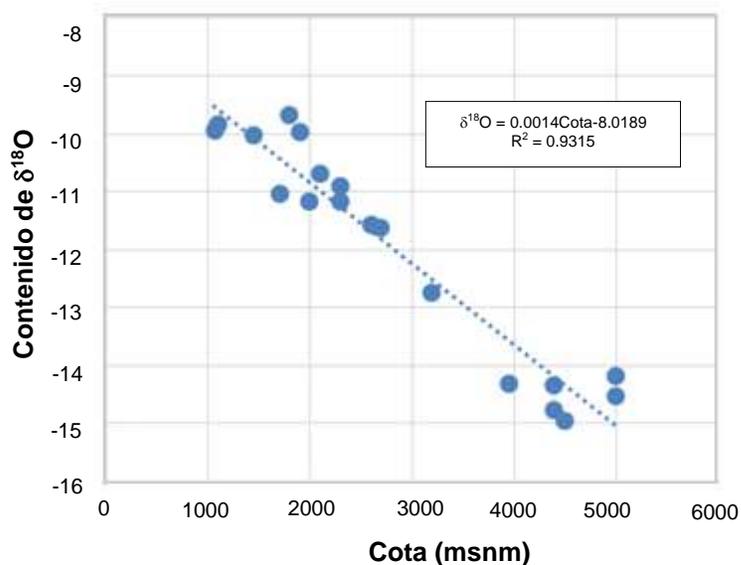


Figura 64. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

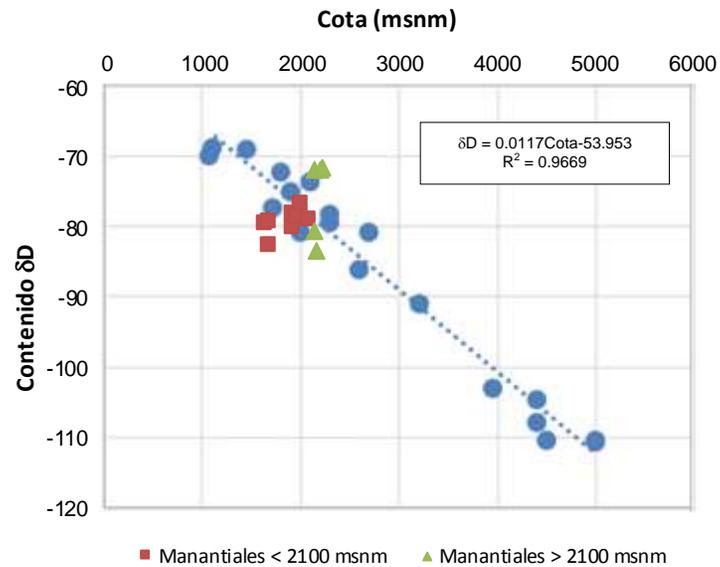


Figura 65. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

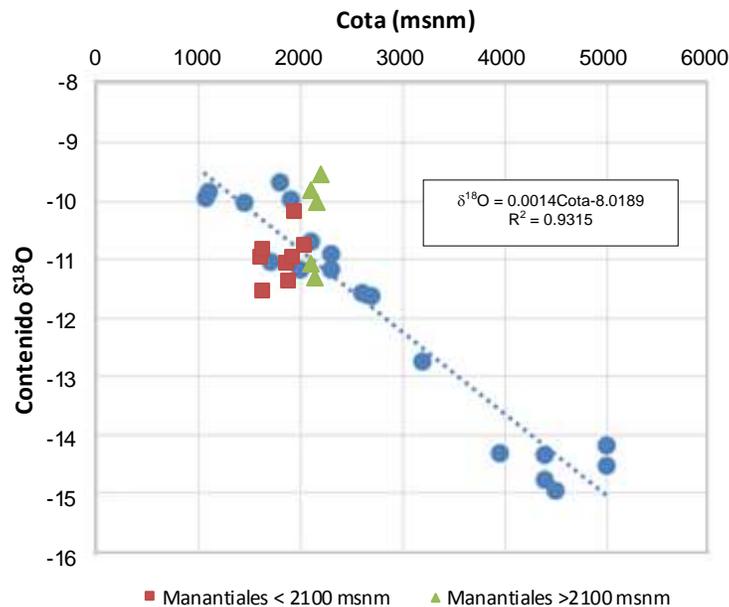


Figura 66. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

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

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

Tabla 22. 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-23	07/09/12	848135.78	1174466.79	2222	-81.9	-11.62	Quebrada Yarumal
TAO-28	07/09/12	839194.59	1179766.66	1933	-81.0	-11.13	Seminario Redemptoris Mater
TAO-31	07/09/12	843996.88	1178177.29	2570	-84.8	-11.71	Quebrada El Cartucho Acceso a Montevivo
TAO-32	07/09/12	844073.75	1178170.94	2575°	-83.9	-11.62	Acueducto San Ignacio, Santa Elena
CON-05	13/10/10	840045.51	1192802.63	1295	-77.8	-10.40	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-06	13/10/10	840045.49	1192796.48	1295	-78.0	-10.57	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-08	13/10/10	840054.74	1192805.67	1305	-74.0	-9.58	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-21	12/11/10	840076.26	1192802.54	1295	-78.7	-10.56	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-22	12/11/10	840054.67	1192778.02	1305	-75°4	-9.68	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-23	12/11/10	840134.67	1192802.38	1335	-78.6	-10.71	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-24	12/11/10	840134.65	1192796.23	1340	-77.3	-10.61	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-25	12/11/10	840060.70	1192738.05	1360	-79.9	-10.85	Fosa de grava CONASFALTOS
HV-286	No Conocida	839485.94	1189494.67	1885	-80.2	-9.50	Rellano al sur de Planta Manantiales, EPM
HV-297	No Conocida	839410.99	1180180.91	1880	-78.3	-10.85	Vía Medellín Rionegro
HV-351	No Conocida	844896.06	1177471.23	2600	-84.3	-11.73	Santa Elena
HV-352	No Conocida	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 67 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 22 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 20. 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.

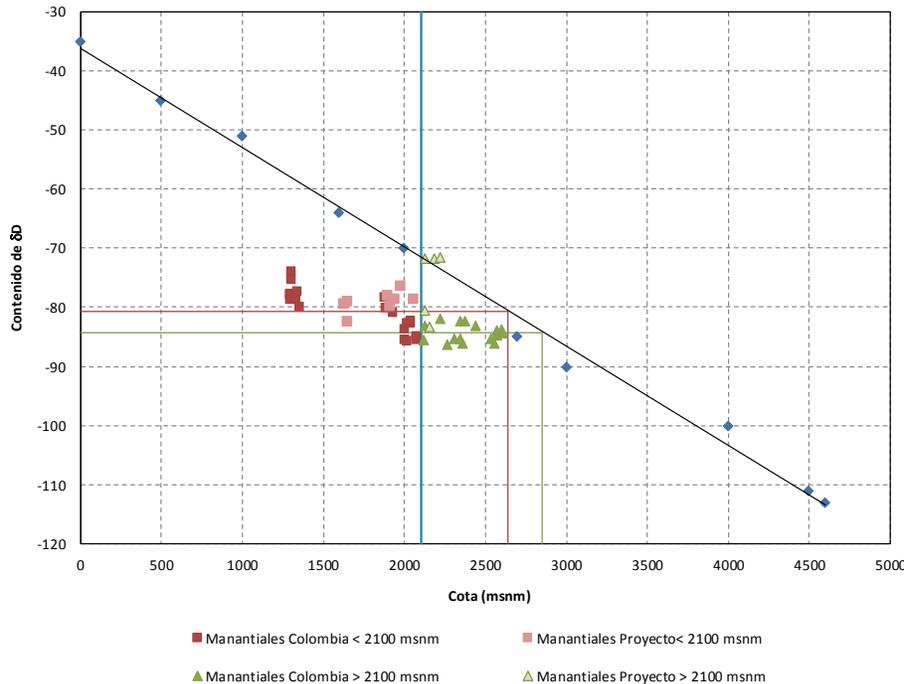


Figura 67. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)

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 67 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

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

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.

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

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

en cuenta que estas muestras fueron colectadas sin tener en cuenta las condiciones de lluvia antecedente.

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 68. Los límites del sistema pueden definirse por las vaguadas de los Ríos Negro y Medellín, las Quebradas Santa Elena, Yarumal y La Mosca.

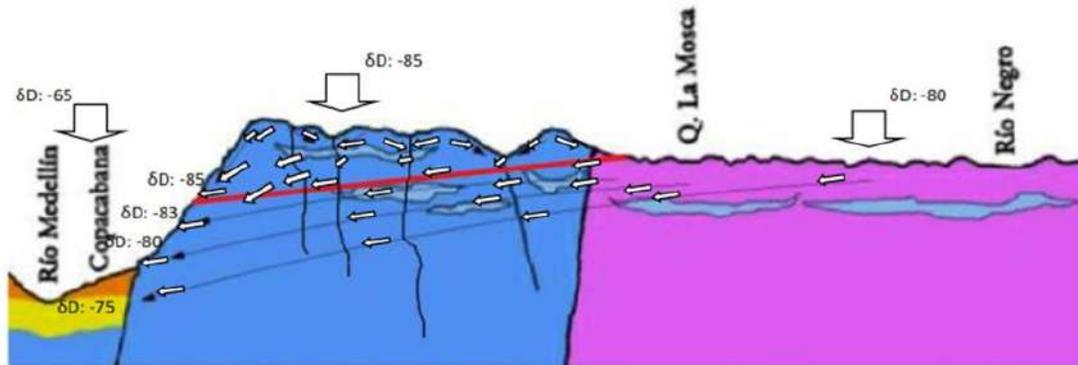
8.5.1 Zonas de recarga

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.

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.



CONVENCIONES

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

Figura 68. 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

8.5.3 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 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.

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

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.

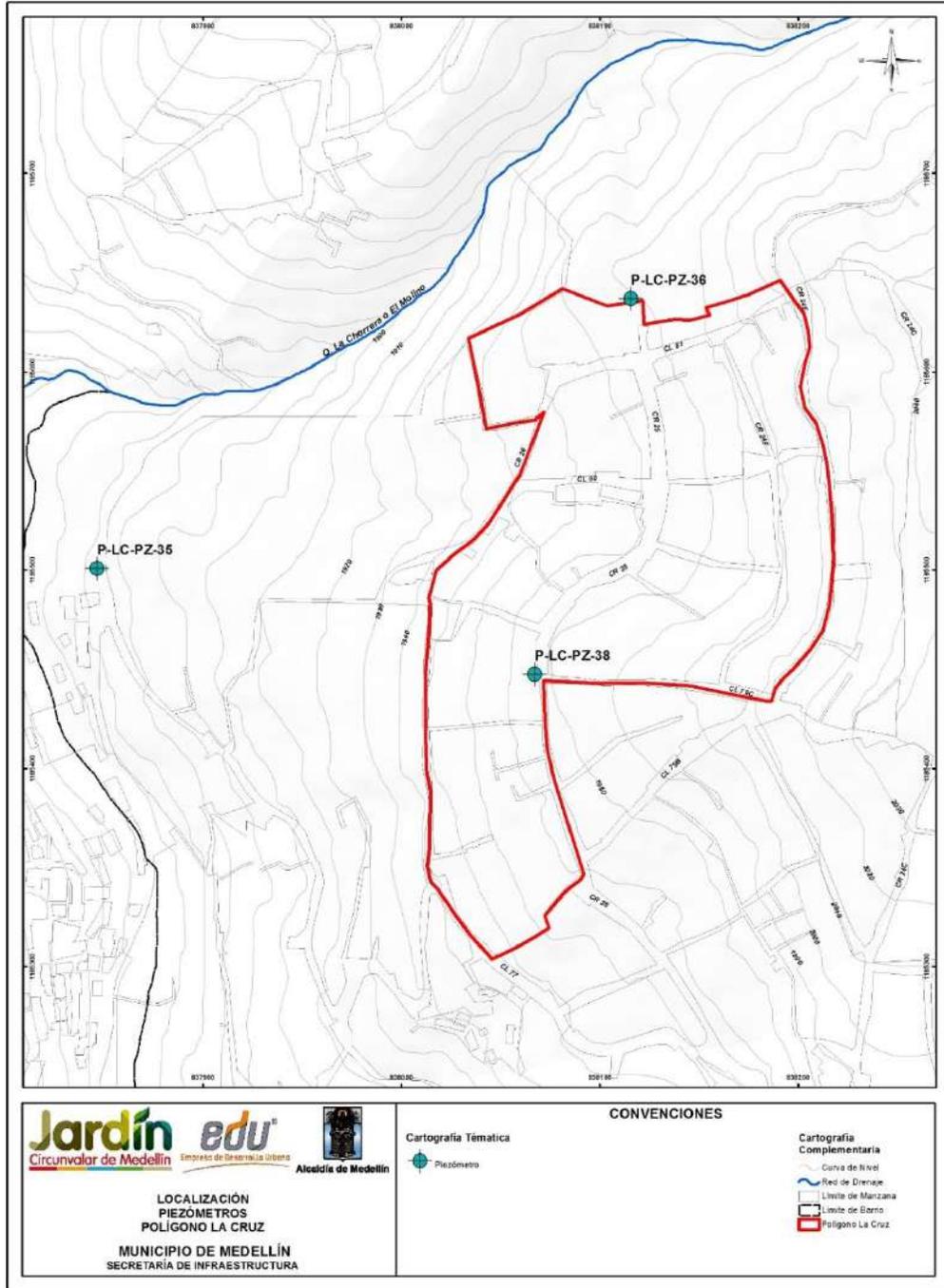
8.5.4 Zonas de descarga

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 del 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 La Cruz, se hicieron recorridos de campo detallados con el fin específico de levantar los manantiales existentes. No fue posible levantar ninguno. De esta forma, se determina 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. En el caso del Polígono La Cruz, los piezómetros fueron localizados en las en las Perforaciones P-LC-PR-35, P-LC-PR-36 y P-LC-PR-38, como se muestra en el Mapa 21 del presente informe.



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

Los piezómetros instalados fueron denominados como Piezómetros P-LC-PZ-35B, P-LC-PZ-35D, P-LC-PZ-36B, P-LC-PZ-36D, P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D (Figura 69).

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

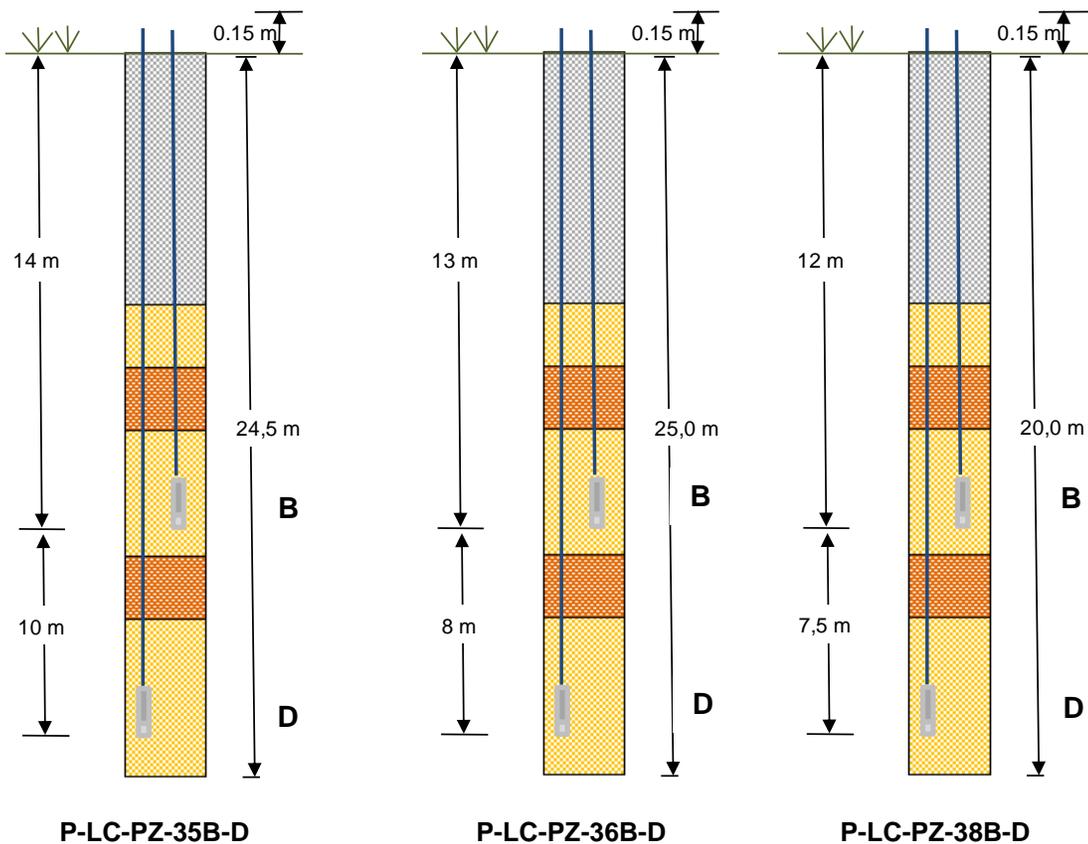


Figura 69. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil

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

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

De estos equipos se vienen haciendo lecturas continuas de las presiones de poros, valores con base en los cuales se calculan las correspondientes cotas piezométricas. De la Figura 70 y la Figura 72 se presentan 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 08 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 La Cruz.

8.6.1 Piezómetros P-LC-PZ-35 B y P-LC-PZ-35 D

La Figura 70 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-LC-PZ-35 B y D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo.

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-LC-PR-35, vale la pena destacar el hecho de que en la perforación fue detectado el nivel freático a 17 m de profundidad. Sin embargo, de acuerdo con lo registrado por el Piezómetro P-LC-PZ-35D, puede establecerse un nivel de aguas subterráneo aproximadamente en la cota 1847 msnm.

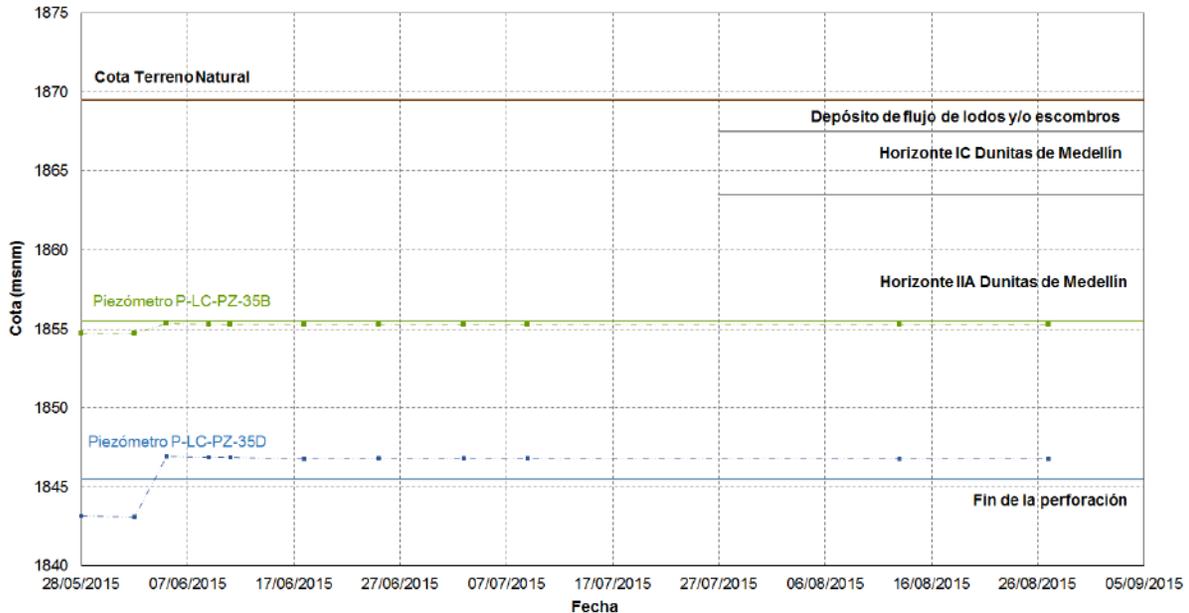


Figura 70. Cotas piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-35B y P-LC-PZ-35D

8.6.2 Piezómetros P-LC-PZ-36B y P-LC-PZ-36D

La Figura 71 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-LC-PZ-36 B y D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo.

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-LC-PR-36, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

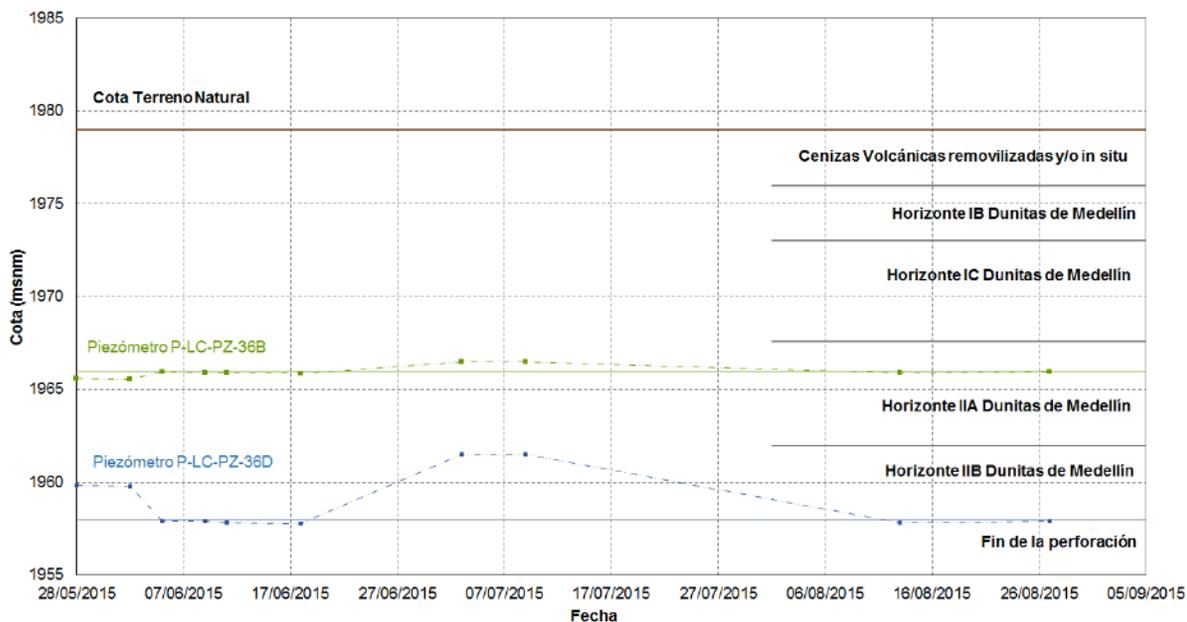


Figura 71. Cotas piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-36B y P-LC-PZ-36D

8.6.3 Piezómetros P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D

La Figura 71 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo.

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-LC-PR-38, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas pero que dan cuenta de un nivel de aguas subterráneas que ha ascendido hasta la cota 1942.5 msnm.

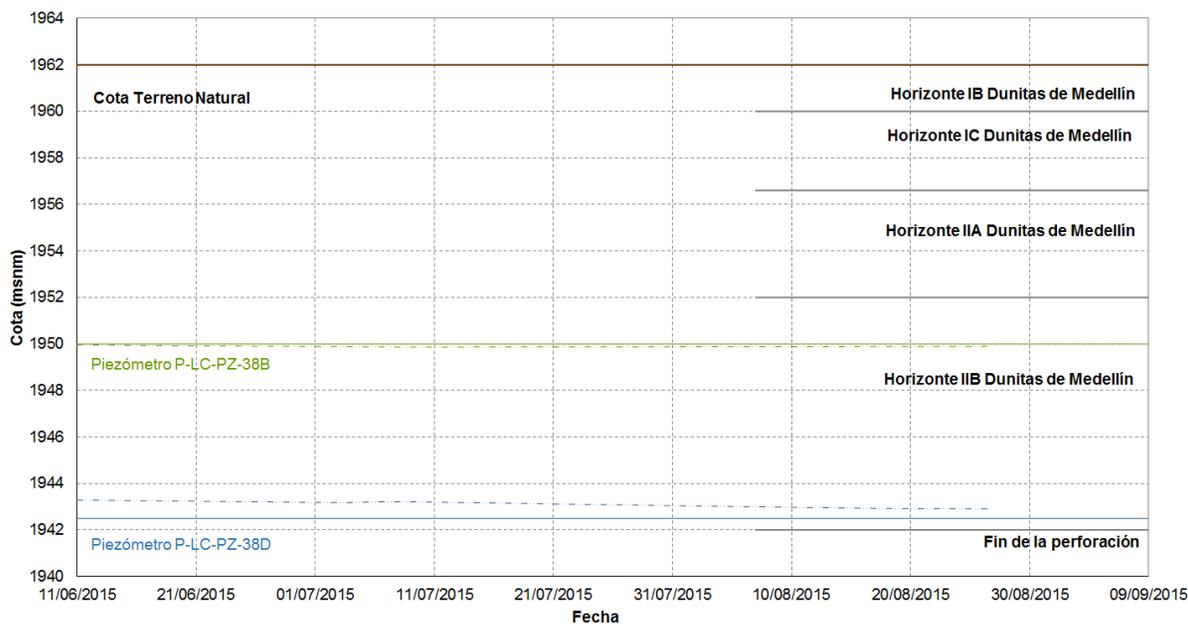


Figura 72. Cotaciones piezométricas en Piezómetros P-LC-PZ-38B y P-LC-PZ-38D

8.6.4 Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto

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

La instrumentación instalada en la UMI La Cruz, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, ayudaron a interceptar el flujo subterráneo regional.

Las condiciones de flujo del agua subterránea en la UMI La Cruz pueden ser esquematizadas entonces en la red de flujo que se presenta en la Figura 73. Las líneas equipotenciales fueron definidas a partir de los manantiales levantados en campo, incluyendo los nacimientos de las quebradas en la zona de estudio. También se tuvo en cuenta la línea de drenaje superficial con corrientes permanentes (Quebrada La Chorrera), 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.

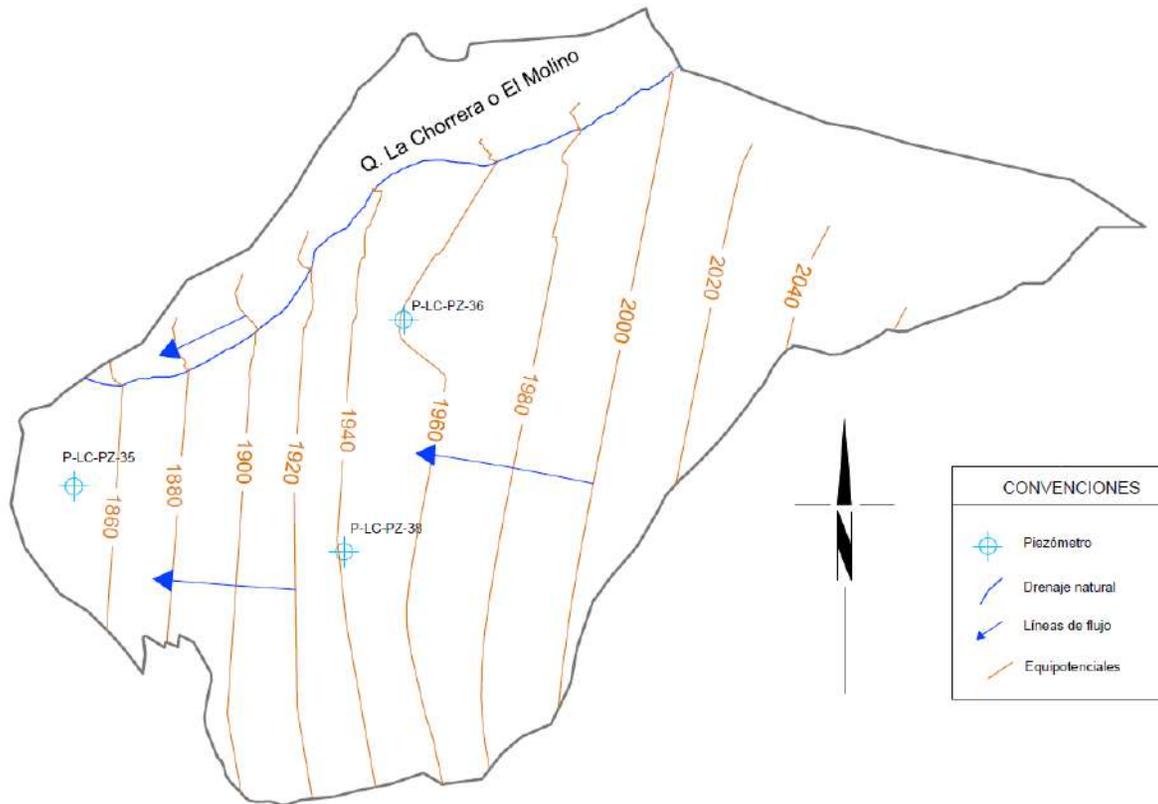


Figura 73. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono La Cruz

En la Figura 90 se han colocado los piezómetros instalados en la UMI La Cruz, cuyas cotas piezométricas fueron de utilidad para trazar las líneas equipotenciales y las correspondientes líneas de flujo.

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.

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

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

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

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

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

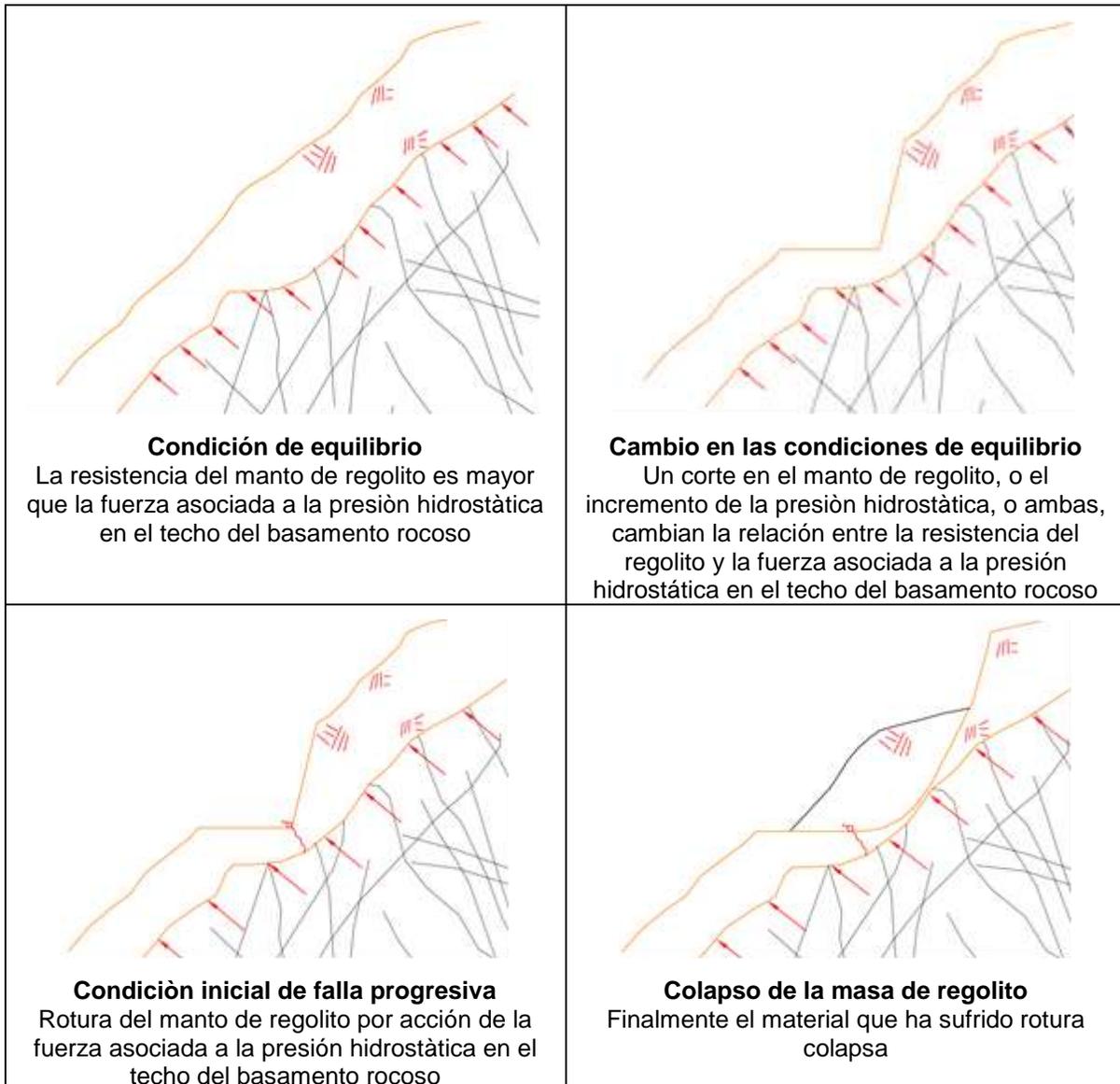


Figura 74. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica

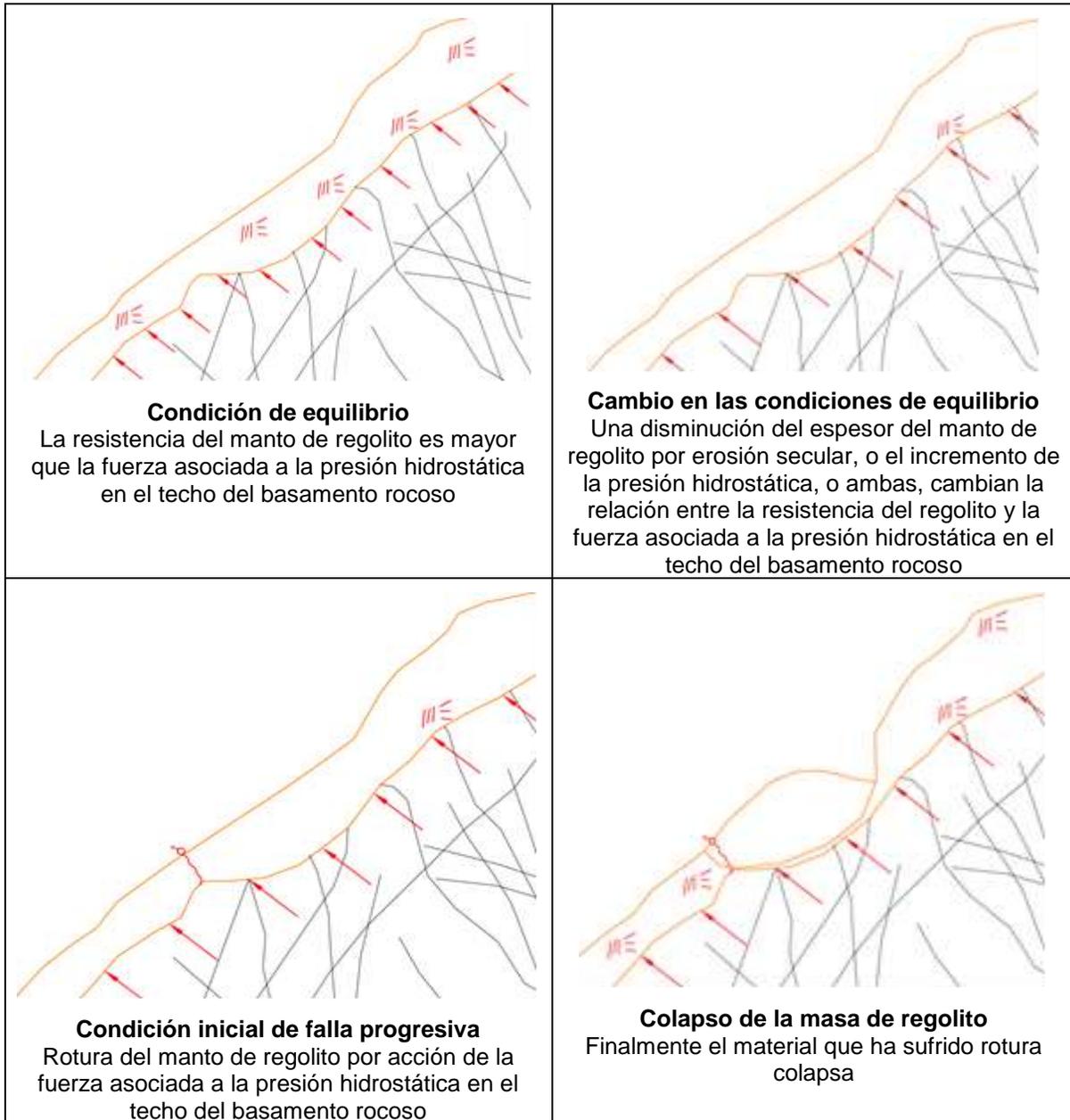


Figura 75. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica

9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 76 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 La Cruz.

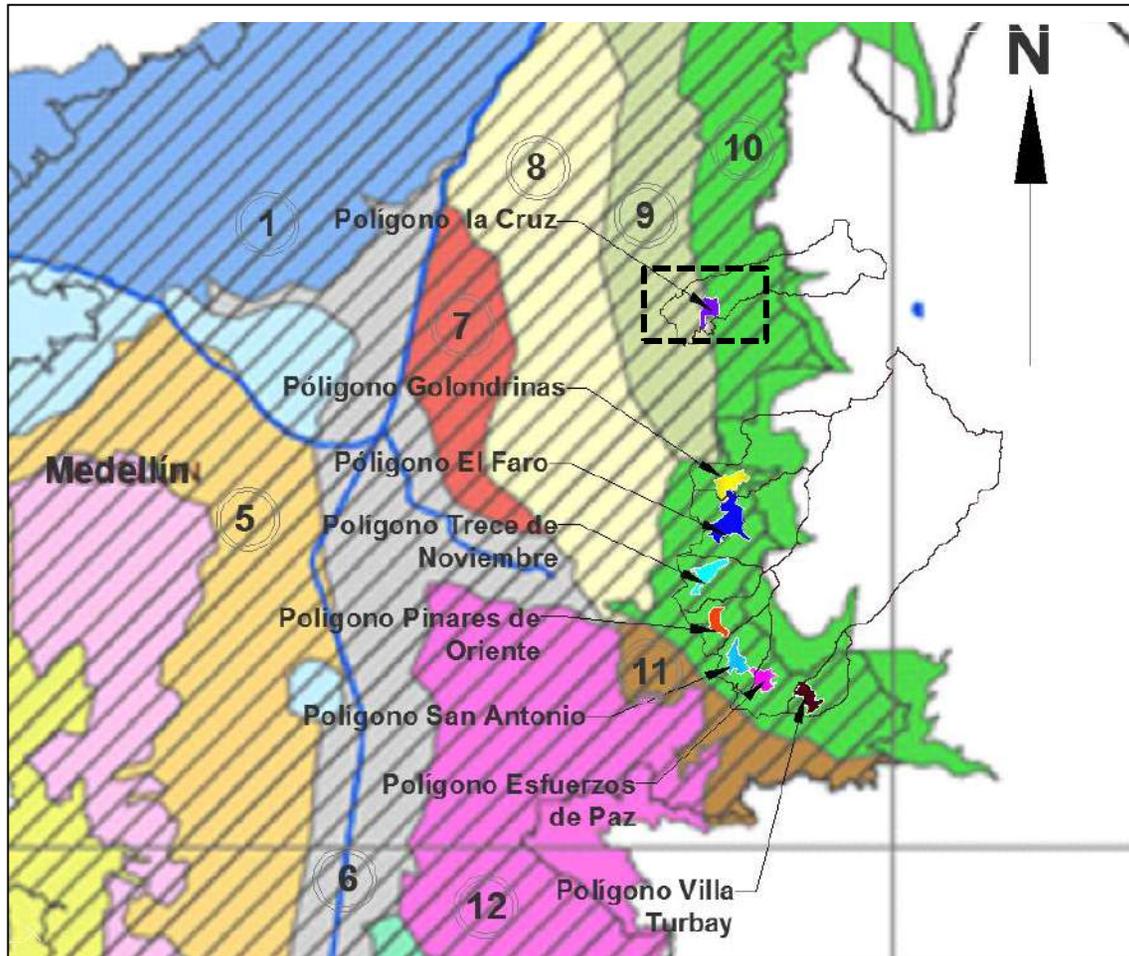


Figura 76. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)

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, 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.

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

El Polígono La Cruz, que también hace parte del Proyecto Barrios Sostenibles y que es objeto principal del presente estudio, se encuentra ubicado entre las Zonas Homogéneas 9 y 10. Según la MZSM (1999), la Zona Homogénea 9 corresponde a los suelos residuales de la anfibolita. De acuerdo con la geología local del Polígono La Cruz, se tiene que las unidades geológicas encontradas corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín. Por esto, en el Polígono La Cruz prevalece la 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 (Numeral 4.2), 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 23 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). En la UMI La Cruz, la unidad geológica predominante corresponde a las Dunitas de Medellín (JKuM), los cuales son suprayacidos por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), cenizas volcánicas remolivizadas y/o insitu (Qcv) y, 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 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 La Cruz se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

Tabla 23. 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 24).

Tabla 24. 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.

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

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 La Cruz. 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.

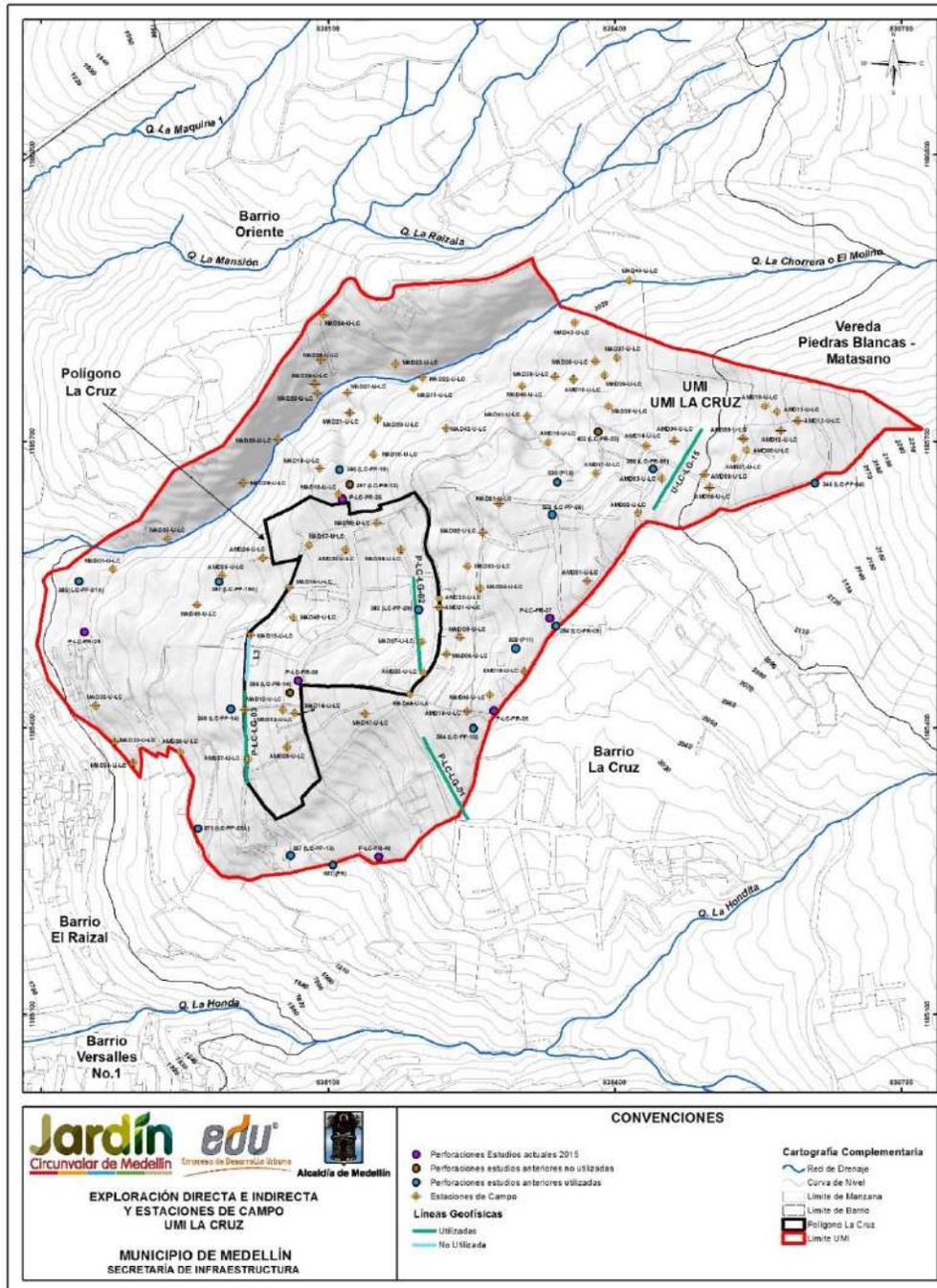
10.1.1 Perforaciones

En total se realizaron seis perforaciones a rotación, dentro de la UMI La Cruz correspondientes a las Perforaciones P-LC-PR-35, P-LC-PR-36, P-LC-PR-37, P-LC-PR-38, P-LC-PR-39 y P-LC-PR-40.

Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI también fue considerada la información obtenida de 15 perforaciones realizadas en estudios anteriores por INTEINSA (2011) y DEACIVIL (2014). Las perforaciones correspondientes a cada estudio son mostradas en la Tabla 25, en la que 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.

En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el proyecto y los de estudios anteriores que fueron considerados.

De la Figura 77 a la Figura 83 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos. Se exceptúan las Perforaciones 390 (LC-PR-05) y 394 (LC-PR-09) en las que no se realizó el ensayo de penetración estándar. Adicionalmente, se ha incluido en las figuras la estratigrafía y la profundidad del nivel freático donde fue detectado. Luego de presentadas estas figuras, se hacen algunos comentarios generales de interés sobre la estratigrafía que pudo ser determinada con base en estos sondeos. La descripción efectuada corresponde con la descripción geológica de los materiales presentada en el Numeral 4.2 de este informe.



Mapa 22. Localización de la exploración directa e indirecta (13_LCHExploracion_Medellin_C y 13_LCHExploracion_Medellin_T)

Tabla 25. Exploración geotécnica utilizada en la UMI La Cruz

	Perforación	Prof. (m)	Prof. N.F (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
Proyecto (2015)	P-LC-PR-35	24.2	17.0	1872.8	837845.167	1185499.351
	P-LC-PR-36	25.0	Seco	1979.5	838115.177	1185639.135
	P-LC-PR-37	20.0	Seco	2062.3	838332.051	1185514.727
	P-LC-PR-38	20.0	Seco	1978.4	838068.924	1185448.760
	P-LC-PR-39	20.0	Seco	2045.9	838273.320	1185417.291
	P-LC-PR-40	20.0	Seco	1962.6	838153.404	1185263.979
Inteinsa (2011)	27 (P9)	20.00	Seco	1954.2	838105.415	1185255.524
	29 (P11)	20.00	11.2	2051.1	838296.336	1185482.683
	30 (P12)	20.00	6.4	2056.8	838339.822	1185656.604
Deacivil (2014)	345 (LC-PP-04)	9.45	Seco	2144.2	838610.035	1185655.848
	352 (LC-PP-08)	10.45	Seco	2064.6	838334.604	1185622.664
	354 (LC-PP-10)	10.45	Seco	2035.8	838252.326	1185398.971
	357 (LC-PP-13)	10.45	Seco	1940.0	838060.687	1185265.744
	358 (LC-PP-14)	10.45	Seco	1939.6	837998.157	1185419.182
	366 (LC-PP-19)	10.45	Seco	1974.2	838112.389	1185669.879
	367 (LC-PP-19A)	7.45	Seco	1920.6	837986.042	1185552.427
	371 (LC-PP-22A)	10.45	Seco	1912.2	837963.722	1185294.101
	380 (LC-PP-29)	10.45	Seco	2000.9	838195.003	1185523.205
	383 (LC-PP-31A)	10.45	Seco	1866.7	837839.130	1185552.826
	390 (LC-PR-05)	20.00	Seco	2081.7	838440.441	1185670.888
	394 (LC-PR-09)	20.00	5.0	2061.9	838338.449	1185505.933

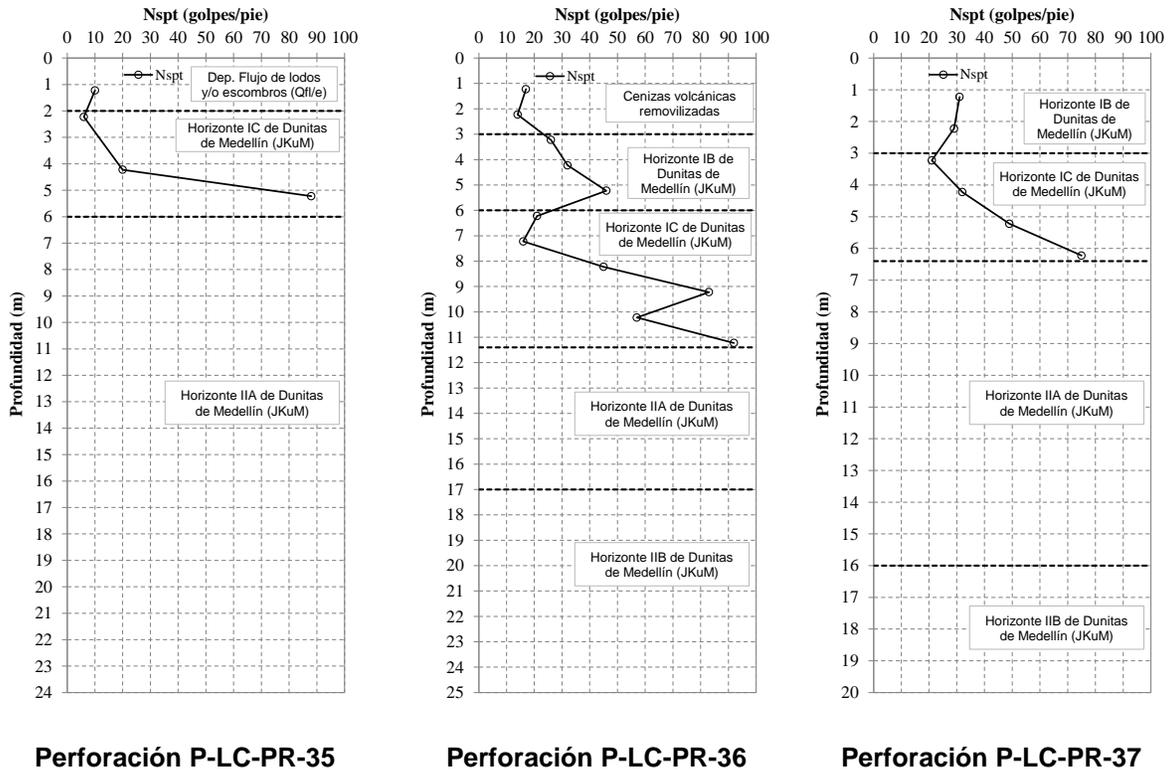


Figura 77. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz

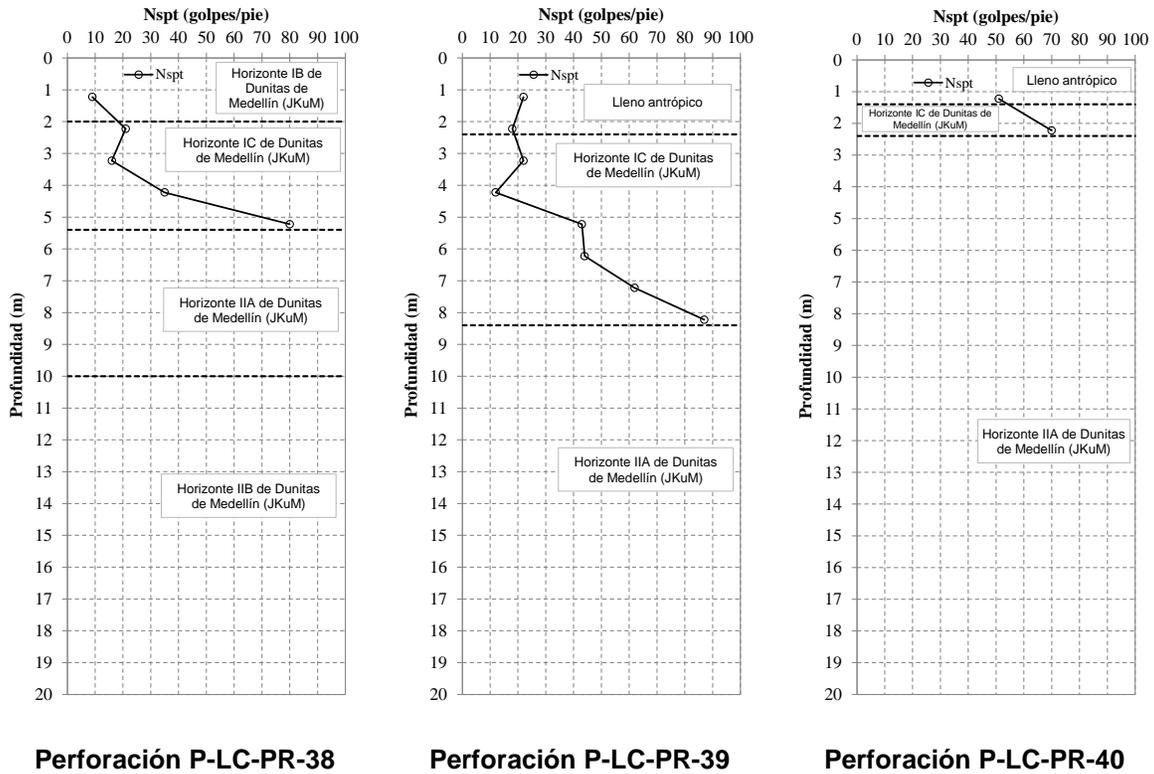


Figura 78. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)

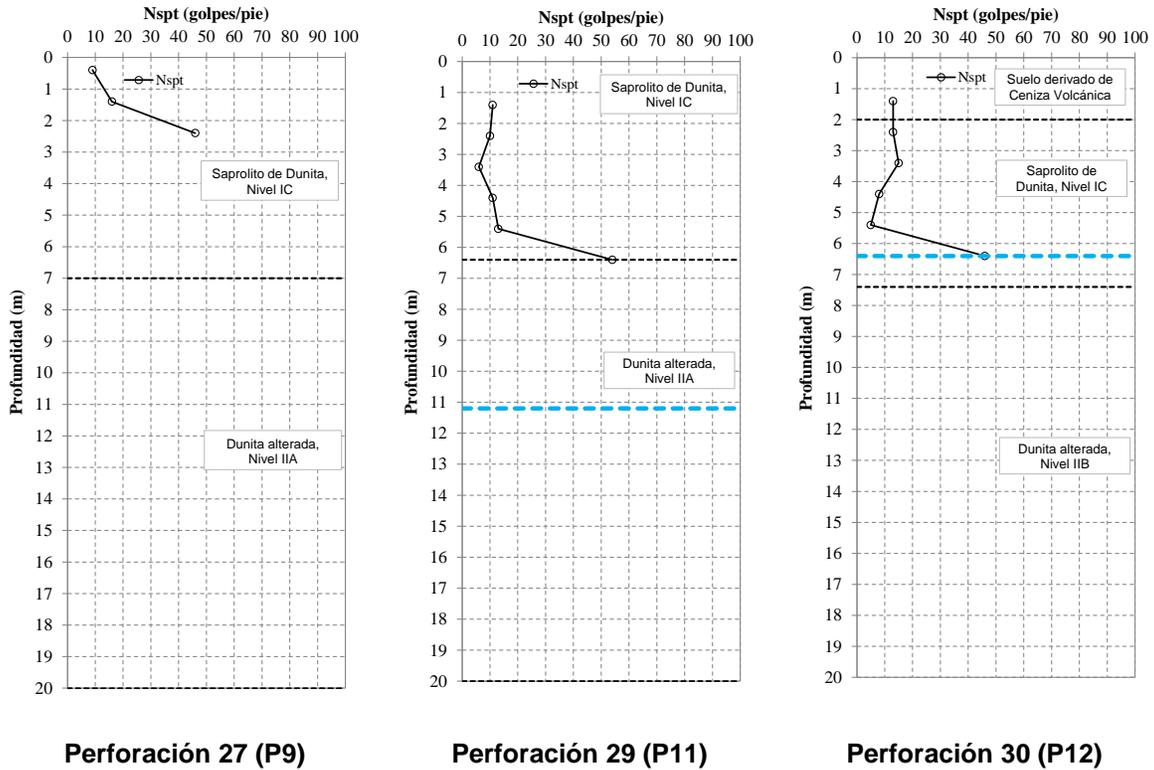
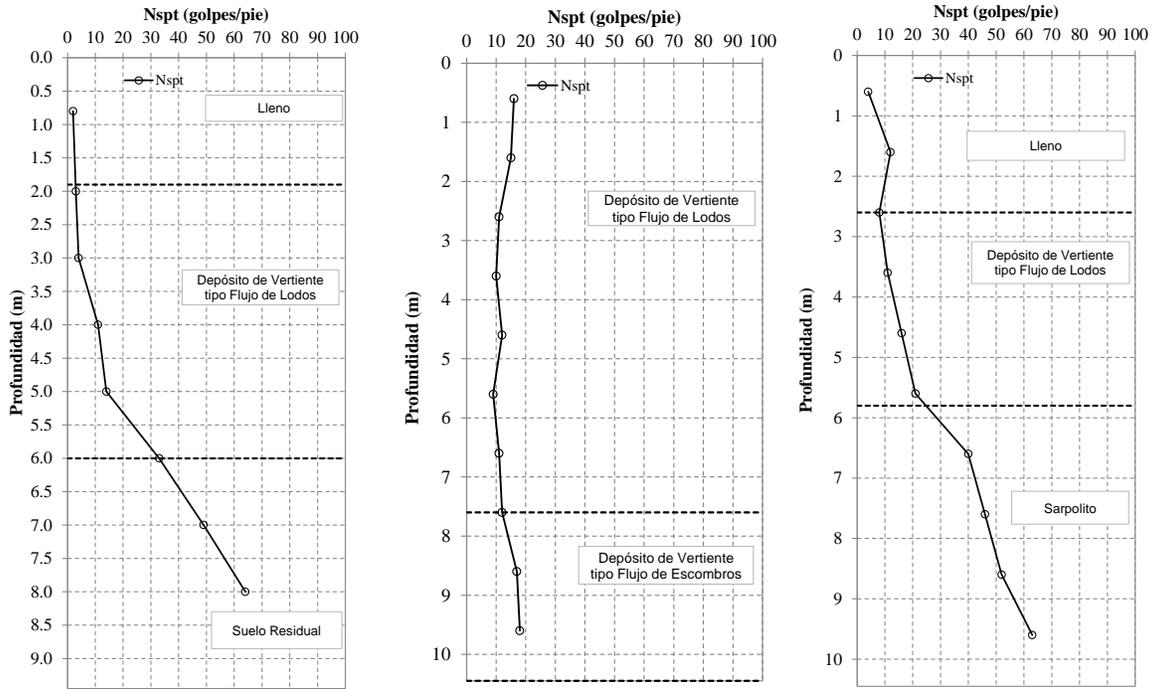


Figura 79. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)

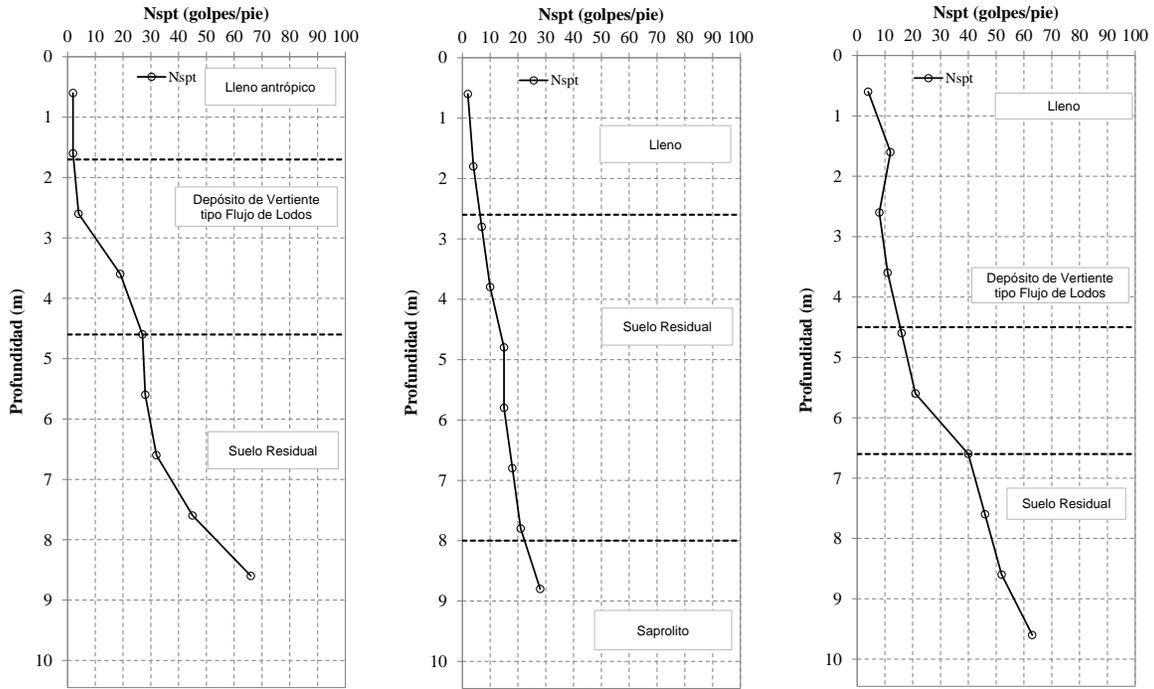


Perforación 345 (LC-PP-04)

Perforación 352 (LC-PP-08)

Perforación 354 (LC-PP-10)

Figura 80. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)

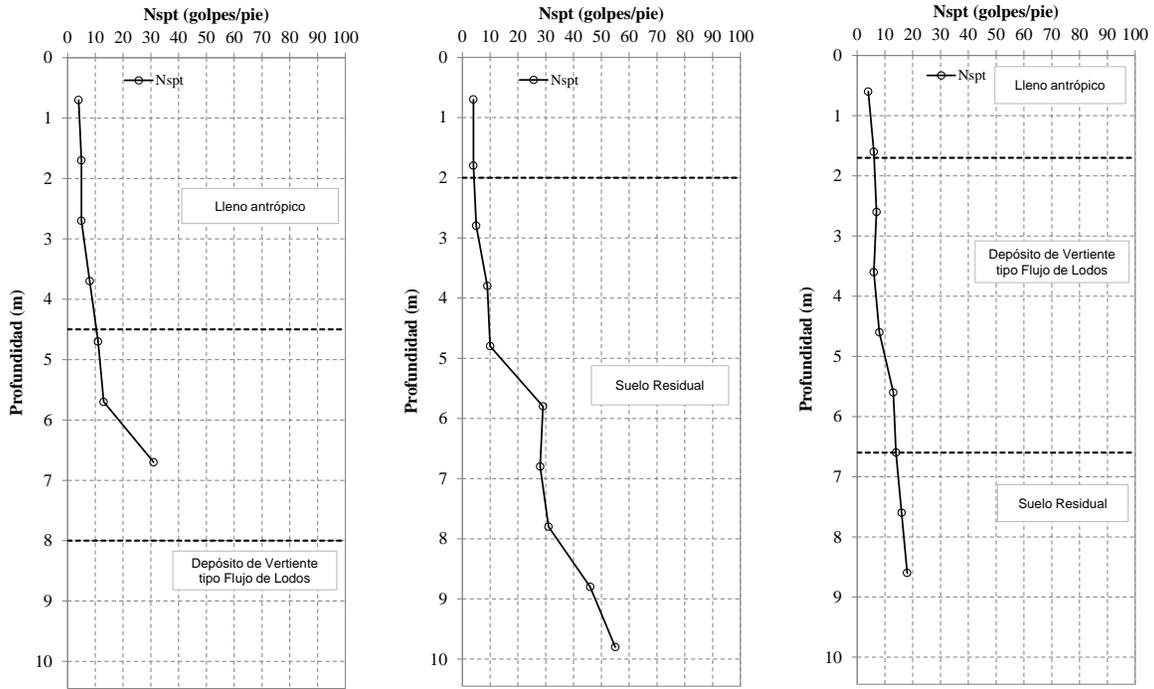


Perforación 357 (LC-PP-13)

Perforación 358 (LC-PP-14)

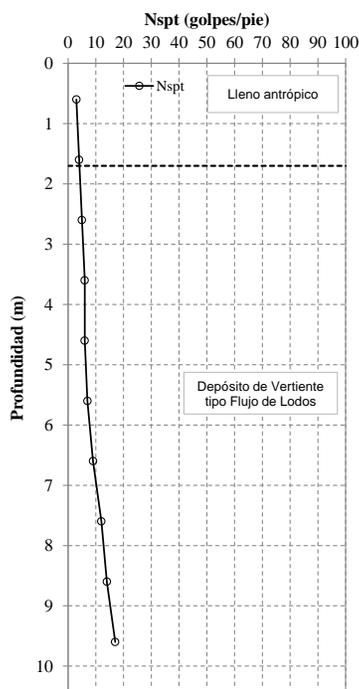
Perforación 366 (LC-PP-19)

Figura 81. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)



Perforación 367 (LC-PP-19A) Perforación 371 (LC-PP-22A) Perforación 380 (LC-PP-29)

Figura 82. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)



Perforación 383 (LC-PP-31A)

Figura 83. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI La Cruz (Continuación)

En la UMI La Cruz se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 5 m y 24 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.7 m y 4.5 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-LC-PR-39, P-LC-PR-40, 345 (LC-PP-04), 354 (LC-PP-10), 357 (LC-PP-13), 358 (LC-PP-14), 366 (LC-PP-19) y 380 (LC-PP-29), 383 (LC-PP-31A), suprayaciendo los suelos residuales, Depósitos de Vertiente tipo Flujo de Lodos y Horizonte IC de Dunitas de Medellín. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 2 golpes/pie e incluso 51 golpes/pie.

En la Perforación U-EFG-PP-01 fue identificado un cuerpo de ceniza volcánica removilizada y/o in situ de 2.0 m de espesor. Éste material presenta resistencias a la penetración estándar promedio de 13 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen los depósitos de flujo de lodos y/o escombros, y en algunas zonas Horizonte IC de Dunitas de Medellín. Se encuentran ocho cuerpos distribuidos en la parte superior, central y baja de la UMI. Estos depósitos fueron identificados en las Perforaciones P-LC-PR-35, 345 (LC-PP-04), 352 (LC-PP-08), 354 (LC-PP-10), 357 (LC-PP-13), 367 (LC-PP-19A), 371 (LC-PP-22A),

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

380 (LC-PP-29). La resistencia a la penetración varía considerablemente entre 2 golpes/pie y 33 golpes/pie, entre la superficie y 10.5 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-LC-PR-35, P-LCPR-36, P-LC-PR-40, 27 (P9), 30 (P12). 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 6 golpes/pie y 92 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-LC-PR-37, P-LC-PR-38, P-LC-PR-39 y 29 (P11).

10.1.2 Líneas geofísicas

En la UMI La Cruz se realizaron cuatro líneas geofísicas, denominadas P-LC-LG-01, P-LC-LG-02, P-LC-LG-03, U-LC-LG-15. En cada una se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor): Adicionalmente, para complementar el análisis geológico geotécnico se consideró la Línea Geofísica Línea 3 realizada por Bioexplora (2005). Esta Línea fue realizada paralela a la vía de la Carrea 26, límite occidental del Polígono, con el fin de verificar la extensión del lleno localizado debajo de la vía. La localización en planta de las líneas geofísicas realizadas se muestra en el Mapa 13_LCHExploracion_Medellin_T y en el Mapa 22 de este informe.

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).

En la Tabla 26 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los ensayos ReMi ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

Tabla 26. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI La Cruz

Nomenclatura	Coordenada inicial		Cota Inicial	Coordenada final		Cota Final
	ESTE	NORTE		ESTE	NORTE	
P-LC-LG-01	838246.12	1185303.85	2011.45	838199.75	1185388.37	2012.00
P-LC-LG-02	838196.36	1185460.21	2009.52	838189.24	1185556.31	1999.39
P-LC-LG-03	838013.07	1185437.12	1949.54	838014.89	1185342.34	1939.48
U-LC-LG-15	838440.82	1185628.89	2088.98	838491.00	1185711.86	2093.81
L3	838014.63	1185450.44	1948.54	838017.37	1185493.59	1944.59

En la Figura 84 se 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-LC-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 85, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 86 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 8.75 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 350 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia media firme.
- ✓ Una capa intermedia entre 8.70 m y 27.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 550 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.
- ✓ Una capa más profunda desde los 27.0 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 715 m/s, la cual puede definirse como una zona de transición entre suelo y roca.

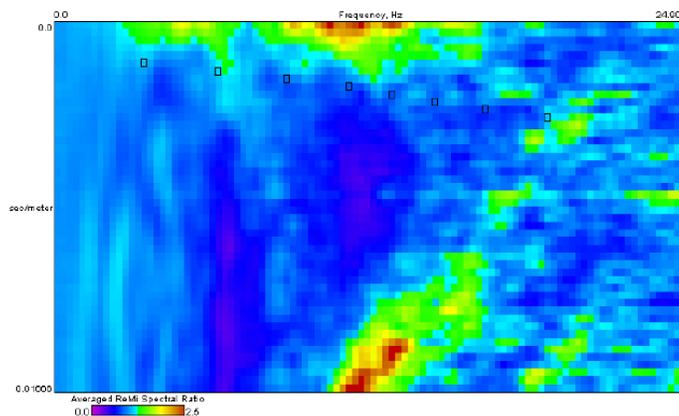


Figura 84. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-01

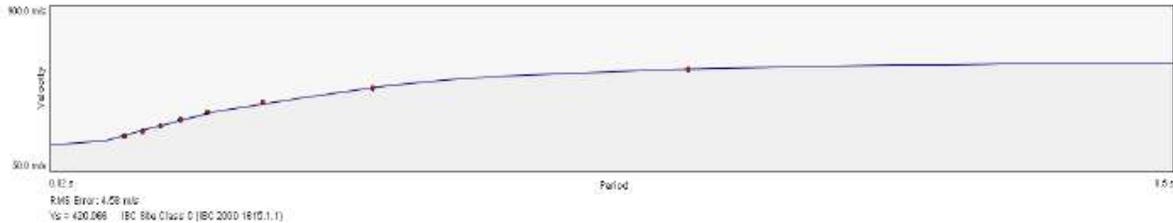


Figura 85. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-01

	Density	Shear Velocity
4.25 m	1.8 g/cc	211.481 m/s
8.75 m	1.8 g/cc	348.872 m/s
15.75 m	1.8 g/cc	509.295 m/s
27.0 m	1.8 g/cc	661.885 m/s
35.0 m	1.8 g/cc	715.879 m/s

Figura 86. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-01

En la Figura 87 se 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-LC-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 88, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 89 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.20 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 150 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 4.20 m y 22.7 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S entre 410 a 580 m/s aproximadamente, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.
- ✓ Una capa más profunda desde los 22.70 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 730 m/s, la cual puede definirse como una zona de transición entre suelo y roca.

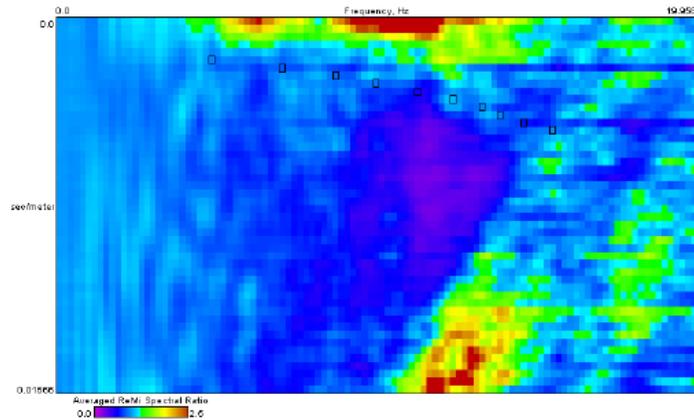


Figura 87. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-02

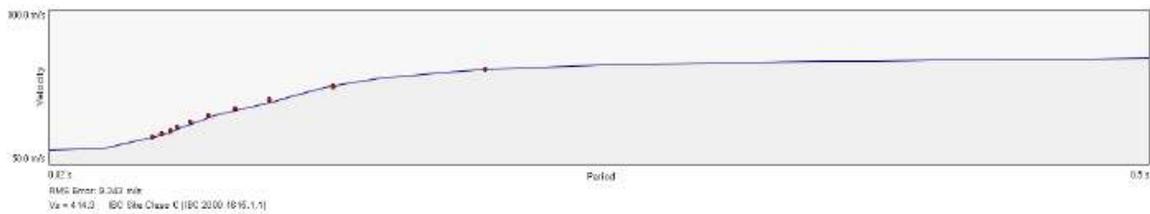


Figura 88. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-02

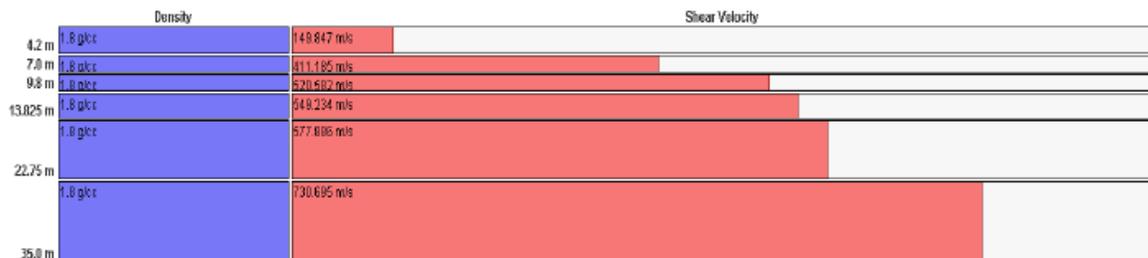


Figura 89. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-02

En la Figura 90 se 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-LC-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 91, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 92 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.85 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 144 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.

- ✓ Una capa intermedia entre 3.85 m y 25.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S entre 433 a 610 m/s aproximadamente, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.
- ✓ Una capa más profunda desde los 25.0 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 710 m/s, la cual puede definirse como una zona de transición entre suelo y roca.

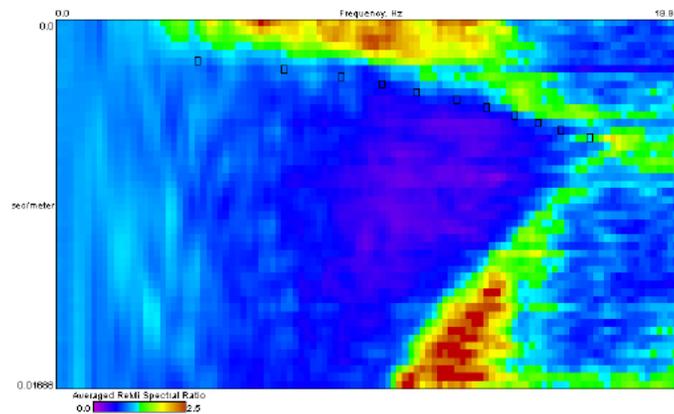


Figura 90. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-LC-LG-03

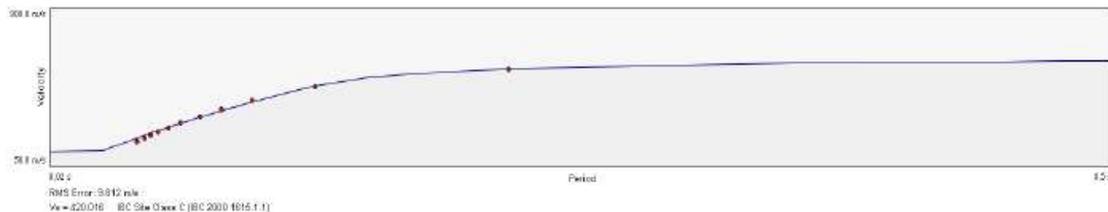


Figura 91. Dispersión y ajuste para la Línea P-LC-LG-03

	Density	Shear Velocity
3.85 m	1.8 g/cc	144.637 m/s
6.825 m	1.8 g/cc	422.001 m/s
8.8 m	1.8 g/cc	514.505 m/s
17.15 m	1.8 g/cc	577.006 m/s
25.025 m	1.8 g/cc	610.01 m/s
35.0 m	1.8 g/cc	711.593 m/s

Figura 92. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-LC-LG-03

En la Figura 93 se 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-LC-LG-01. 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. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 6.80 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 255 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 6.80 m y 16.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S entre 450 a 567 m/s aproximadamente, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.
- ✓ Una capa más profunda desde los 16.0 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S superiores a 725 m/s, la cual puede definirse como una zona de transición entre suelo y roca.

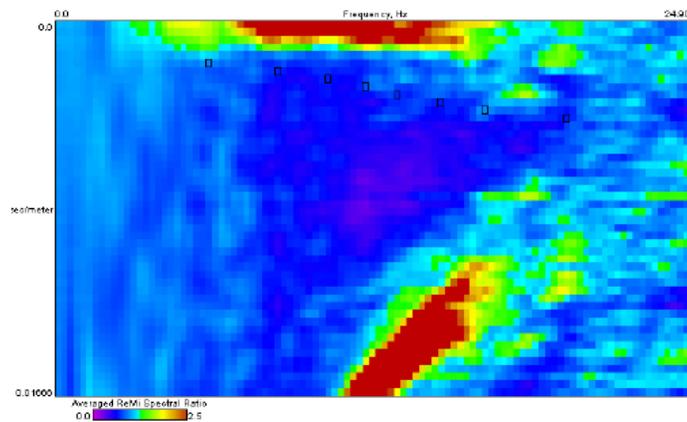


Figura 93. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-LC-LG-15

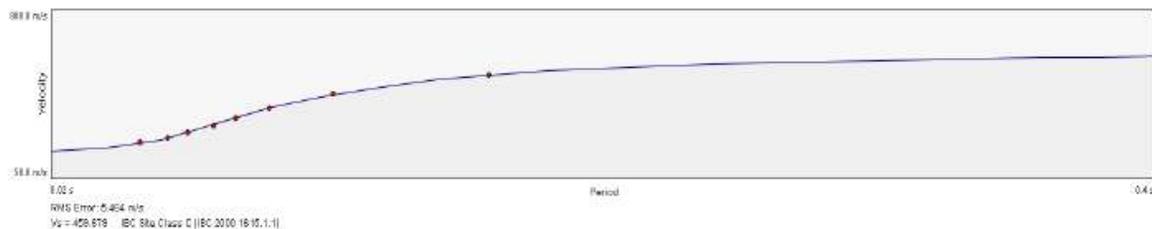


Figura 94. Dispersión y ajuste para la Línea U-LC-LG-15

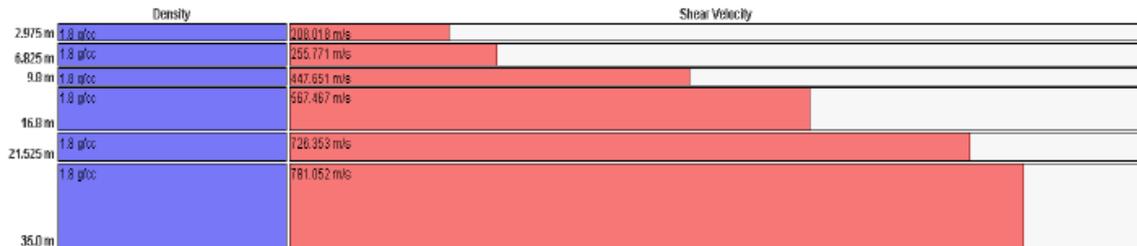


Figura 95. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-LC-LG-15

En la Figura 93 se presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la Línea Geofísica Línea 3. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.4 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 160 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 4.4 m y 6.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 232 m/s aproximadamente, la cual puede definirse como un suelo de consistencia blanda a media.
- ✓ Una capa más profunda desde los 6.8 m hasta 17.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 545 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.

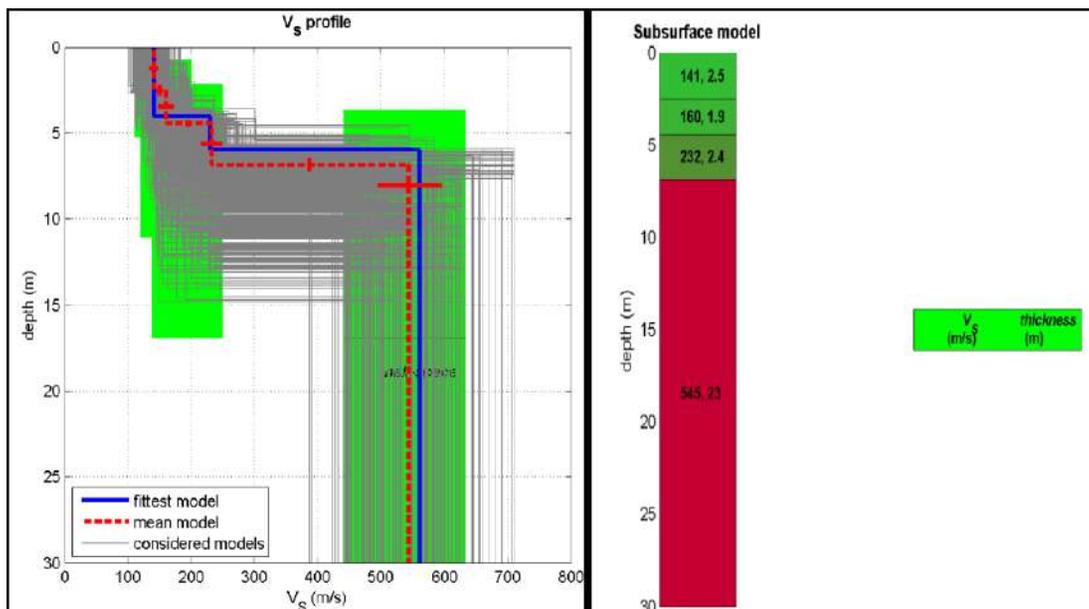


Figura 96. Perfil de velocidad de onda de corte (S) Línea 3 (Bioexplora, 2005)

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

10.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

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

Durante la etapa de exploración en campo (superficial y profunda), se recuperaron muestras alteradas e inalteradas a diferentes profundidades. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son: humedad natural (ASTM D2216), límites de consistencia (ASTM D4318), granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 (ASTM D422), y gravedad específica (ASTM D854). Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo según la norma ASTM D3080 el cual está únicamente estandarizado para condiciones consolidadas drenadas (CD), debido a la imposibilidad de garantizar que la muestra falla en condiciones no drenadas.

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

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

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

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

10.2.1 Ensayos de clasificación

La Tabla 27 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 28 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

Tabla 27. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-LC-PR-36	M2	2.00 - 2.45	Cenizas volcánicas removilizadas	51.00	59.00	7.00	1.14	4.00	23.00	73.00	MH
P-LC-PR-39	M2	2.00 - 2.45	Lleno antrópico (QII)	44.70	65.00	11.00	1.85	25.00	21.00	54.00	MH
P-LC-PR-40	M1	1.00 - 1.45	Lleno antrópico (QII)	40.00	42.00	3.00	0.67	2.00	33.00	65.00	ML
P-LC-PR-35	M1	1.00 - 1.45	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	54.30	59.00	6.00	0.78	3.00	13.00	84.00	MH
P-LC-PR-35	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	60.40	68.00	18.00	0.42	13.00	16.00	71.00	MH
P-LC-PR-35	M5	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	65.60	87.00	32.00	0.67	1.00	12.00	87.00	MH
P-LC-PR-35	M6	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	20.00	49.00	11.00	2.64	35.00	30.00	35.00	GM
P-LC-PR-36	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	37.50	43.00	4.00	1.38	1.00	23.00	76.00	ML
P-LC-PR-36	M5	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.10	58.00	15.00	1.06	0.00	3.00	97.00	MH
P-LC-PR-36	M7	7.00 - 7.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	75.40	87.00	15.00	0.77	0.00	4.00	96.00	MH
P-LC-PR-36	M9	9.00 - 9.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	91.80	44.00			1.00	17.00	82.00	ML
P-LC-PR-36	M11	11.00 - 11.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	29.10	63.00	15.00	2.26	12.00	19.00	69.00	MH
P-LC-PR-37	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.70	51.00	10.00	0.83	3.00	25.00	72.00	MH
P-LC-PR-37	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	64.60	88.00	18.00	1.30	0.00	8.00	92.00	MH
P-LC-PR-37	M5	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	50.70	58.00	6.00	1.22	12.00	17.00	71.00	MH
P-LC-PR-37	M6	6.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	23.80	42.00			14.00	33.00	53.00	ML

Tabla 27. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-LC-PR-38	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	54.00	68.00	1.00	14.00	0.00	6.00	94.00	MH
P-LC-PR-38	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	58.40	58.00	9.00	-0.04	17.00	18.00	65.00	MH
P-LC-PR-38	M4	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	35.40	52.00	4.00	4.15	13.00	30.00	57.00	MH
P-LC-PR-38	M5	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	38.50	55.00	6.00	2.75	25.00	29.00	46.00	SM
P-LC-PR-39	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	85.20	84.00	11.00	-0.11	0.00	7.00	93.00	MH
P-LC-PR-39	M5	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	40.30	73.00	23.00	1.42	13.00	14.00	72.00	MH
P-LC-PR-39	M7-M8	7.00 - 8.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	25.50	53.00	13.00	2.12	56.00	19.00	25.00	GM
P-LC-PR-40	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	75.40	51.00	11.00	-2.22	19.00	17.00	64.00	MH

Tabla 28. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S [%]
P-LC-PR-35	M1	1.00 - 1.45	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	54.30	3.19	2.02	85.84
P-LC-PR-35	M5	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	65.60	2.93	1.98	97.27
P-LC-PR-36	M5	5.00 - 5.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.10	3.44	2.00	72.49
P-LC-PR-36	M11	11.00 - 11.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	29.10	2.89	1.22	69.07
P-LC-PR-37	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.70	3.14	1.66	80.65
P-LC-PR-37	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	64.60	3.27	2.20	96.07
P-LC-PR-38	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	54.00	3.23	1.95	89.18
P-LC-PR-38	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	58.40	2.87	1.70	98.39

P-LC-PR-39	M3	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	85.20	3.10	2.75	95.93
P-LC-PR-40	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	75.40	3.00	2.33	97.01

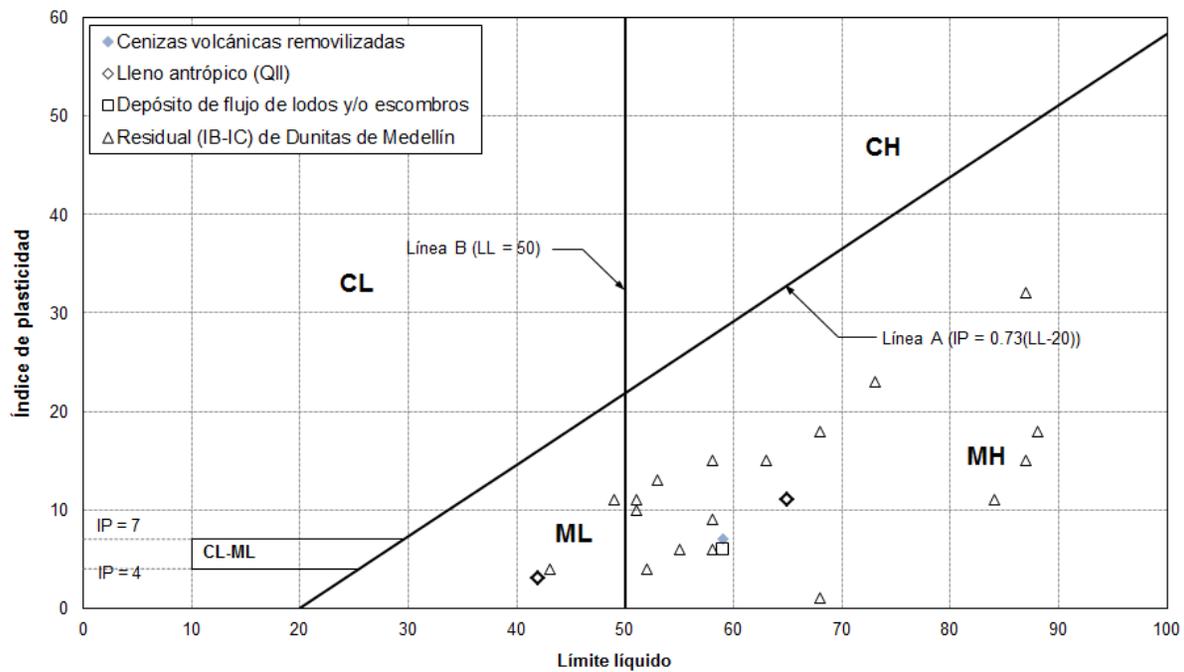


Figura 97. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande

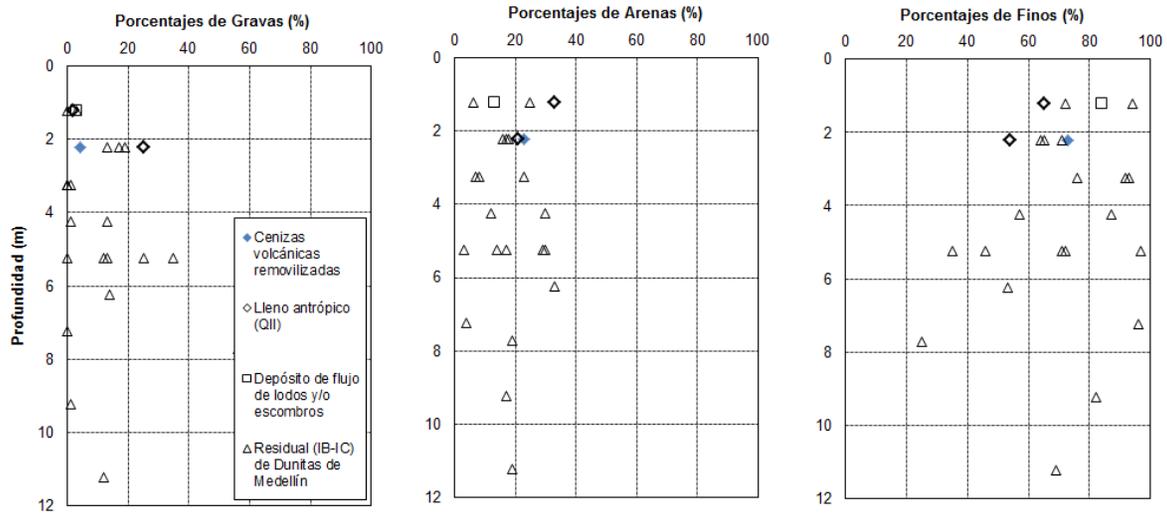


Figura 98. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad

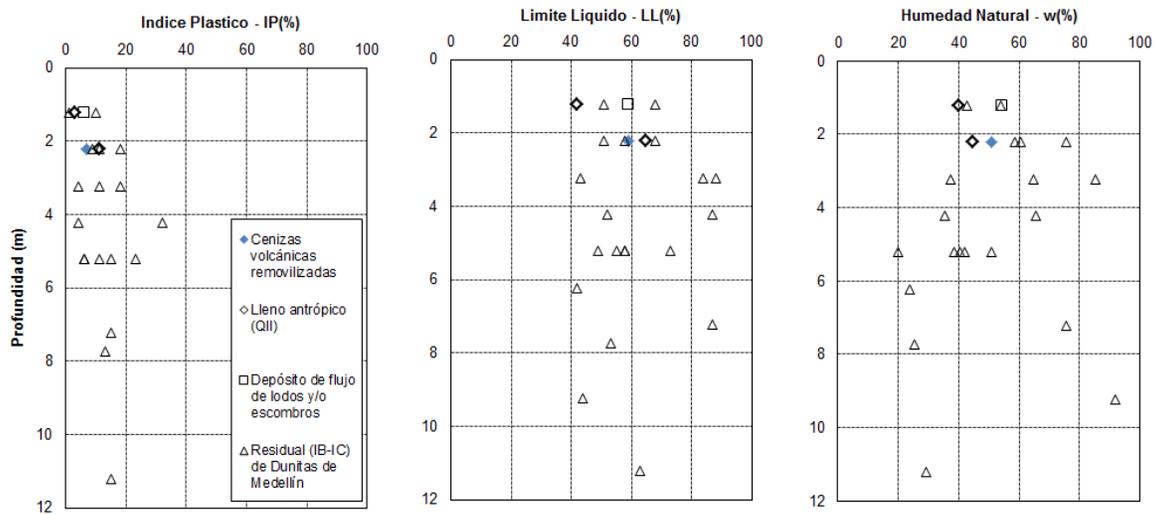


Figura 99. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.

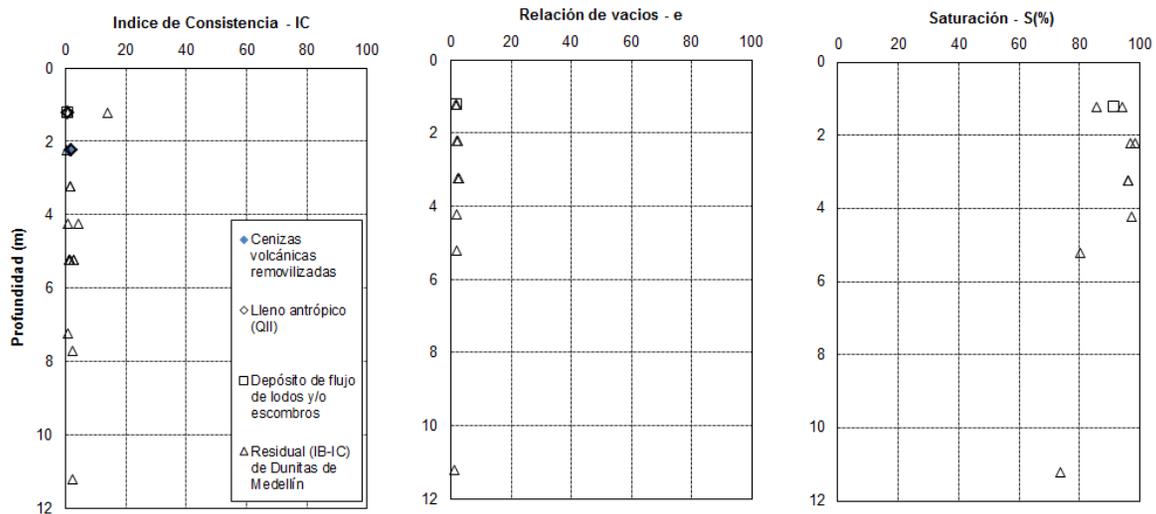


Figura 100. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad

Los llenos antrópicos encontrados en la zona presentaron humedades cercanas al 45%, con porcentajes de finos que van desde 54% a 65%, porcentajes de arenas entre 21% a 33% y porcentajes de gravas entre 2% a 25%. El límite líquido varió entre 42% a 65% mientras que el índice de plasticidad se mantuvo entre 3% a 11%. Estos materiales se clasificaron como Limos de alta y baja plasticidad según la Clasificación Unificada de los Suelos (USCS).

De las muestras recuperadas solo se realizó un ensayo de clasificación en los depósitos de vertiente tipo flujo de lodos y escombros el cual se presentó como un suelo fino granular con un 84% de contenido de finos. En términos de la consistencia este material presentó un límite líquido por encima de 50% e índices de plasticidad por debajo del 7% lo que permitió que se clasificara según la Clasificación Unificada de los Suelos (USCS) como un limo de alta plasticidad MH.

En los suelos residuales (IB-IC) de Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido hasta de 97%, 3% a 33% de arenas y 0% a 56% de gravas. La fracción fina de las muestras presentó límites líquidos superiores a 50% (derecha de la línea B) con valores de hasta 88%, límites de plasticidad entre 38% y 73%, e índices de plasticidad hasta de 32% (debajo de la línea A). De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron principalmente como limos de alta plasticidad (MH), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, no obstante también se encontraron limos de baja plasticidad (ML). La gravedad específica de los materiales varía de 2.9 a 3.4, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, se tienen relaciones de vacíos entre 1.4 y 2.7, mostrando que se tienen materiales porosos, con saturaciones que van desde 73% a 98% y consistencias de blandas a duras.

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 La Cruz se pudieron ejecutar dos ensayos de corte directo modalidad CD, esto debido a la dificultad que se presentó a la hora de la extracción de las muestras inalteradas consecuencia de la presencia de fragmentos de roca o la consistencia de los materiales en los puntos establecidos.

- ✓ Dos muestras ULC1-M1, a 0.45 m de profundidad extraídas de la estación AMD-12-UCL en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.

En la Tabla 29 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 101 y Figura 102 se presentan las envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras tomadas en la UMI La Cruz.

Tabla 29. Resumen de resultados de ensayos de corte directo CD

Sondeo - Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	γ_n [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	G _s	e	S [%]	c' [kPa]	ϕ' [°]
ULC1-M1 (1)	0.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	58.0	15.7	10.4	3.03	1.77	83.00	30.00	19.00
ULC1-M1 (1)	0.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	58.0	15.7	10.4	3.03	1.77	82.00	47.00	19.00

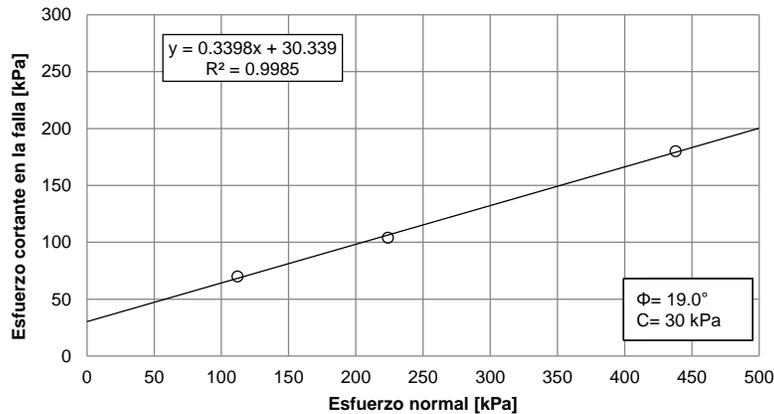


Figura 101. Resultados corte directo Muestra ULC-M1 (1) a 0.45 m de profundidad

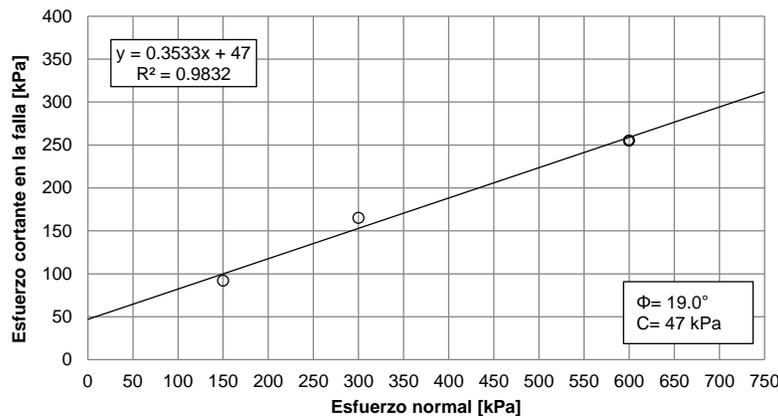


Figura 102. Resultados corte directo Muestra ULC-M1 (2) a 0.45 m de profundidad

10.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES

10.3.1 Aspectos generales

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

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

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

10.3.2 Lleno antrópico

El análisis de los parámetros de resistencia al corte, obtenidos a partir de los ensayos de corte directo recopilados para el lleno antrópico, se presenta en la Figura 104.

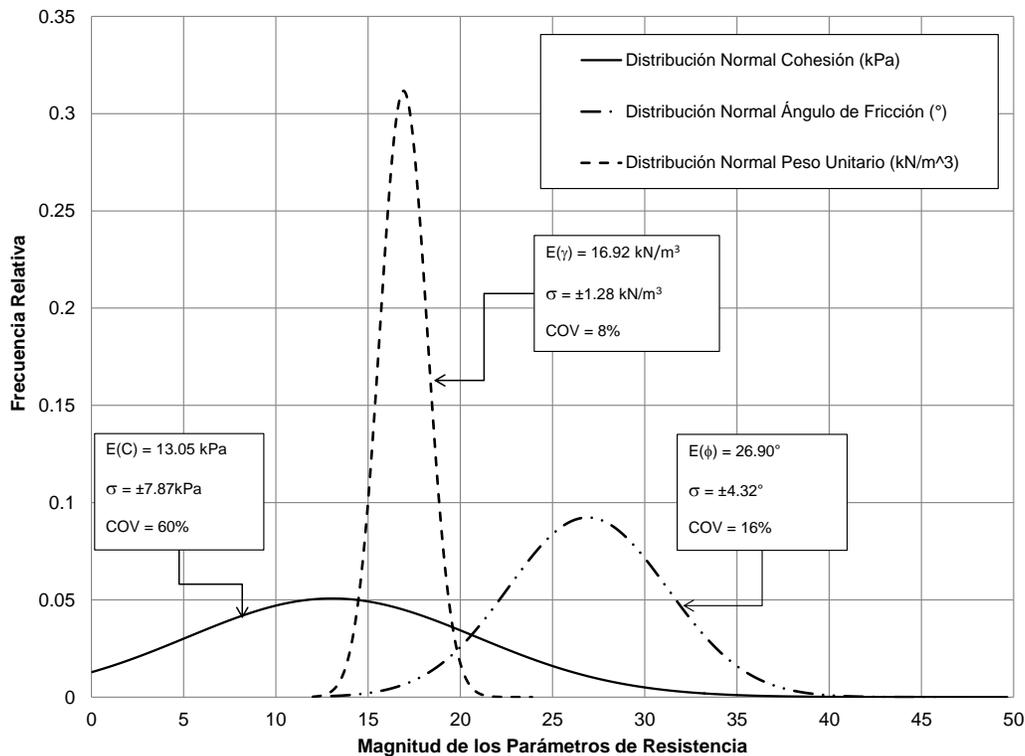


Figura 103. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico

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 ± 7.87 kPa. El coeficiente de variación es de 60%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 35 kPa.

- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.90° y una desviación estándar de $\pm 4.32^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 16%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 15° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del lleno antrópico presentó una media de 16.92 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.28 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 8%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

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 104.

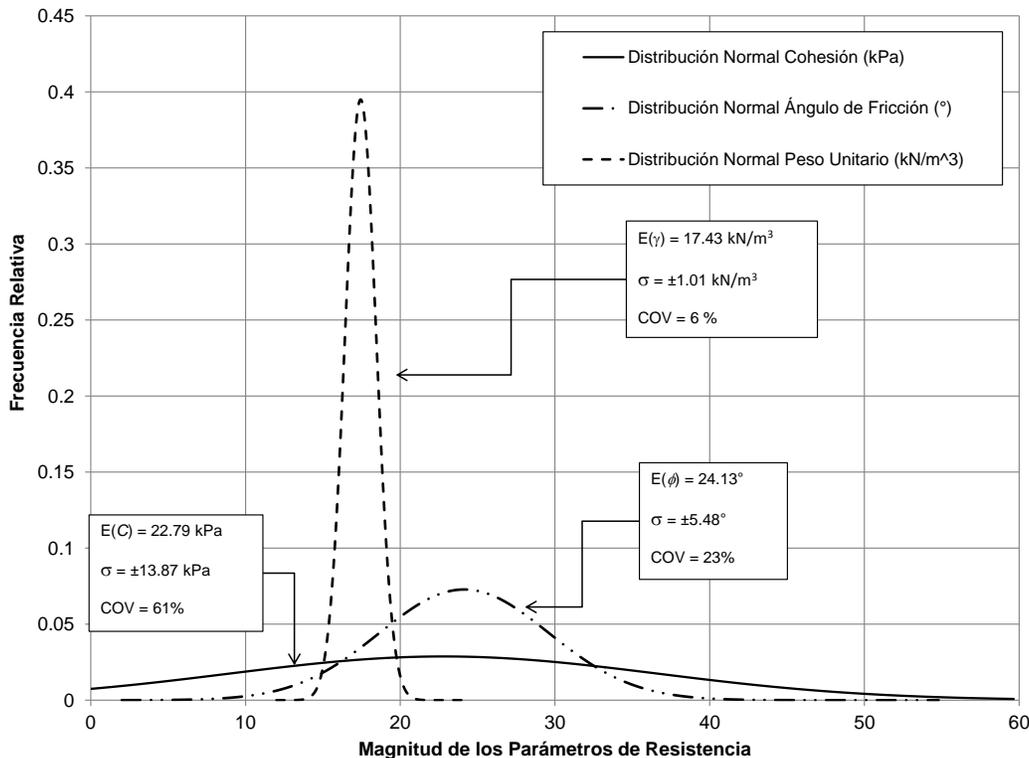


Figura 104. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente

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:

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

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

10.3.4 Depósitos coluviales

Debido a la naturaleza de este material y que no se cuenta con ensayos de resistencia al corte, se asumen los parámetros similares a los de los depósitos de flujo de lodos. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de flujo de lodos, que se asumirá de forma conservadora para el depósito coluvial, se presenta en la Figura 104.

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

- ✓ La cohesión presenta una media de 19.575 kPa con una desviación estándar asociada de ± 9.928 kPa. El coeficiente de variación es de 50.72%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 23.320° y una desviación estándar de $\pm 2.755^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 11.81%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de 17.442 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.236 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.08%. Debido a su poca

variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 15 kN/m³ hasta 22 kN/m³.

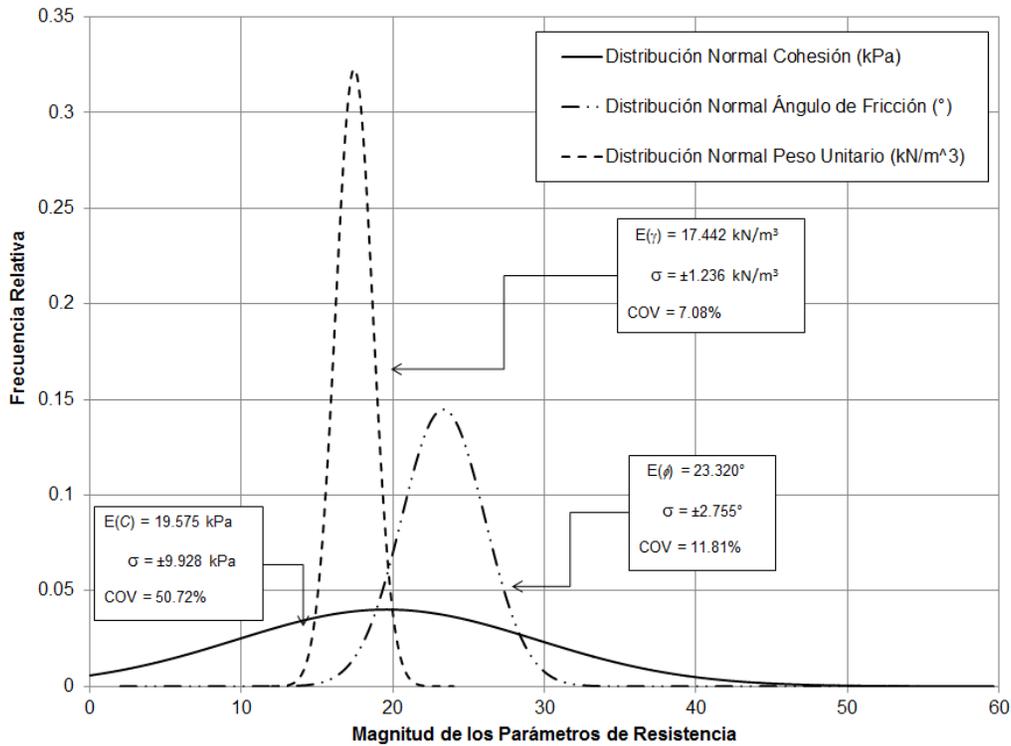


Figura 105. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos

10.3.5 Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)

Los resultados del análisis estadístico de estos materiales se presentan en la Figura 106. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el horizonte de suelos residuales o derivados de las dunitas (Horizontes IB y IC) se realizó considerando los ensayos de resistencia al corte realizados sobre todas las muestras ensayadas en el Proyecto Barrios Sostenibles y las cuales coincidieran con el mismo origen geológico. Adicionalmente, fueron considerados nueve ensayos de corte directo modalidad CD realizados por DEACIVIL (2014).

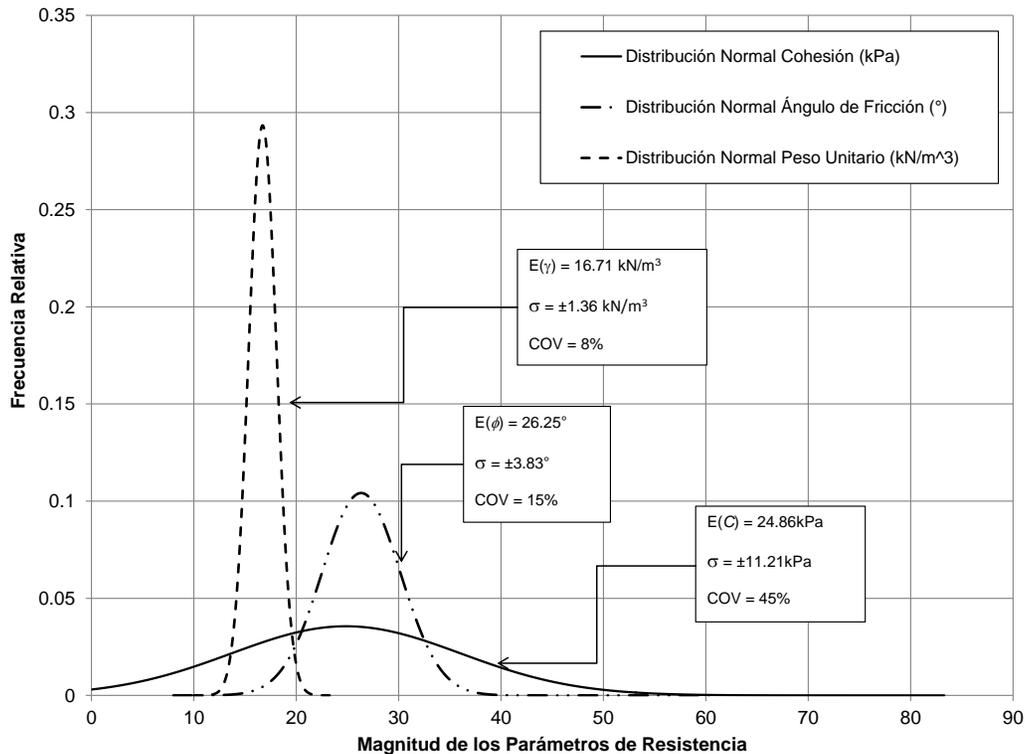


Figura 106. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas

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 ± 11.21 kPa. Para la cohesión se obtuvo un coeficiente de variación de 45%, que corresponde a la variabilidad más alta respecto a la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. La forma de la función de distribución para este material abarca magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.25° y una desviación estándar de $\pm 3.83^\circ$. El ángulo de fricción interna presenta un coeficiente de variación de 14.15%. La forma de la función de distribución abarca magnitudes del ángulo de fricción que van desde 18° hasta 36° aproximadamente.
- ✓ 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.

10.3.6 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte

En la Tabla 30 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

Tabla 30. 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

Cuando se comparan las variables estadísticas de los materiales estudiados con variables estadísticas presentes en la literatura, es posible identificar varias situaciones que caracterizan los materiales y permiten hacer una especie de validación de los parámetros.

- ✓ Inicialmente el parámetro cohesión, tomando como referencia el coeficiente de variación de los materiales oscila entre el 45% y el 63%. El-Ramly (2006) reporta coeficientes de variación de la cohesión efectiva, para materiales en general igual al 22%.
- ✓ En el caso del parámetro de ángulo de fricción interna, el coeficiente de variación para todos los materiales oscilo entre 11% y 16%. En la literatura se reportan coeficientes de variación de este parámetro entre 2% y 13% (Duncan, 2000).
- ✓ Finalmente, en el caso del peso unitario húmedo, el coeficiente de variación no superó el 10%, presentándose reportes en la literatura de este parámetro entre 3% y 7% (Duncan, 2000).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 la cuenca de drenaje natural que tiene influencia sobre el Polígono La Cruz, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la Unidad Morfodinámica Independiente La Cruz. 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 levantada por INGEOCILCON en abril de 2014 para los estudios del cinturón verde (Contrato de consultoría 338 de 2013).

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 POLIGONO LA CRUZ</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:

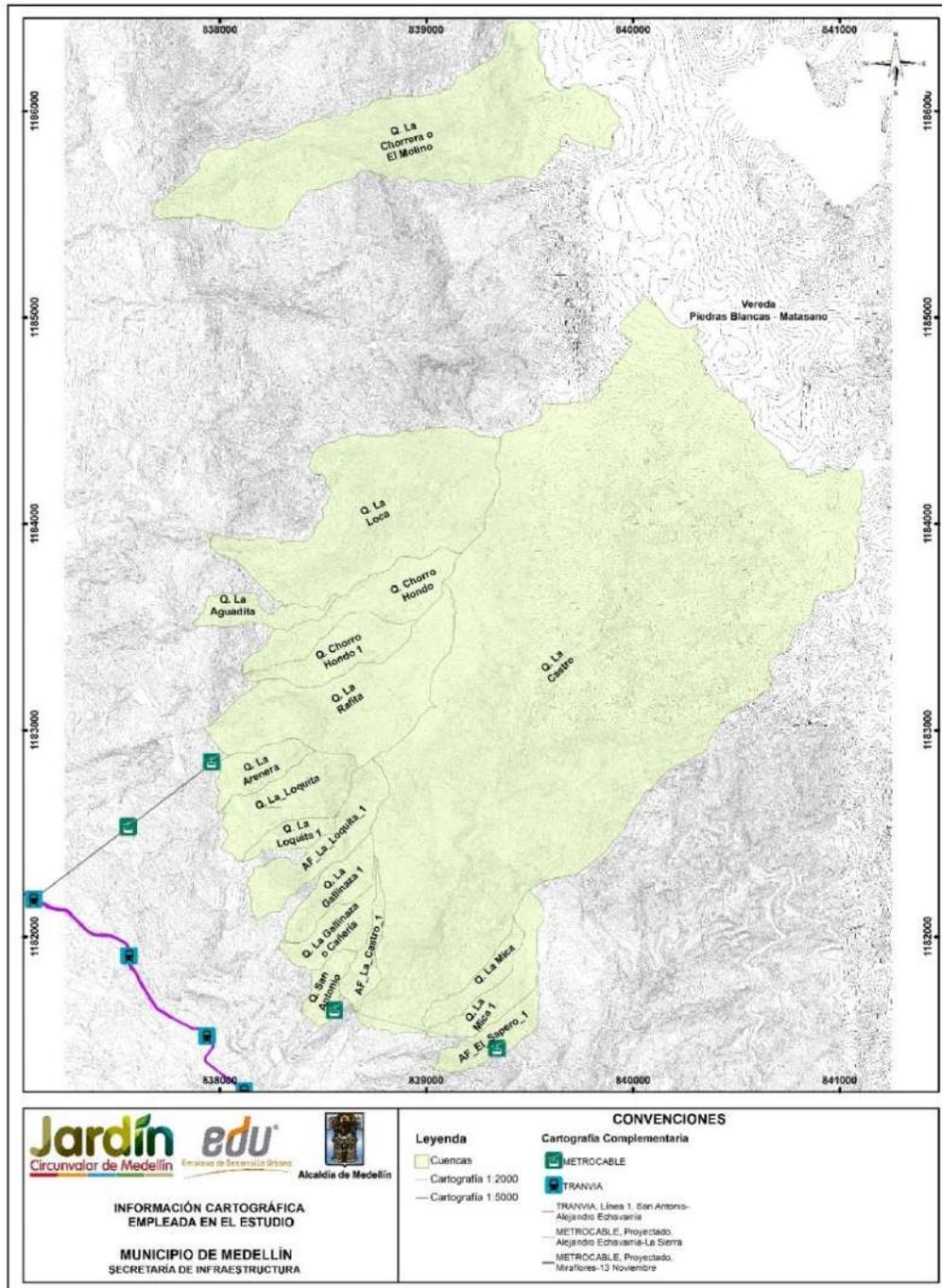
- ✓ Curvas Intensidad Duración Frecuencia de las estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín, publicadas la revista hidrometeorológica de EPM del 2005.
- ✓ Registros de precipitación de estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA).

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 estas 17 corrientes, hay una quebrada que interviene en el polígono La Cruz, objeto de este estudio. Esta quebrada es el Molino.

De esta manera, se tiene para la quebrada El Molino un estudio hidráulico e hidrológico realizado por INGEOCILCON, en puntos que a pesar de no coincidir precisamente con los puntos de interés para este proyecto, se tuvieron en cuenta como punto de referencia. 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
(LCHInformacionCartograficaEmpleadaEnEstudio_Medellin_C)

11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

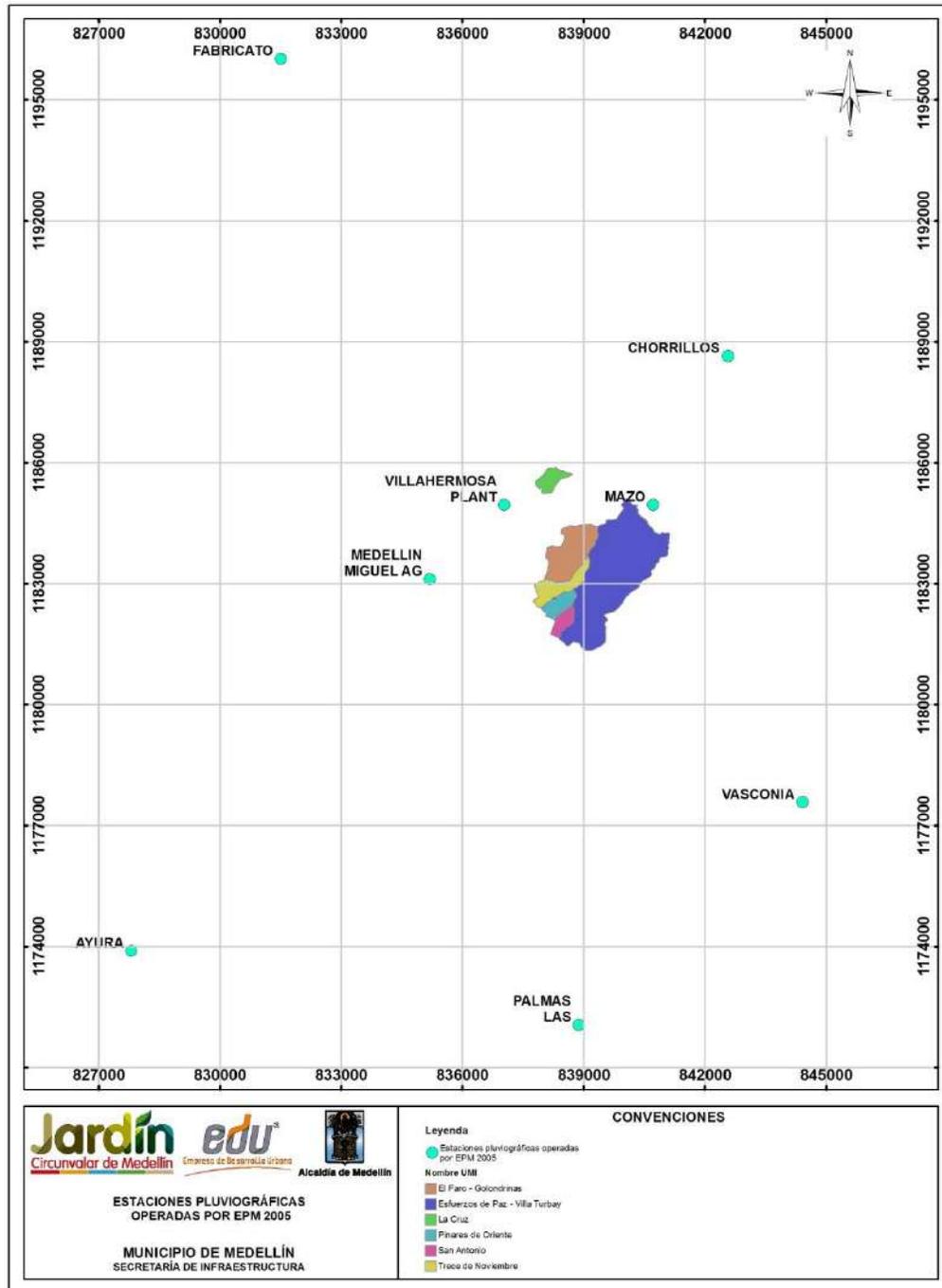
En la zona de estudio o cerca de ella se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 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 31 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 31. 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 31). 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
(LCHEstacionesPluviograficasOperadasEPM2005_Medellin_C)

11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 107 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 107 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, lo anterior puede observarse en la Figura 110.

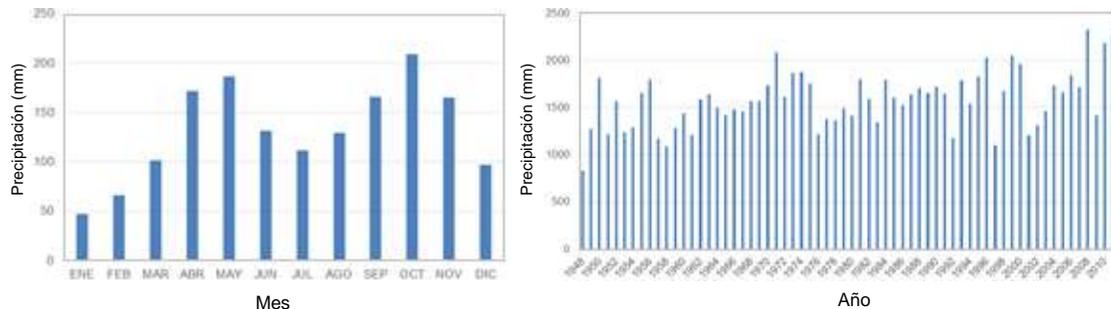


Figura 107. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa

11.3.2 Estación Mazo

En la gráfica a la izquierda de la Figura 108 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 108 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, lo anterior puede observarse en la Figura 110.

11.3.3 Estación Miguel de Aguinaga

En la gráfica a la derecha de la Figura 109 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 109 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 situación que puede observarse en la Figura 110.

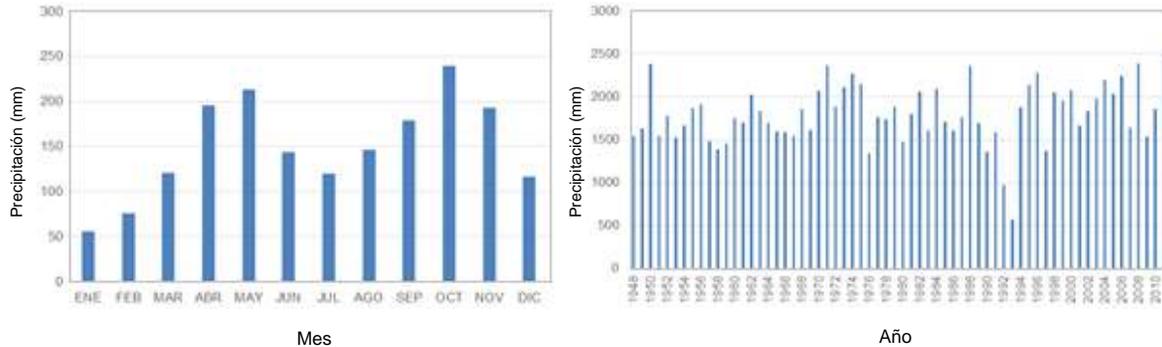


Figura 108. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo

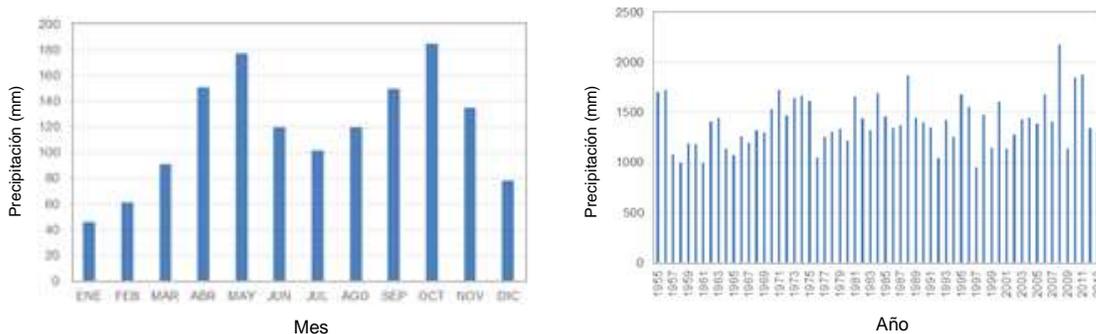


Figura 109. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga

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.

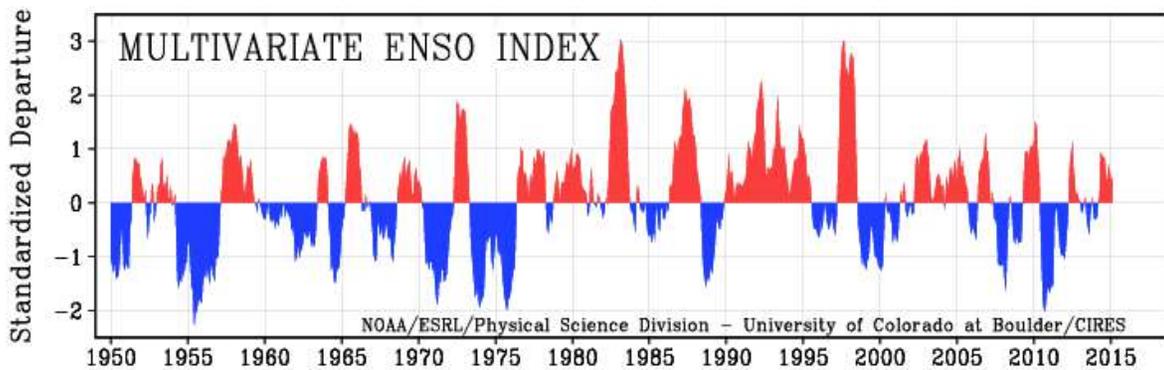


Figura 110. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)

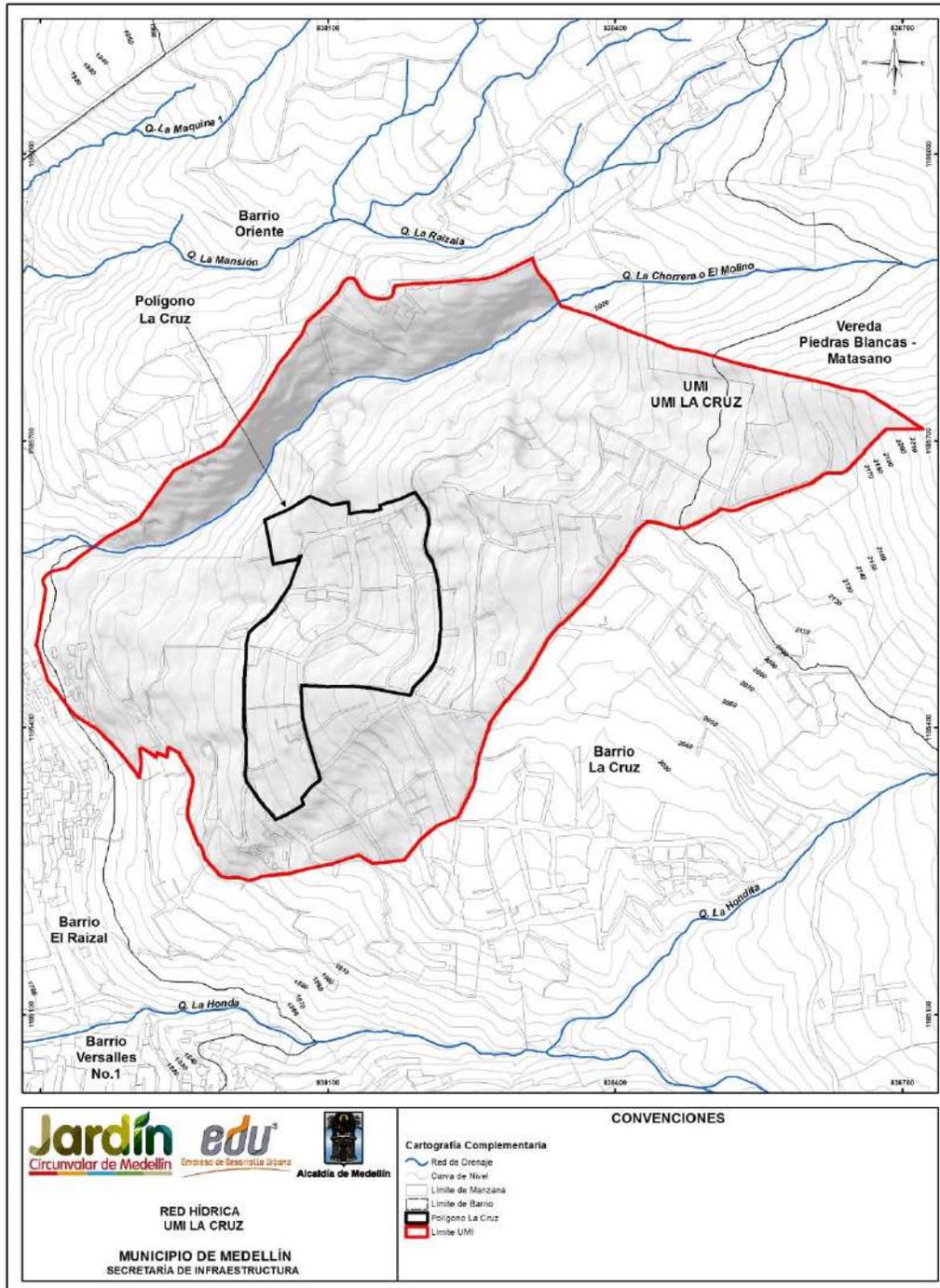
11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

En el Mapa 25 se presenta la red hídrica de la UMI La Cruz. En la Mapa 26 se presenta la misma red de drenaje de la zona de estudio con las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el Polígono La Cruz.

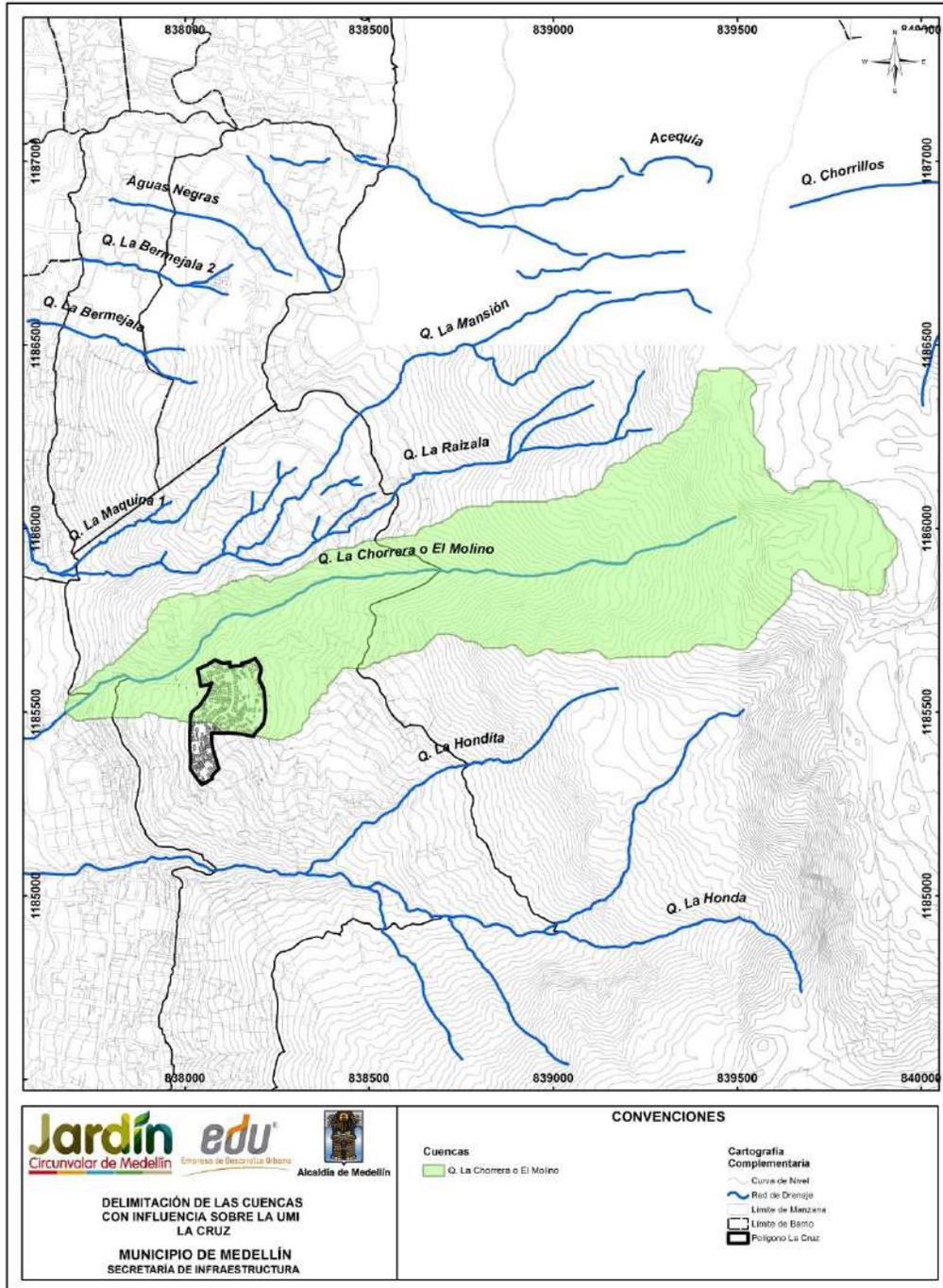
Esta red fue establecida a partir del modelo digital del terreno generado con la información cartográfica, incluyendo los cauces naturales que tienen influencia sobre cada uno de los ocho polígonos de interés para el presente estudio. Se sometió a revisión y validación con respecto a la red hídrica del Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2014) del Municipio de Medellín (2014 2015) y se detectó coherencia entre ambas redes. Adicionalmente, se observó coherencia con lo observado en la Ortofoto de la zona de estudio. Por esta razón se decide adoptar la red hídrica del POT como base para la elaboración del presente estudio.

En particular para el Polígono y para la UMI La Cruz, la corriente que tiene influencia sobre este es la Quebrada La Chorrera o El Molino la cual fluye de Oriente a Occidente por el lado norte del polígono sin atravesarlo.

A partir del Modelo Digital de Elevación del Terreno y de la red de drenaje trazada se delimitó la cuenca de la Quebrada La Chorrera o EL Molino cuyo punto de delimitación corresponde al punto más bajo de la corriente al interior de la UMI. En el Mapa 26 se muestra la cuenca trazada para la Quebrada La Chorrera o El Molino.



Mapa 25. Red hídrica en la UMI La Cruz
(20_LCHRedHidricaUMI_Medellin_C y 20_LCHRedHidricaUMI_Medellin_T)



Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre el Polígono La Cruz (LCHDelimitacionCuencasUMI_Medellin_C)

11.4.1 Parámetros morfométricos de la cuenca

A partir del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno, de la red de drenaje y del trazado de la cuenca se hizo una caracterización morfométrica de esta. En la Tabla 33 se presentan los parámetros morfométricos de la 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 32. Coordenadas del punto de salida del flujo en la cuenca

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	X	Y
18	La_Cruz	Q. La Chorrera o El Molino	837673.50	1185498.10

Tabla 33. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en La Cruz

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 Chorrera o El Molino	866650.13	56.60	5912.38	2278.87	2580.00	1778.00	2307.47	375.58	2421.10	30.34

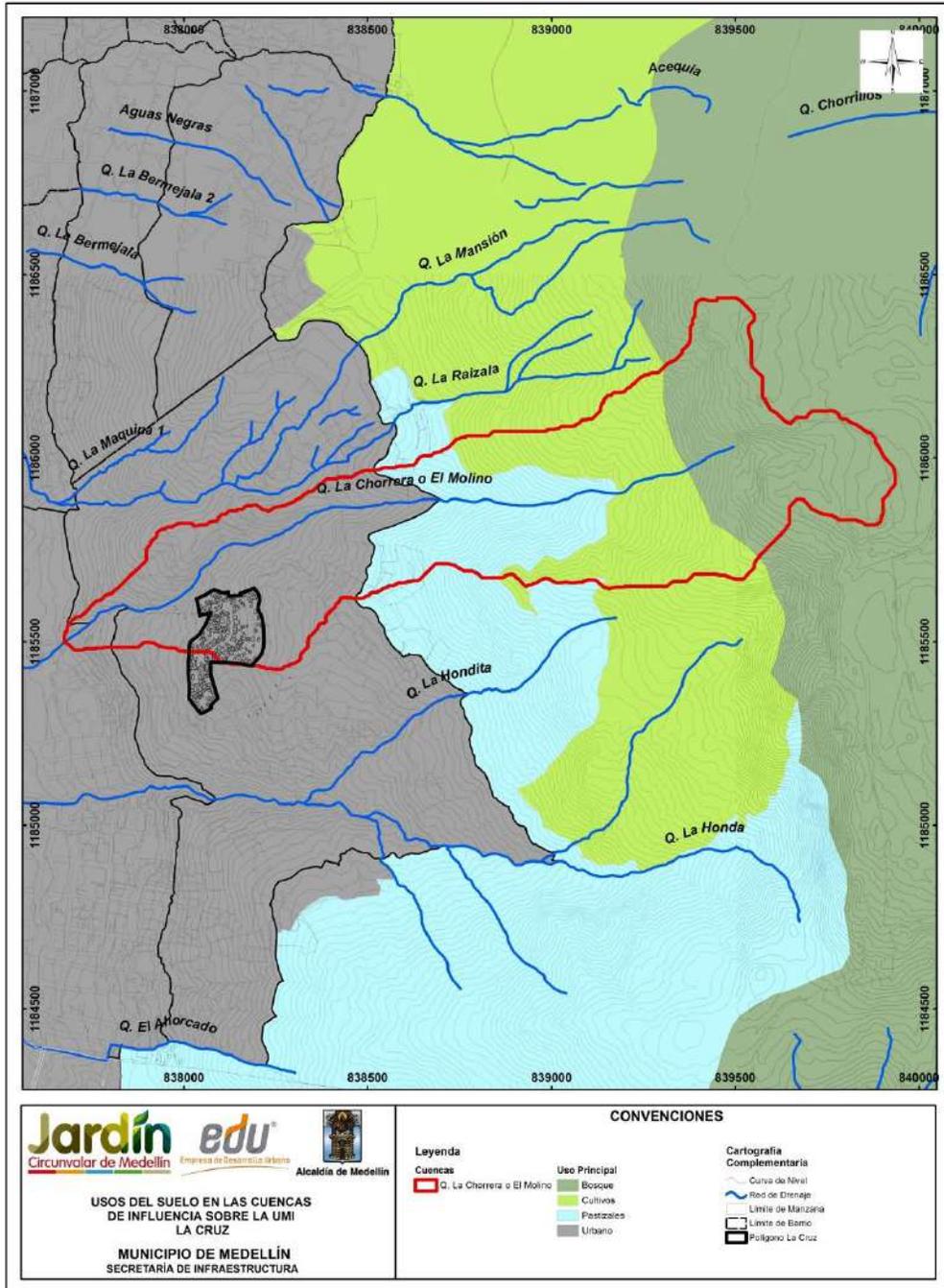
Para determinar la pendiente media de la cuenca, se generó un mapa de pendientes a partir del MDT de la zona de estudio, teniéndose así un mapa en formato raster en el cual se tiene un valor de pendiente para cada pixel. La pendiente media de la cuenca será determinada como el promedio de los valores de pendiente para cada pixel contenidos dentro de la cuenca.

11.4.2 Usos del suelo

En el Mapa 20 y el Mapa 3 se presentan los mapas correspondientes a usos del suelo definidos para la UMI La Cruz. Para la asignación de los usos del suelo al interior de la cuenca con fines de modelación hidrológica, se empleó la información de usos del suelo indicada en el POT (2014). En el Mapa 27 se muestra el mapa generado de usos del suelo para la cuenca estudiada y en la Tabla 34 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%.

El área de la zona urbana se encuentra localizada en la parte baja de la cuenca. En el caso de la cuenca de la Quebrada La Chorrera o El molino, se tiene una intervención antrópica considerable sobre las condiciones naturales de escorrentía de la cuenca, observándose un 18% de área destinada a cultivos y 32% de área urbana.



Mapa 27. Usos del suelo en las cuencas de influencia sobre la UMI La Cruz Modificado del POT (2014)
(LCHUsosSuelosCuencasUMI_Medellin_C)

Tabla 34. Usos del suelo en las cuencas de influencia en La Cruz

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Cultivos	Pastizales	Bosques	Urbano
	Forestal productor	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. La Chorrera o El Molino	18%	24%	26%	32%

11.4.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que toma una gota de agua desde la parte más alejada de la cuenca hasta el punto de salida de la misma. Para estimar este tiempo se cuenta con una gran cantidad de modelos propuestos por diferentes autores, los cuales se encuentran en función de las características morfológicas de la cuenca.

En la Tabla 35 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 36 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono La Cruz.

Tabla 35. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L}{S_0} \right)^{0.77}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (m) S ₀ : Pendiente del canal en (m/m)
Temez	$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S_0} \right)^{0.75}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) S ₀ : Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (%)
Johnstone y Cross	$T_c = 5 \times \left(\frac{L}{S_0} \right)^{0.5}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) S ₀ : 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) S ₀ : 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) S ₀ : Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (m)

Tabla 36. Tiempos de concentración calculados para las cuencas

Nombre cuenca	Tiempo de concentración (min)														Tc tomado
	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrin	Clark	California Culvert Practice	Passini I	California USBR	Glandotti	Promedio	Desv. Est.	Lim Sup.	Lim. Inf.	Promedio	
Q. La Chorrera o El Molino	12.4	18.4	31.4	43.2	26.3	11.4	15.1	12.4	20.4	21.2	10.7	31.9	10.5	18.5	18.5

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 37 para cada estación y periodo de retorno.

Tabla 37. 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

A partir de las intensidades puntuales se determinó la intensidad media de la lluvia para cada la cuenca de La Chorrera. 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 38 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono.

Tabla 38. Intensidades de precipitación en mm/h para la cuenca

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Chorrera o El Molino	71.49	106.18	139.85	154.09

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 la cuenca analizada se presentan en la Tabla 39.

Tabla 39. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca

Nombre Cuenca	Coeficientes de Escorrentía (Adimensional)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Chorrera o El Molino	0.49	0.55	0.63	0.67

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.

$U = U_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{n-1} e^{[(1-n)(\frac{t}{T_p}-1)]}$	Para $t \leq t_0$
$U = U_0 e^{\left[\frac{t_0-t}{K} \right]}$	Para $t_0 < t \leq t_1$
$U = U_1 e^{\left[\frac{t_0-t}{3K} \right]}$	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:

$$T_C = \frac{5}{3} T_R$$

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

El tiempo de rezago, T_R , puede calcularse con base en la siguiente expresión, donde L_C es la longitud del canal principal en pies, S_C es la pendiente promedio de la microcuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas.

$$T_R = \frac{L_c^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * S_c^{0.5}}$$

El factor de retención o almacenamiento S se obtiene del método de la S.C.S para perdidas mediante la siguiente expresión, donde CN es el Número de Curva.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

El tiempo al pico, T_p está dado según la siguiente expresión, en donde T es la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R$$

La relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dada como:

$$T = 0.133T_C$$

11.5.3.3 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 interceptación en la vegetación, almacenamiento en depósitos del suelo y por infiltración, se usó el método del número de curva. Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y relaciona la lluvia total y la lluvia

efectiva con el tipo y uso de suelo y las condiciones de humedad antecedente (Chow et al, 1994) a través del parámetro denominado número de curva (CN).

La precipitación efectiva por el método del SCS se estima a partir de la precipitación total acumulada, así:

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

Donde, Pe 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 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 40 se puede observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.

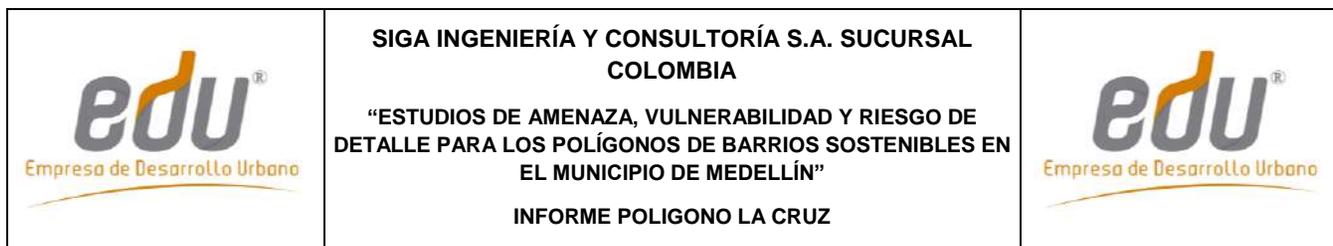
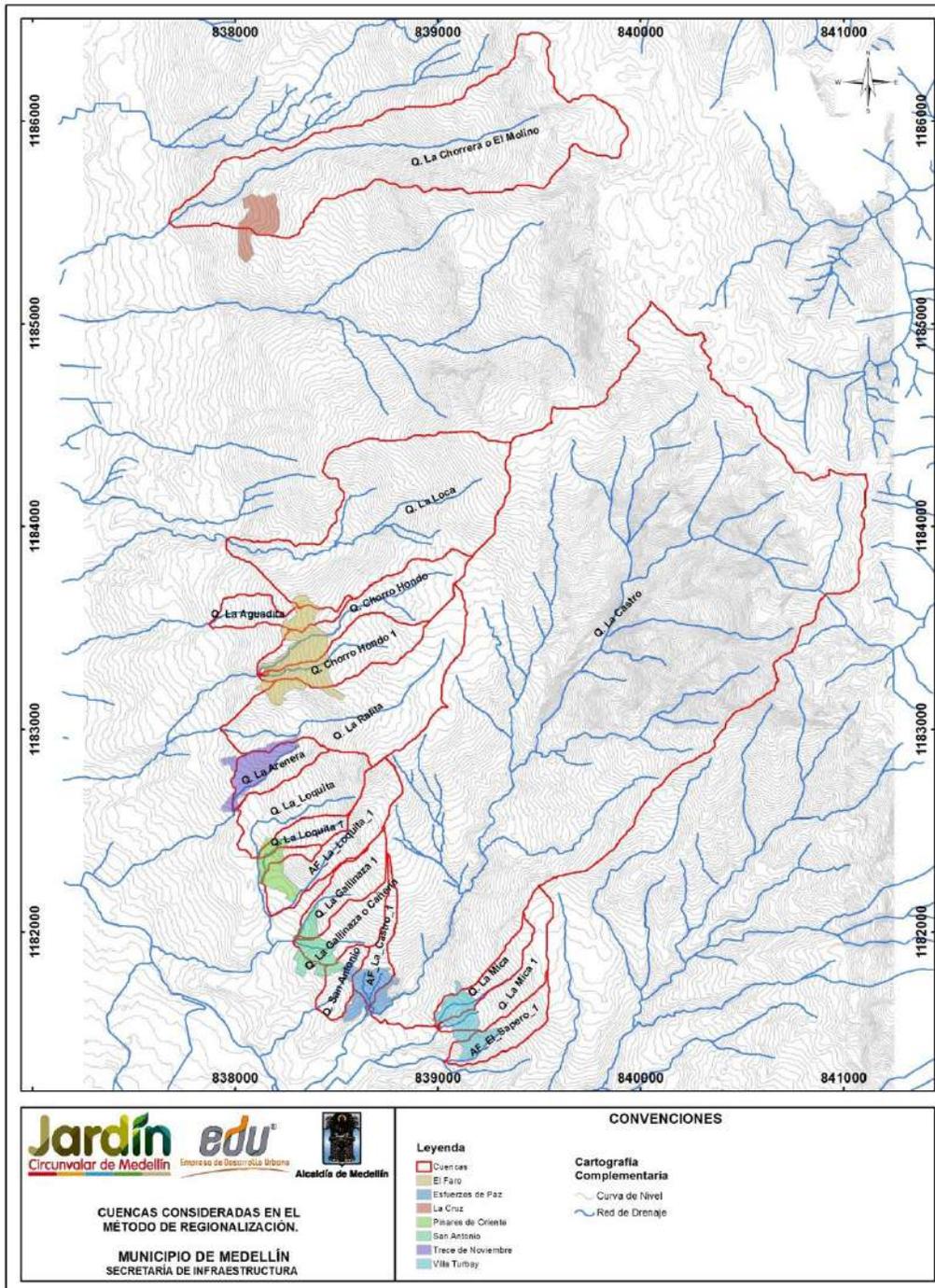


Tabla 40. Coordenadas para puntos de salida de cuencas consideradas en regionalización

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 el Mapa 28 se muestran las cuencas tenidas en cuenta para la regionalización. 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.



Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización
(LHCuencasparaMetodoRegionalizacion_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 POLIGONO LA CRUZ	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

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 41 junto con el coeficiente de correlación.

Tabla 41. 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 periodo de retorno y para cada método empleado se presentan de la Tabla 42 a la Tabla 45. Dado que el tamaño de la cuenca 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 42. 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 Chorrera o El Molino	8.60	6.31	6.50	8.44	6.42	7.11

Tabla 43. 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 Chorrera o El Molino	17.17	12.46	12.64	14.13	10.86	12.05

Tabla 44. 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 Chorrera o El Molino	26.26	19.08	19.31	21.18	16.66	18.29

Tabla 45. 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 Chorrera o El Molino	30.24	21.99	22.24	24.88	19.54	21.58

En la regionalización hecha por INGEOCILCON mediante el Contrato 338 de 2013, contempla la cuenca de la Quebrada La Chorrera o El Molino. En la Figura 111 se muestran las cuencas consideradas por INGEOCILCON para construir la regionalización.

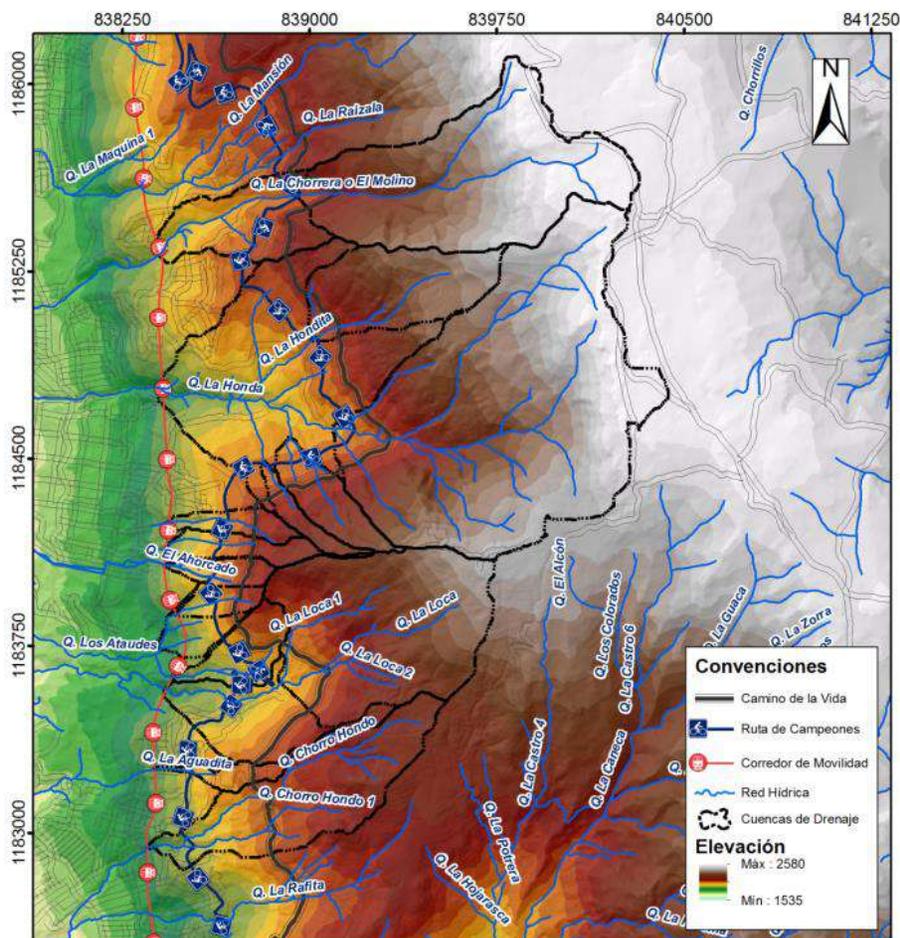


Figura 111. Cuencas consideradas en la regionalización realizada por INGEOCILÓN (2014) (Fuente: Documento “Anexo C. Parámetros Regionalización Hidrología - Norte_Ene_2015”)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 La Cruz. 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 La Cruz se trabaja con la información topográfica levantada por INGEOCILCON en abril de 2014 para los estudios del cinturón verde (Contrato de consultoría 338 de 2013).

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 La Cruz que fue levantada por la Empresa de Desarrollo Urbano.

12.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES

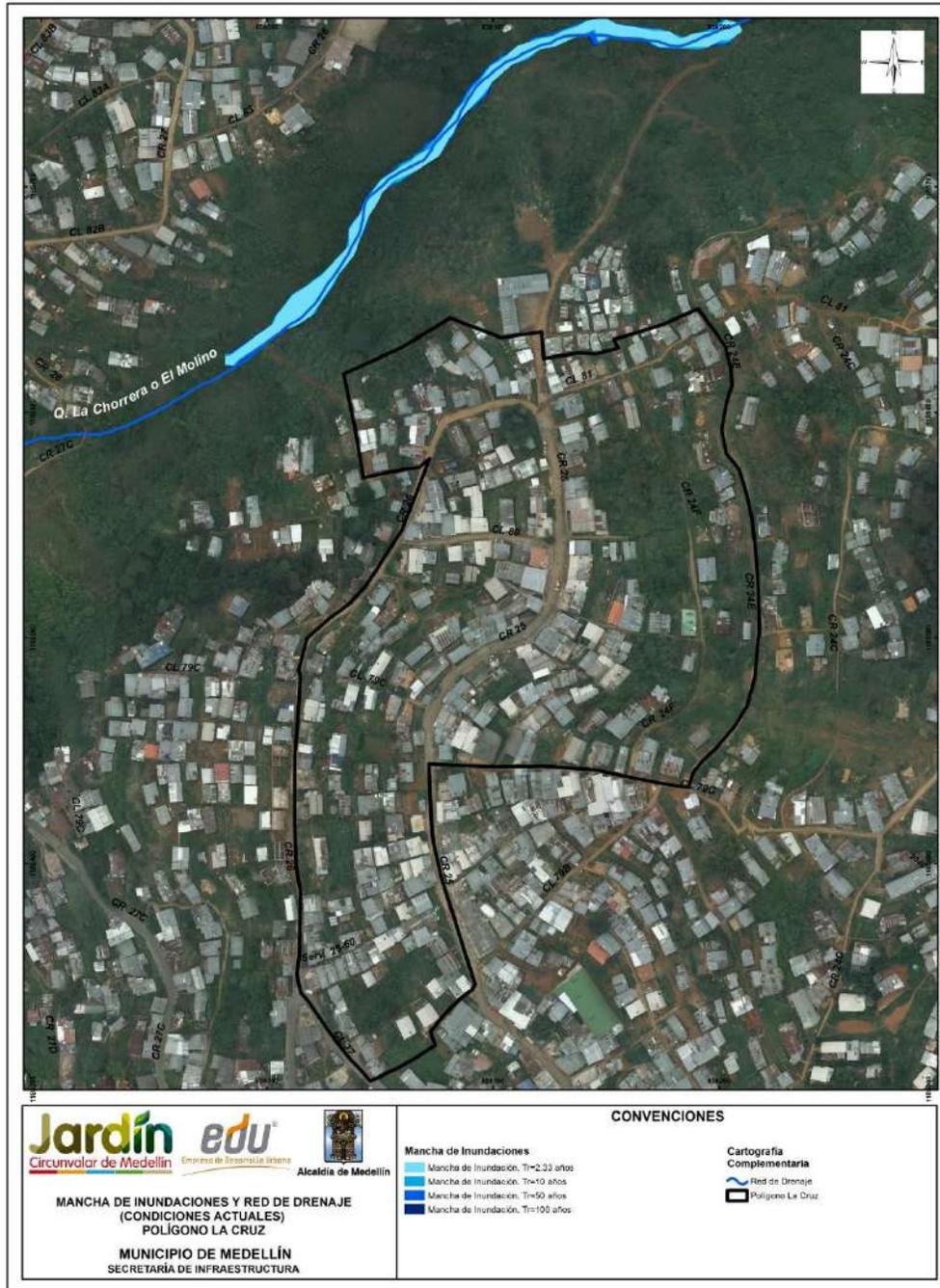
En el Numeral 5.3 se describió detalladamente lo relacionado con la morfodinámica regional de la zona de estudio y en el Numeral 5.4 lo correspondiente a la morfodinámica local. Dentro de este último, se establece que con respecto a los procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI La Cruz, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa, en las márgenes de la quebrada El Molino. Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de esta quebrada.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI La Cruz (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 del drenaje asociado al Polígono La Cruz, la Quebrada La Chorrera o El Molino (Mapa 29).

El tramo analizado de la Quebrada La Chorrera o El Molino, se encuentra localizado fuera del Polígono La Cruz, hacia el costado norte y comprende una longitud total de 314 m. Presenta un cauce natural altamente encañonado, con secciones irregulares a lo largo del tramo, las cuales presentan un ancho que varía entre 0.80 m y 1.60 m y una pendiente que varía entre el 9% y 48% (Ver perfil en Anexo 5, Figura 1). En la Figura 112 se pueden observar las viviendas ubicadas en el límite del polígono y el fondo del cañón de la Quebrada La Chorrera o El Molino.

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

En el fondo del cauce hay presencia de materiales gruesos, acompañado de una matriz asociada a suelos cohesivos, como se muestra en la Figura 113, por lo que esta corriente se puede clasificar como de materiales cohesivos. De acuerdo con la clasificación de Rosgen, el cauce natural de la Quebrada La Chorrera o El Molino puede catalogarse como de Tipo A6a+.



Mapa 29. Localización drenajes cercanos al Polígono La Cruz y mancha de inundación para los diferentes periodos de retorno Quebrada La Chorrera o El Molino (LCHManchasDrenajeCondiActuales_Medellin_C)



Figura 112. Cañón de la quebrada El Molino



Figura 113. Materiales en el fondo del cauce de la Quebrada El Molino

A lo largo de la quebrada, se puede observar que las márgenes del cauce se encuentran cubiertas por vegetación, la cual está compuesta por arbustos de tamaño medio y pastos altos de aproximadamente 3 m de altura, la cual invade el cauce de la quebrada, como se muestra en la Figura 114.



Figura 114. Vegetación en la quebrada La Chorrera o El Molino

Se pudo identificar que la quebrada recibe descargas de aguas negras, debido al olor y la coloración del agua en sitio de estudio (Figura 115). En este tramo, también se observa secuencia de saltos y pozos en los cuales se está empozando el agua proveniente de las descargas, generando gran cantidad de insectos.



Figura 115. Saltos y pozos en el cauce de la Quebrada La Chorrera o El Molino

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 La Cruz, 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.

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

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.
- ✓ 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

Para el análisis hidráulico de inundaciones se han empleado los caudales de aguas claras estimados en el Numeral 11.5 de hidrología por el método racional (Tabla 42 a Tabla 45).

Para el análisis hidráulico de avenidas torrenciales se han tomado los caudales de aguas claras incrementados en un 40% de acuerdo con lo indicado en el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 (AMVA). En el Numeral 15.4 se describe con mayor detalle elementos adicionales considerados en la metodología empleada para el análisis hidráulico de las avenidas torrenciales así como los resultados obtenidos para este tipo de eventos. Finalmente, en la Tabla 46 se presenta el resumen de caudales empleados en las modelaciones hidráulicas.

Tabla 46. Resumen de caudales empleados en la modelación hidráulica

Tipo	Caudales (m ³)			
	2.33 años	10 años	50 años	100 años
Caudales para inundaciones	8.44	14.13	21.18	24.88
Caudales para avenidas torrenciales	11.82	19.78	29.66	34.83

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

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

dado que se aproxima bien a las hidrógrafas reales en ambientes urbanos y es la forma base para la generación de hidrógrafas sintéticas como las del Soil Conservation Service.

12.3.6 Condiciones iniciales

Dadas las características efímeras de los cauces del polígono en estudio, se consideraron láminas de flujo nulas como condiciones iniciales, es decir, se partió de condicione 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 el tramo de estudio de la Quebrada La Chorrera o El Molino no se tienen estructuras hidráulicas a considerar.

12.3.10 Resultados en Quebrada La Chorrera o El Molino (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Chorrera o El Molino se presentan en el Mapa 30. En este se muestran las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. Se puede observar que dadas las altas pendientes del cauce, el flujo tiene altas velocidades y las profundidades son bajas.

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

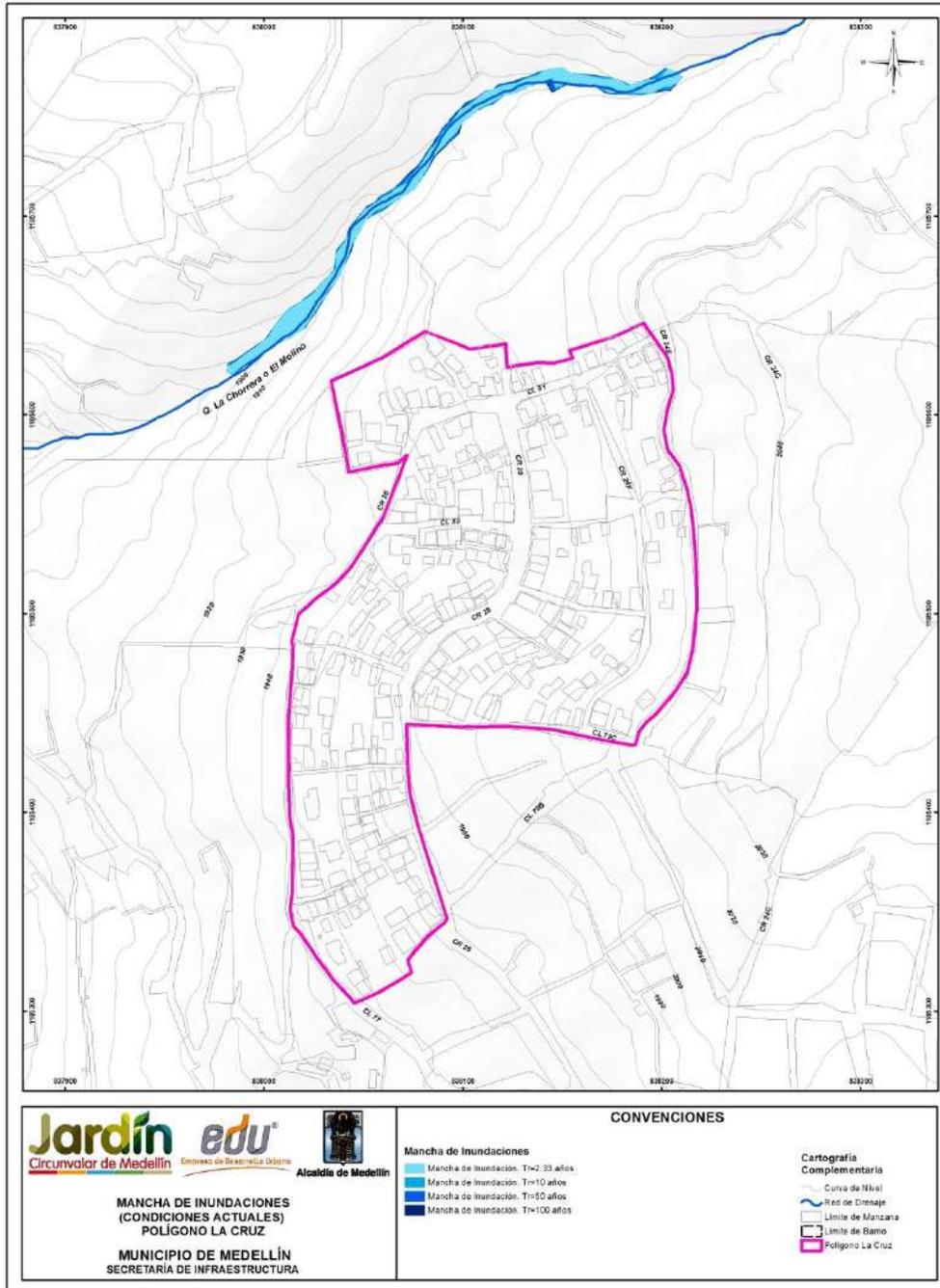
A continuación se describen los resultados de la modelación hidráulica en la Quebrada El Molino. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados.

Como se puede observar en el Mapa 30, debido a la gran profundidad del cauce de la Quebrada La Chorrera o El Molino no se presentan desbordamientos que puedan afectar directamente el polígono de estudio.

Para las condiciones del cauce de la quebrada La Chorrera o El Molino en el tramo evaluado, las profundidades máximas de flujo varían entre 0.40 m y 1.96 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.61 m y 2.81 m para 100 años periodo de retorno, las velocidades máximas para 2.33 años varían entre 2.17m/s y 8.44 m/s y para 100 años entre 2.87 y 10.32 m/s. Las profundidades y las velocidades en la llanura son de un rango menor, debido a las altas rugosidades y flujos característicos de estas zonas. Lo anterior se resume en la Tabla 47.

Tabla 47. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el tramo de estudio en la Quebrada La Chorrera o El Molino (Condiciones actuales)

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.4	1.96	0.48	2.27	0.54	2.52	0.61	2.81
Profundidad Llanuras	0	1.24	0	1.61	0	1.87	0	2.87
Velocidad en el canal	2.17	8.44	2.46	8.67	2.75	9.45	2.87	10.32
Velocidad en Llanuras	0	1.63	0.04	2.63	0.02	5.13	0.02	6.5



Mapa 30. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales para el Polígono La Cruz
(21_LCHManchalnundaciones_Medellin_C y 21_LCHManchalnundaciones_Medellin_T)

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

13. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

13.1 METODOLOGÍA

13.1.1 Objetivo y aspectos generales

Con la metodología planteada se pretende implementar un método cuantitativo y fácilmente reproducible, que permita definir las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa. La metodología implementada es de reconocida validez, toda vez que ha permitido delimitar y caracterizar los diferentes niveles de amenaza (alta, media y baja) de la zona del “Proyecto Barrios Sostenibles”

De forma general, la metodología comprende el análisis de las condiciones de estabilidad determinándose el factor de seguridad a partir de una teoría de equilibrio límite. Posteriormente, se realizan los respectivos análisis para determinar la amenaza por movimientos en masa, mediante el cálculo de la probabilidad de falla, considerando la variabilidad intrínseca de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un factor detonante.

El proceso de determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla al interior de la UMI y del polígono, se realiza para ciertos escenarios que comprenden condiciones actuales y naturales de la ladera y bajo la acción de escenarios críticos como elementos detonantes, como por ejemplo la actuación del sismo. Finalmente, se realiza un análisis considerando las obras proyectadas, para lo cual, en el caso de la evaluación de la estabilidad, se recurre a análisis puntuales de secciones bidimensionales en las que igualmente se determinan las condiciones de amenaza.

Se hizo uso de toda aquella información básica útil y disponible desde el punto de vista geológico y geotécnico, como por ejemplo, la realización de exploración geotécnica, la caracterización de los materiales a través de los ensayos de laboratorio y la instrumentación geotécnica instalada. Finalmente, los resultados se presentan de forma regional o general sobre el área de estudio correspondiente a la UMI, a través de una Herramienta SIG.

Se resalta que la metodología mediante el uso de teorías de equilibrio límite, factor de seguridad y probabilidad de falla, sólo es aplicable para movimientos de remoción en masa como deslizamientos, flujos o desprendimientos de roca. Cualquier otro tipo de movimiento o problemática, como por ejemplo subsidencias y fenómenos erosivos, no pueden ser analizados de forma cuantitativa.

13.1.2 Escenarios de análisis

Para el análisis de la amenaza por movimientos en masa se consideraron básicamente cuatro escenarios, los cuales se explican de forma resumida a continuación.

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

13.1.2.1 Escenario 1

Este escenario corresponde a la situación actual y para los procesos por movimientos en masa identificados como parte del modelo geológico-geotécnico propuesto para el área objeto de estudio, el cual fue presentado en el Capítulo 4 de este informe. En este escenario, se determinó el factor de seguridad y la probabilidad de falla considerando la variabilidad natural de los parámetros de resistencia al corte de cada uno de los materiales geológicos y geotécnicos que se encuentran al interior de la UMI.

Considerando los hallazgos encontrados a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas dado que la presencia del nivel freático se da en profundidad.

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, 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 en el caso particular de la UMI La Cruz.

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 en la cota 1847 msnm.

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI La Cruz se presentan pendientes en el terreno mayores que 30° y la presencia de un drenaje natural que funciona como sistema 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). El tiempo de concentración promedio asociado a estas condiciones de pendiente es de 18.5, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

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 La Cruz, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) donde sus índices de plasticidad no superan 32 %, los límites líquidos están entre 50% y 88% y los porcentajes de saturación son entre el 73% y 98%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes de permeabilidad a través de ensayos de laboratorio de consolidación, realizados sobre algunas muestras de la zona arrojaron valores no menores de 1×10^{-9} m/s, lo que hace que se trate de materiales altamente impermeables.

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.

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

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 7 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 contemplará 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 realizarán mediante análisis bidimensionales en las zonas donde se tengan proyectadas las obras de 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 116).

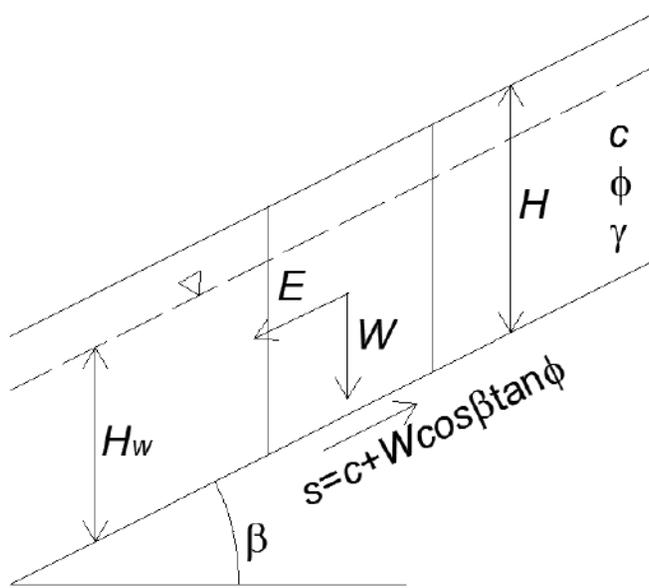


Figura 116. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar

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 corte 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 depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), cenizas volcánicas (Qcv) y, además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

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

Considerando entonces las diferentes formaciones geológicas de la zona, se establecieron varios perfiles geológicos geotécnicos que atraviesan la UMI La Cruz 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 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 menor que 10 m (Capítulo 4).

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

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

comparado en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico.

13.1.4 Cálculo de la probabilidad de falla

Finalmente, una vez determinadas las condiciones de estabilidad de la zona reflejados de forma cuantitativa en el factor de seguridad, se procede con el cálculo de la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que los valores considerados límites sean excedidos. En el caso del factor de seguridad (FS), la probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que ese factor de seguridad sea menor que la unidad.

Para determinar entonces la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en ladera, se recurre a los métodos probabilísticos que consisten en herramientas que introducen la incertidumbre en la formulación de los problemas para obtener la probabilidad de que un sistema o estructura no cumpla los requisitos de diseño o estabilidad. Utilizan técnicas de confiabilidad estructural, de estimación de probabilidades y de análisis de riesgos. Estos son los adoptados para modelar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos para estimar la probabilidad de falla de los taludes (Vega, 2013).

Los métodos probabilísticos más utilizados en el análisis de estabilidad y probabilidad de falla en geotecnia son:

- ✓ Método de las estimativas puntuales
- ✓ Método de primera orden segundo momento (FOSM)
- ✓ Método de primera orden momento de confiabilidad (FORM)
- ✓ Monte Carlo

Para este proyecto, la probabilidad de falla al deslizamiento será evaluada utilizando la metodología del índice de confiabilidad (β) el cual es una aplicación directa del método de Primera Orden y Segundo Momento (FOSM). Este método del índice de confiabilidad (β) será utilizado sobre las ecuaciones de resistencia (R) y la carga (C) que definen el factor de seguridad por equilibrio límite.

La diferencia entre la resistencia (R) y la carga (C) es lo que se denomina como margen de seguridad (M).

$$M = R - C$$

La resistencia y la carga manejan variaciones, por lo que estas dos magnitudes poseen momentos estadísticos como valores medios o esperados, desviaciones y covarianzas entre otros.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_C$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{RC}\sigma_R\sigma_C$$

Donde μ_R y μ_C son las medias o esperanzas de la resistencia y la carga respectivamente, σ_R y σ_C son las desviaciones estándar de la resistencia y la carga respectivamente, elevadas al cuadrado, estas últimas correspondiendo a la $Var(R)$ y la $Var(C)$ respectivamente. Finalmente, ρ_{RC} es el coeficiente de correlación entre la carga y la resistencia.

El índice de confiabilidad (β) expresa la distancia que existe entre la media y en este caso el valor crítico del margen de seguridad expresado en unidades de desviación estándar. Si la carga y la resistencia no presentan correlación alguna, entonces:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_C}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}$$

Partiendo de la definición de factor de seguridad al deslizamiento presentada en el numeral anterior, es posible reorganizar los términos de la definición y separar los esfuerzos resistentes y los esfuerzos actuantes causados por las fuerzas desestabilizadoras. Las variables que representan la resistencia (R) y la carga (C) siguen una distribución normal en los rangos de interés. Reorganizando los términos de la ecuación de factor de seguridad se tiene en el caso estático 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 POLIGONO LA CRUZ</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

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 píxel individual, a través de la implementación del SIG (Aleotti & Chowdhury, 1999; Anbalagan, 1992; Carrara, 1995; Dai & Lee, 2001).

Según Van Westen & Terlien (1996), la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 116) 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 píxel, 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 117).

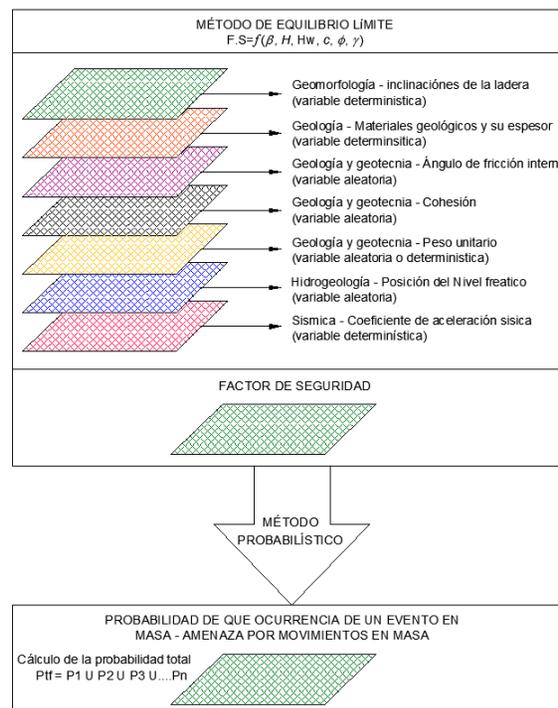
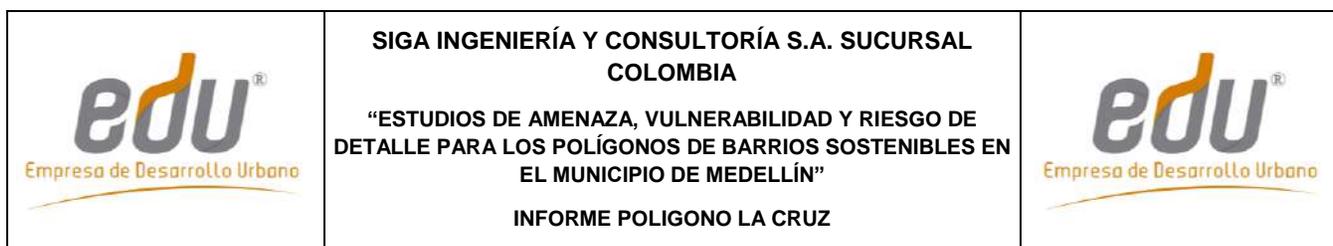


Figura 117. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa



A través de un método probabilístico, se obtiene la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de inestabilidad que equivaldría en este caso, a la amenaza por un fenómeno de inestabilidad.

Para todos los escenarios, se elaboraron mapas de amenaza a escala 1:2.000 o de mayor detalle para el área urbana (1:1.000 o 1:500) y 1:5.000 o de mayor detalle para el área rural (1:1.000 o 1:500).

Finalmente, dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa también se considerará el efecto de la red hídrica, en particular lo relacionado con los procesos de socavación en los cauces que pudieran afectar la estabilidad de las laderas adyacentes. Debido a que estos deslizamientos o procesos son difíciles de modelar con una metodología regionalizable, se partió de los resultados de la estimación de la socavación en los cauces para evaluar los factores de seguridad a través de análisis de estabilidad convencionales bidimensionales. Dichos análisis se realizaron de forma local, sobre las secciones donde se manifiesten las mayores afectaciones por efectos de la dinámica fluvial.

13.1.6 Criterios para calificar la amenaza

La Ficha Técnica del Proyecto Barrios Sostenibles estableció unos criterios para juzgar el factor de seguridad y la probabilidad de falla que definen la amenaza por movimientos en masa. No obstante, esta oficina consideró que en el caso de los criterios de factor de seguridad, los mismos son estrictos y se alejan de las recomendaciones establecidas por algunas referencias de gran aceptación científica como lo son el Control Geotécnico de Hong Kong (GEO), el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Por lo anterior se consideró la propuesta de rangos de factor de seguridad mostrado en la Tabla 48. En la Tabla 49 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 48. Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad

Nivel de Amenaza	Factor de Seguridad (F.S)
Bajo	>1.5
Media	1.2 a 1.5
Alto	<1.2

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

Tabla 49. 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

En el Mapa 31 y el Mapa 32 se presentan los respectivos mapas de análisis de factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas respectivamente, con respecto a los cuales se pueden hacer los siguientes comentarios:

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas se puede ver que alrededor del 70% 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° , coincidiendo con un proceso activo en la parte alta por fuera del polígono y con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años al interior del polígono.
- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones pseudoestáticas, representativo del escenario con sismo, se puede ver que la mayor parte del polígono presenta valores de FS menores o iguales que 1.2. Algunas de las zonas con factores de seguridad bajos coinciden con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años. Vale la pena aclarar que factores de seguridad en caso pseudoestático mayores que 1.1 pueden considerarse aceptables, de tal manera que los FS considerados bajos en el Polígono La Cruz realmente alcanzan, en algunos puntos, valores que pudieran ser adecuados.

El Mapa 33 muestra los resultados de los análisis de probabilidad de falla considerando las variaciones en los parámetros de resistencia al corte. El resultado obtenido es coherente con el resultado del mapa de aptitud geológica – geotécnica (Mapa 20). Esto se evidencia en el hecho de que las zonas de amenaza alta y media por movimientos en masa debido a la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte, corresponden a las zonas catalogadas en la aptitud geológica como zonas no aptas y las zonas clasificadas con amenaza baja se correlacionan con las zonas aptas y zonas aptas con restricciones.

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. Como se muestra en el Mapa 34, se evidencia la afectación de casi la totalidad de la zona con probabilidades de falla aproximadamente

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

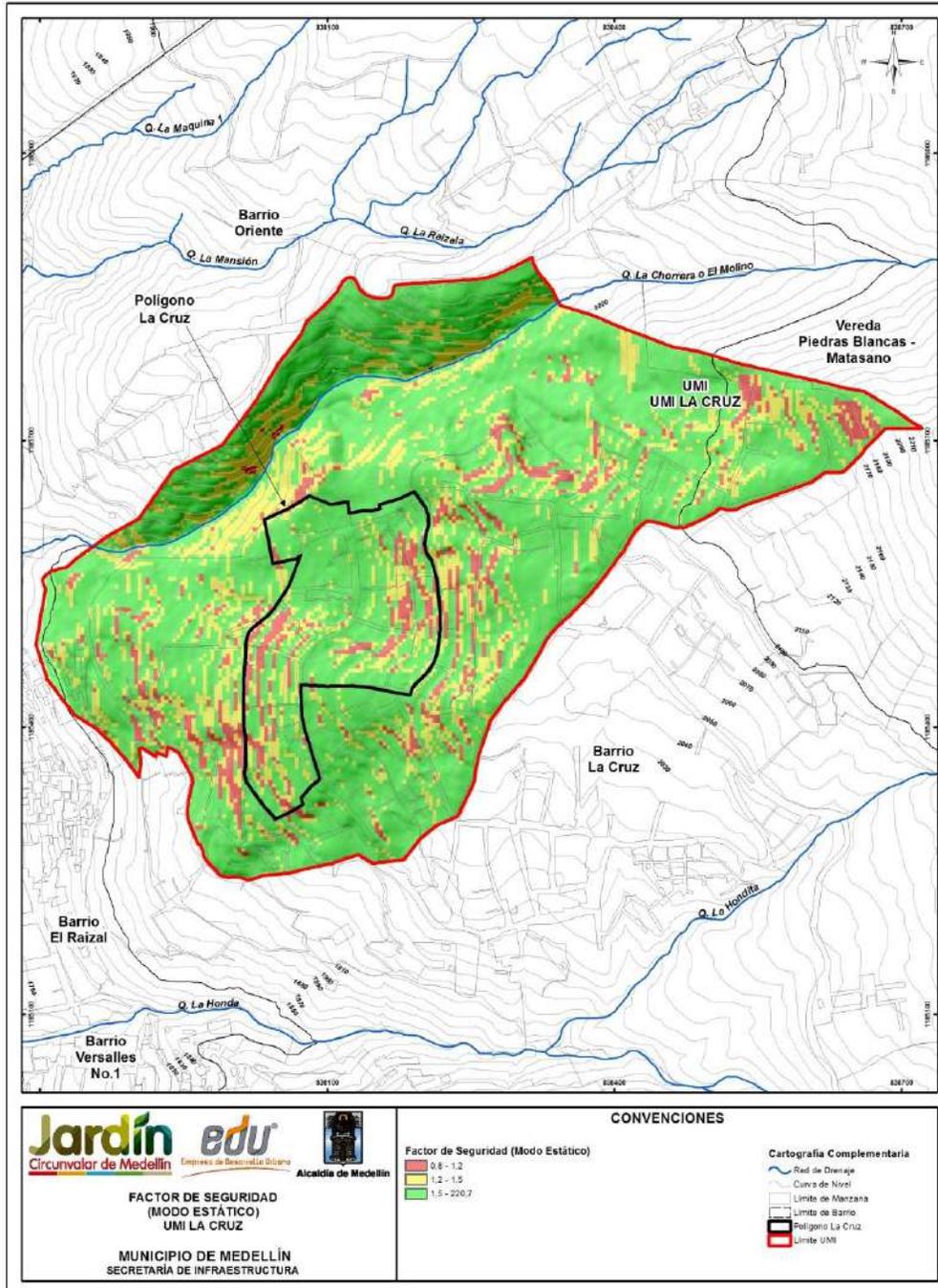
en un 80%. Es importante aclarar que este escenario es considerando que el sismo de periodo de retorno de 475 años podría actuar de forma inmediata.

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 34 por el respectivo periodo de retorno de 475 años. Esto permitió obtener el Mapa 35 que muestra la probabilidad de falla anualizada considerando la afectación del sismo de la zona. Posteriormente, para hacer la proyección de la probabilidad de falla a 50 años, que se considera es el periodo de exposición, se utilizó una función de probabilidad exponencial.

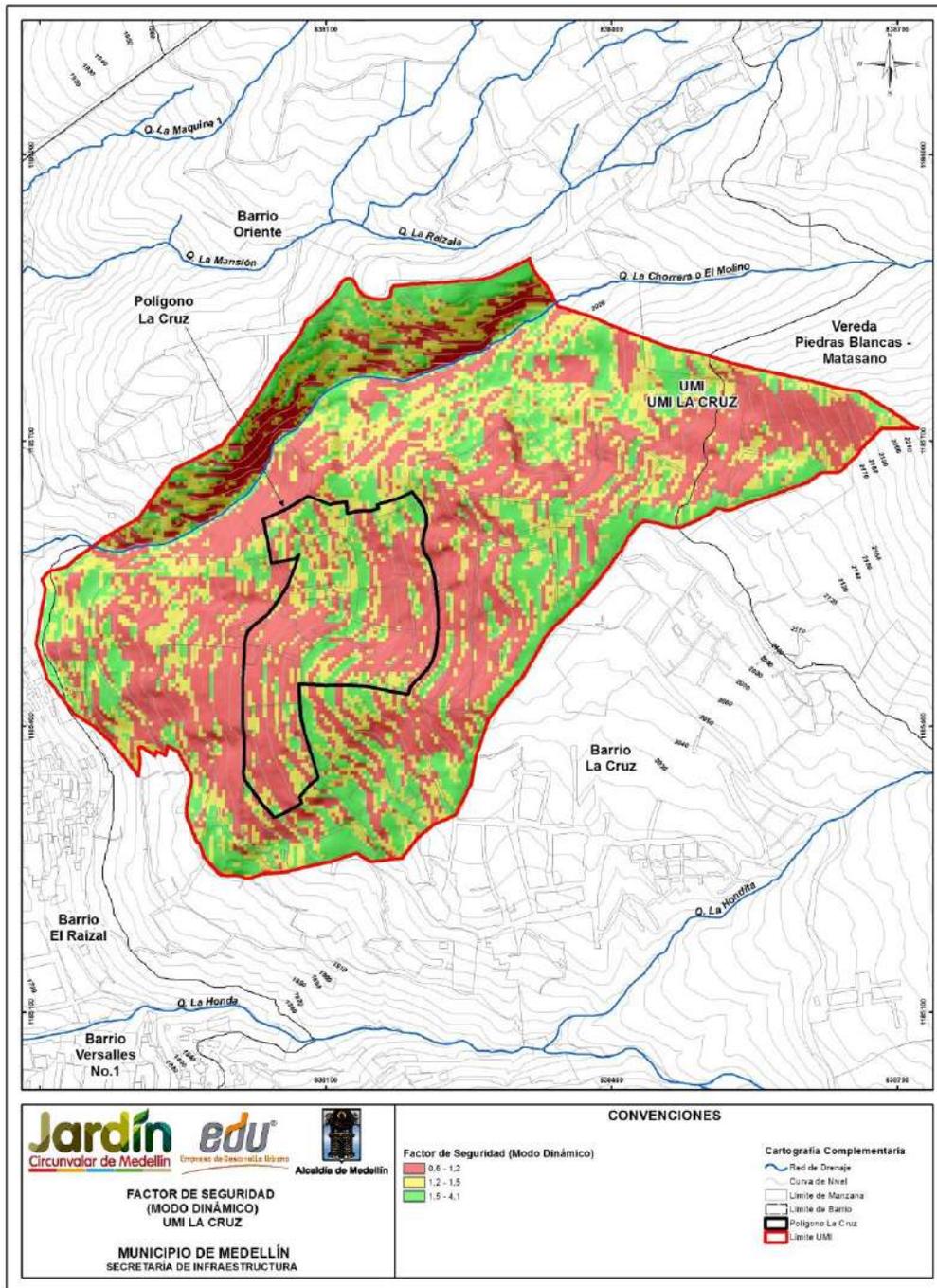
Finalmente, en el Mapa 36 se presenta la zonificación de la amenaza total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte evaluado en el análisis del Mapa 33 y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años.

Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa (Mapa 36) 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 los costados, nororiental y suroccidental. Estos sitios se ubican en ladera urbanizada y no urbanizada con pendientes mayores que 30° y desarrolladas superficialmente en depósitos de flujo de lodos y/o escombros y en el Horizonte IC de Dunitas de Medellín. Al interior del polígono se mapearon, a través de análisis multitemporales, procesos morfodinámicos actualmente inactivos, además de un proceso activo identificado durante la ejecución del presente estudio. 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.

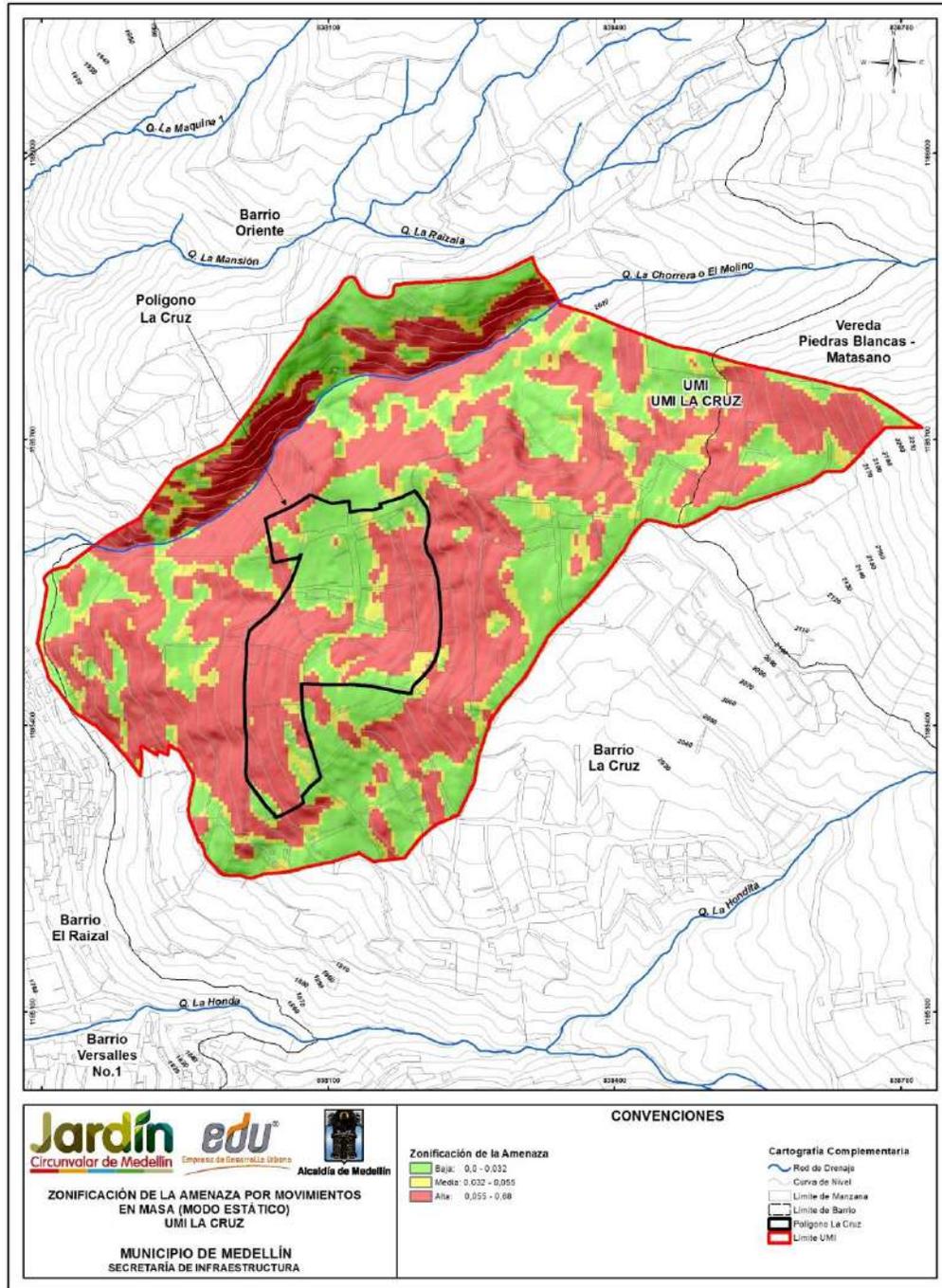
Las áreas con probabilidad de falla alta predominan en el costado oriental y suroccidental del polígono. Estos son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda.



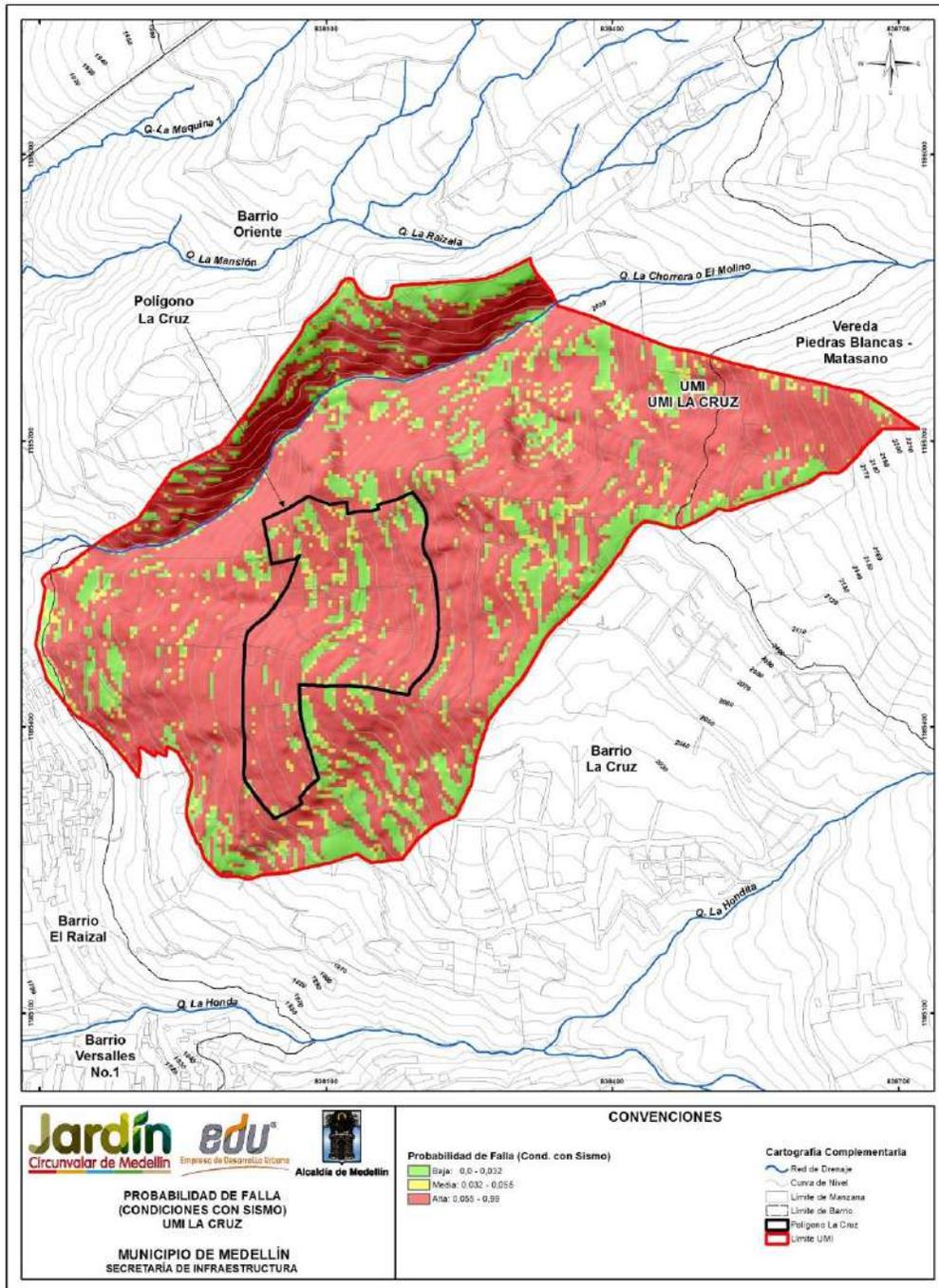
Mapa 31. Análisis del factor de seguridad de la UMI La Cruz en condiciones estáticas (LCHFactorSeguridadEstaticoUMI_Medellin_C)



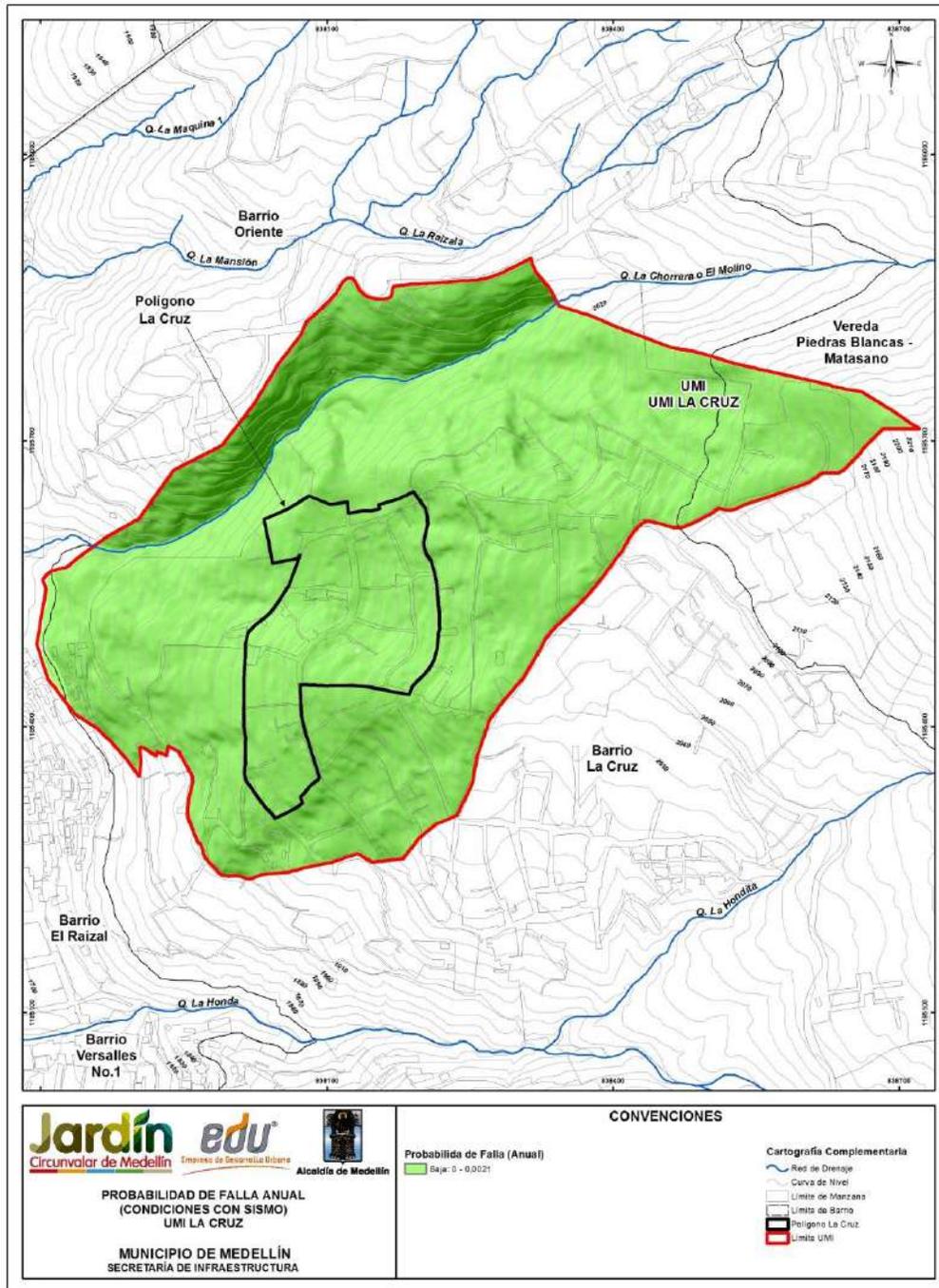
Mapa 32. Análisis del factor de seguridad de la UMI La Cruz en condiciones pseudo-estáticas con sismo de 0.25g (LCHFactorSeguridadDinamicoUMI_Medellin_C)



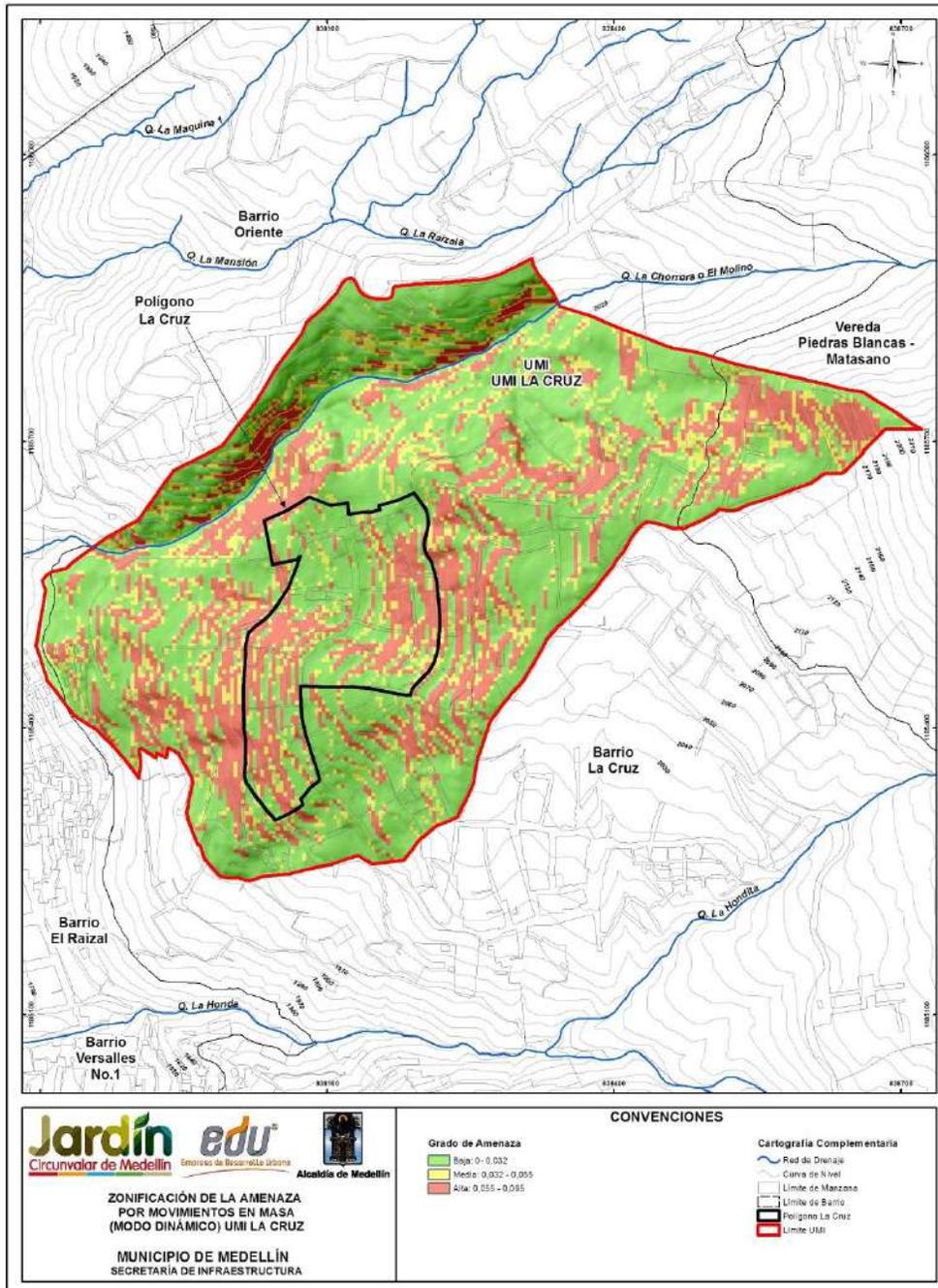
Mapa 33. Análisis de probabilidad falla de la UMI La Cruz en condiciones actuales y naturales
(LCHProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI_Medellin_C)



Mapa 34. Análisis de probabilidad de falla de la UMI La Cruz en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (LCHProbabilidadFallaTotalUMI_Medellin_C)



Mapa 35. Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI La Cruz en condiciones seudo-estático con un sismo 0.25g (LCHProbabilidadFallaAnualUMI_Medellin_C)



Mapa 36. 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_LCHAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y 19_LCHAmenazaMovimientosenMasa_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 118 muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó los valores máximos de socavación.

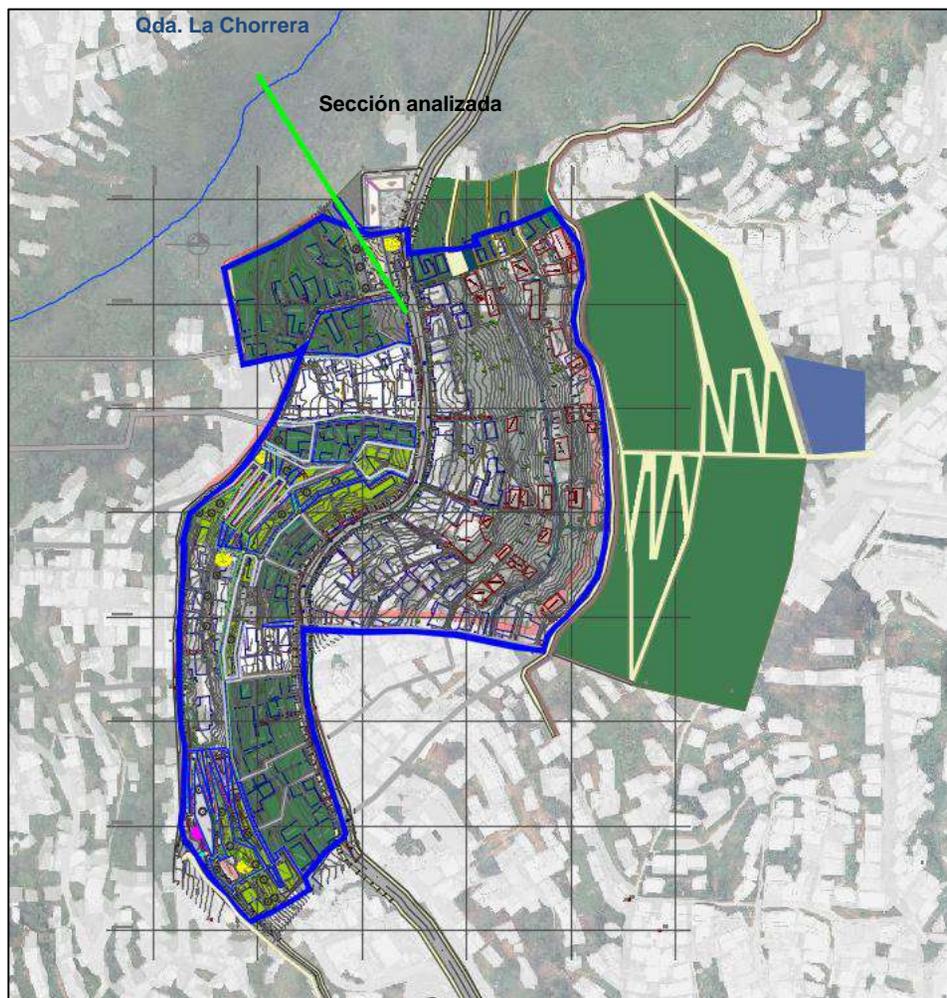


Figura 118. Esquema de localización en planta de la sección analizada

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 119 exhibe los resultados del análisis de estabilidad efectuado. El valor de probabilidad de falla incluida

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

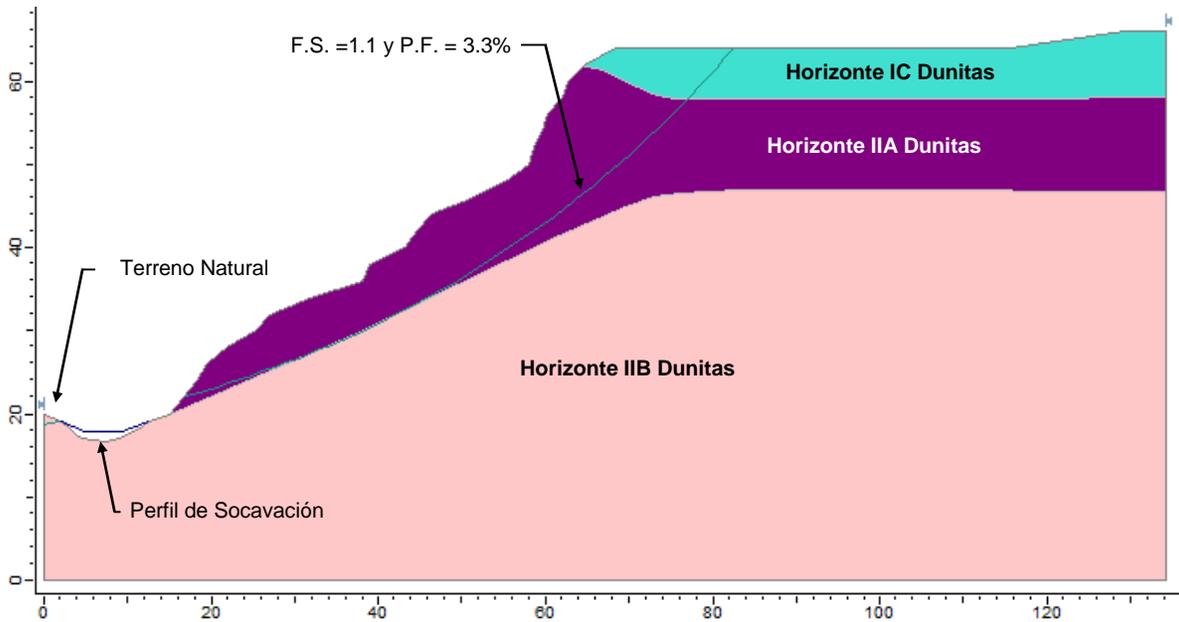


Figura 119. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera

Se observa que la probabilidad de falla es ligeramente mayor que la considerada dentro del rango de amenaza baja. 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 POLIGONO LA CRUZ</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 La Cruz, 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.

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 Fiebiger (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 120). 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.

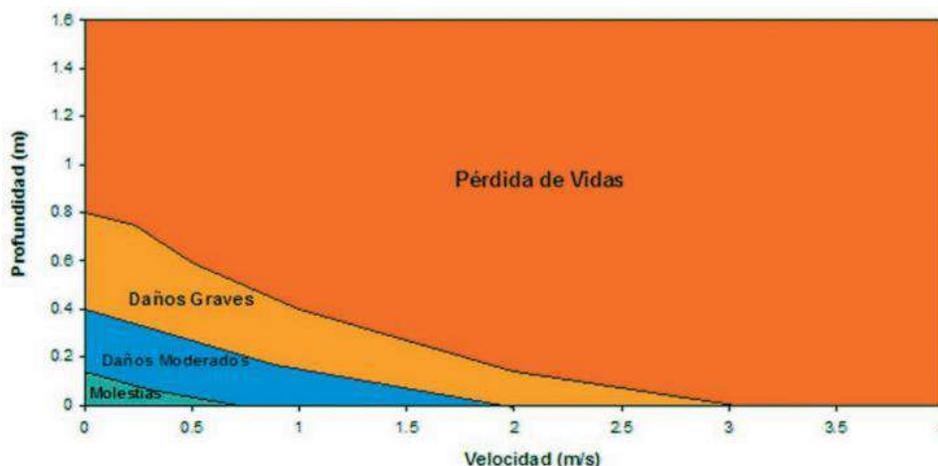


Figura 120. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)

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 50 y en la Tabla 51 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

Tabla 50. 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 51. 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 121 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad, de acuerdo con metodologías de.

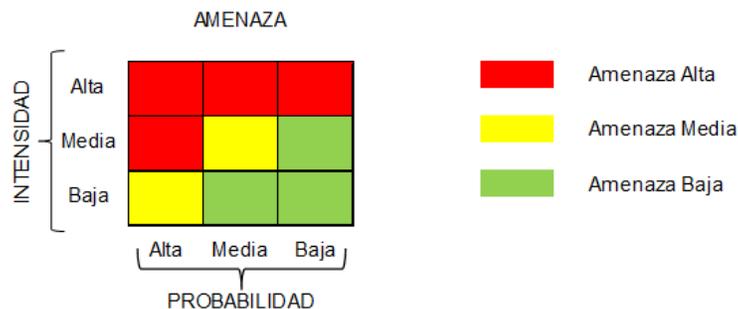


Figura 121. Asignación de la amenaza por Inundación a partir de la Intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al. (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)

Es importante anotar que esta metodología es más general que la recomendada en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, la cual indica que para la zona de cauces de montaña la totalidad del área cubierta por un caudal con un periodo de retorno de 100 años se considera zona de amenaza alta. La justificación de esto radica en que en este tipo de corrientes se presentan casi siempre velocidades altas de flujo que implican una alta energía y capacidad destructiva. Sin embargo, se considera que la metodología adoptada en este estudio permite obtener un mejor detalle en la zonificación de la amenaza dado que considera aquellas situaciones o zonas donde se presenten velocidades y profundidades asociadas a una intensidad media o baja a pesar de ocurrir en un evento de 100 años periodo de retorno. Finalmente, se comprobó que los resultados de la zonificación de la amenaza en las corrientes de este estudio son coherentes con lo planteado por el POMCA, lo cual sirve como validación a la metodología adoptada.

Dado el pequeño tamaño de las celdas que componen la malla del modelo hidráulico en relación con el tamaño de las viviendas, es posible que las edificaciones que están en contacto parcial o total con las manchas de inundación tengan en su perímetro de 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.

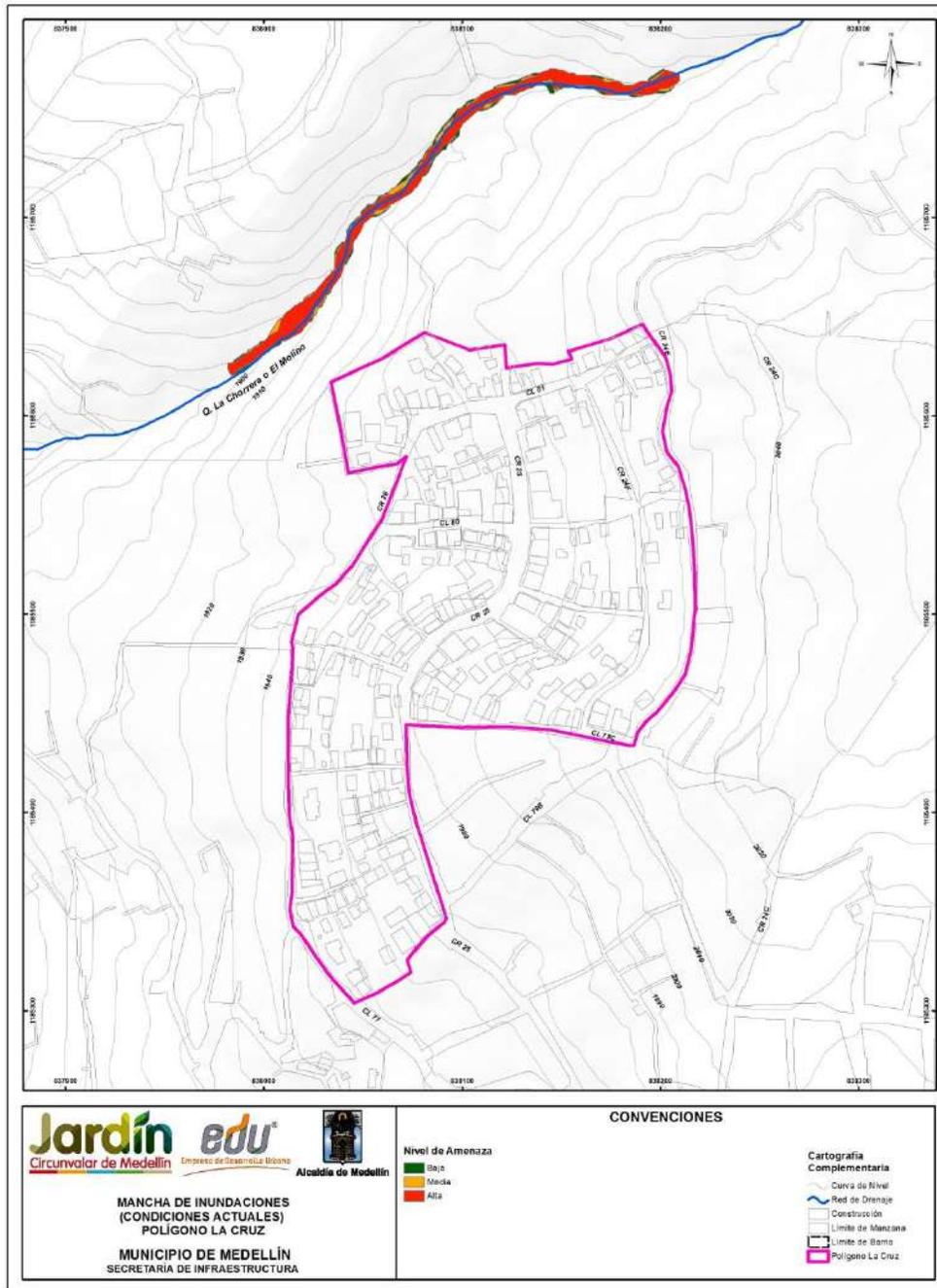
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</p>	
---	---	---

14.3 RESULTADOS

La evaluación de la amenaza por inundaciones generada para la Quebrada La Chorrera o El Molino, cercana al Polígono La Cruz, arrojó resultados que indican que la zona que corresponde al cauce principal de la quebrada 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.

Sin embargo, la amenaza no afecta estructuras ni zonas dentro del polígono. Además no hay presencia de viviendas cercanas que puedan ser afectadas por los desbordamientos que se puedan generar durante eventos extremos.

En el Mapa 37 se presentan el análisis de la amenaza por inundaciones para la quebrada La Chorrera o El Molino en el Polígono La Cruz.



Mapa 37. Amenaza por inundaciones en condiciones actuales en la Quebrada La Chorrera o EL Molino del Polígono La Cruz
(25_LCHAmenazasinundaciones_Medellin_C y 25_LCHAmenazasinundaciones_Medellin_T)

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

15. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

15.1 ASPECTOS GENERALES

Las avenidas torrenciales que son analizadas como parte de este estudio corresponden a los flujos de una mezcla de agua y sedimento en altas concentraciones a través de los principales cauces que tienen influencia sobre el polígono de estudio. Este tipo de fenómenos pueden tener tres orígenes diferentes según Takahashi (2007): el primero, por remoción y transporte del material del lecho de los cauces durante una creciente, el segundo por deslizamientos que aportan material a los cauces el cual es finalmente arrastrado por una creciente, y el tercero por la falla de una presa. Los fenómenos de avenidas torrenciales a considerar en el presente estudio corresponden a aquellos cuyo origen está relacionado con la combinación de eventos de deslizamiento en las laderas de la cuenca que depositan material en el cauce y eventos de crecientes máximas en los cauces. Así mismo se analizó la posibilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales con origen en la remoción y transporte del material del lecho (segundo tipo de origen), pero se descartaron las avenidas torrenciales con origen en la falla de una presa (tercer tipo de origen) dada la inexistencia de estas estructuras en el polígono en estudio.

Así las cosas, la información básica para el estudio de las avenidas torrenciales corresponde a la misma empleada para el estudio de las inundaciones, en adición a los resultados del estudio de los movimientos en masa, en especial la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos y la caracterización de los fenómenos de inestabilidad, así como las características de los materiales que conforman el lecho de los cauces.

15.2 AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA

Del análisis de la amenaza por movimientos en masa en el polígono de estudio se dedujo que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos que podrían alcanzar los cauces que ejercen influencia en el polígono presenta un valor del 10% en el periodo de análisis de 50 años.

Por su parte, la probabilidad de ocurrencia de las crecientes analizadas en el escenario de amenaza por inundación tienen valores que oscilan entre el 100% para las crecientes de 2.33 años de periodo de retorno hasta el 39.5% para las crecientes de 100 años de periodo de retorno, considerando también un periodo de análisis de 50 años.

De acuerdo con los resultados del análisis de movimiento en masa (Numeral 13.1), en el que se determinó que las lluvias no son un factor detonante para la generación de deslizamientos en la zona de estudio, ambos eventos pueden considerarse estadísticamente independientes. Por tanto, la probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos eventos formadores de la avenida torrencial oscila entre 4% y 10% en el periodo de 50 años.

Es importante tener en cuenta que los materiales que se depositarían en el cauce en un eventual deslizamiento o movimiento en masa perderían completamente su cohesión, haciéndolos susceptibles de ser movilizados si se tiene en cuenta la importante magnitud

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

de los caudales estimados para las crecientes máximas, superiores a 20 m³/s para diferentes periodos de retorno.

Por otro lado, según lo expuesto en el Numeral 4.2, durante las actividades de exploración geológica se detectaron depósitos de material de origen torrencial en la Quebrada El Molino, cerca de la cota 1900 msnm.

Estos dos aspectos que acaban de citarse, en conjunto con lo reportado en Desinventar, indican que la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de avenidas torrenciales con origen en movimientos en masa no puede ser despreciable para el polígono de estudio.

15.3 AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL MATERIAL DEL LECHO

En este numeral 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 52.

En la Tabla 52 puede observarse que los materiales de las corrientes estudiadas tienen cohesiones que varían entre 7,9 kPa y 24,2 kPa correspondiendo el primero a depósitos aluviotorrenciales 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 El Molino se presenta en la Figura 122. 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 casi la totalidad del cauce analizado, con excepción de un par de tramos de 1 m aproximadamente, el esfuerzo cortante que se transmite al lecho es inferior a la menor de las cohesiones 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 con este tipo de origen en el polígono de estudio. Es importante aclarar que éste análisis considera los materiales existentes en el lecho, los cuales presentan los valores de cohesión mostrados en la Tabla 52. Esto último a diferencia del análisis realizado en el Numeral 15.2, donde los materiales provenientes de deslizamientos tendrían cohesión nula quedando más susceptibles a ser movilizados durante el paso de la creciente, según lo presentado en la Figura 122.

Tabla 52. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el Polígono La Cruz

LA CRUZ Quebrada La Chorrera o El Molino	ϕ'	C'	γ
	(°)	(kPa)	kN/m ³
Depositos de flujo de lodos y escombros	24.13	22.79	17.43
Deposito aluvio torrencial	27.5	7.9	18.21
Dunitas de Medellín (JKuM)	26.5	24.2	16.71

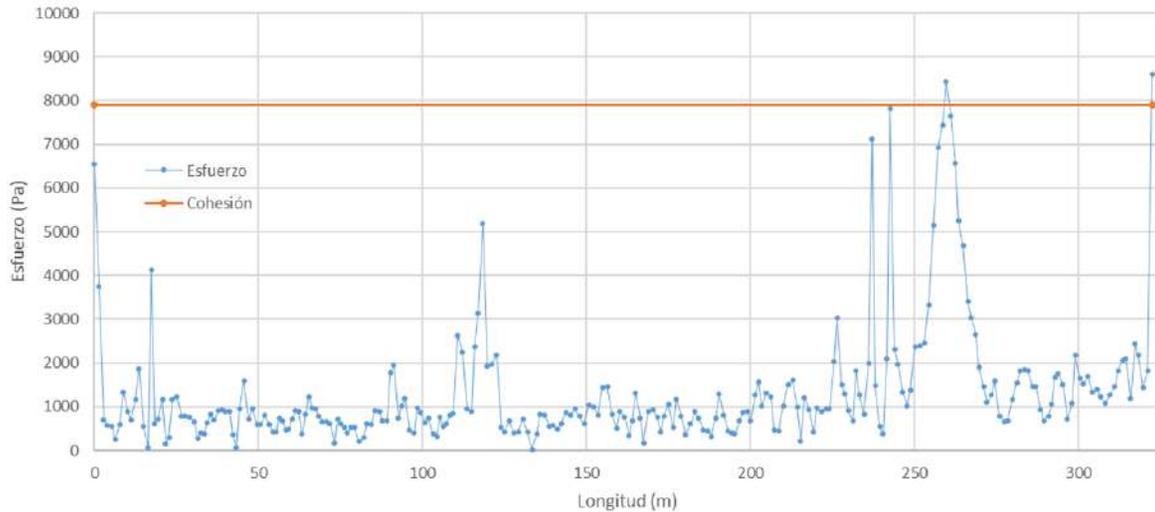


Figura 122. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes a lo largo de la Quebrada La Chorrera o El Molino

15.4 METODOLOGÍA

La metodología para el análisis de las avenidas torrenciales comparte gran parte de los procedimientos del estudio del fenómeno de las inundaciones: modelo de elevación digital, direcciones de drenaje, delimitación y caracterización de cuencas y estimación de caudales, que en este tipo de análisis se denominan caudales líquidos. De manera adicional, se toman los resultados del estudio del fenómeno de movimiento en masa, incorporando los sedimentos que se convierten en caudales sólidos dentro de la mezcla que conforma un fluido que puede presentar propiedades y comportamiento diferente en comparación con el flujo de aguas claras. Este tipo de flujos normalmente presentan un mayor peso específico y una mayor viscosidad que el agua clara, y pueden comportarse como fluidos no newtonianos cuando la concentración volumétrica de sedimentos supera un umbral cercano al 20%.

El Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 hace referencia al Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para establecer la metodología de análisis de los cauces con características torrenciales. El POMCA indica que “si la corriente presenta características tales que la hacen susceptible a flujos torrenciales, el retiro hidrológico se calculara a partir de un incremento del 40 % en el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años. Este incremento sería un factor de seguridad en el caso de caídas de material de arrastre en el cauce, como es el típico de las corrientes con flujos torrenciales.” El Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 indica que “de acuerdo con lo establecido en el Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para cauces con características torrenciales, los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 100 años, deben ser mayorados en un 40%.”

Sin embargo, tanto el POMCA como el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012, no son explícitos en el tipo de modelo a emplear para analizar este tipo de fenómenos, y es común en el medio el empleo de modelos de aguas claras a pesar de las diferencias en el comportamiento hidráulico entre los dos fenómenos (inundaciones y avenidas torrenciales).

En relación con el tipo de modelo, en este estudio se considera importante emplear un modelo que represente con mayor precisión el comportamiento de la mezcla agua-sedimentos. Existen en la actualidad diversas aproximaciones para modelar los flujos con altas concentraciones de sedimentos. Entre ellas se resaltan las siguientes tres: la primera consiste en la aplicación de las ecuaciones tradicionales de capacidad de carga y transporte de sedimentos, la segunda que tiene en cuenta los fenómenos de difusión y convección de los sedimentos y la tercera que aplica la conservación tanto en el volumen como en la concentración de los sedimentos. La primera aproximación se considera no viable puesto que en los flujos hiperconcentrados se inhibe o anula la velocidad de caída de las partículas debido a la viscosidad del fluido y al contacto entre partículas. La segunda aproximación es de mayor complejidad y busca predecir la depositación de sedimentos según fracción de tamaño. La tercera es más práctica y su objetivo es balancear el volumen potencial de sedimentos con el volumen de agua para un flujo de diseño (O'Brien, 2010).

En este estudio, la modelación de los flujos hiperconcentrados que ocurren durante avenidas torrenciales se realiza a través del Modelo FLO-2D, el cual aplica la conservación tanto en el volumen como en la concentración de los sedimentos (tercera aproximación descrita). Es un modelo en el cual las propiedades del fluido controlan el flujo y en el que se trata al fluido como un continuo. Su limitación consiste en que no permite el intercambio de sedimento con el lecho pero su gran ventaja es que permite predecir el área de inundación y afectación para la condición más desfavorable (O'Brien, 2010). El modelo emplea entonces la siguiente ecuación para estimar la concentración volumétrica:

$$C_v = \frac{\text{Volumen de sedimento}}{\text{Vol. de Sed.} + \text{Vol. de Agua}} = \frac{\text{Volumen de sedimento}}{\text{Volumen de la Mezcla}}$$

Partiendo de esta expresión, para obtener el incremento del caudal recomendado por el AMVA (2012) para considerar el efecto de torrencialidad, del 40% respecto al caudal de aguas claras, la concentración volumétrica que debe emplearse es de 0,3.

El peso específico de la mezcla se calcula a partir de la siguiente expresión, donde γ es el peso específico del agua, C_v es la concentración volumétrica y γ_s es el peso específico de los sedimentos.

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma)$$

El factor de hinchamiento, o *BF* por sus siglas en inglés (Bulking factor) refleja el incremento en el volumen por efecto de la concentración de sedimentos, el cual se calcula a partir de la siguiente expresión:

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

$$BF = \frac{1}{(1 - C_v)}$$

Este procedimiento se realiza sobre los cauces más importantes que tienen influencia en el polígono de estudio, en el tramo comprendido al interior del polígono.

Al igual que para inundaciones, la asignación de la amenaza por avenidas torrenciales se realiza a partir de la combinación de la intensidad del fenómeno y de su probabilidad de ocurrencia de acuerdo con metodologías suizas y austriacas para evaluar la amenaza en general, por ejemplo, Ofee et al (1997) y Fiebiger (1997) en Lopez y Courtel, (2006) y en FLO-2D (2012). La intensidad del fenómeno está dada por los valores de la profundidad y la velocidad del flujo en las avenidas torrenciales, mientras que la probabilidad de ocurrencia es inversamente proporcional al periodo de retorno del evento.

La categorización de la intensidad se realiza empleando la clasificación recomendada en Fiebiger (1997), OFEE (1997) y O'Brian (2010) donde la máxima profundidad y el producto de la máxima profundidad con la máxima velocidad son los factores que determinan el grado de intensidad del fenómeno, según la **Tabla 53**.

Tabla 53. Asignación de la calificación de la Intensidad de Avenidas Torrenciales

Calificación de la Intensidad	Profundidad Máxima (m)	OP	Producto de profundidad Máxima y Velocidad Máxima (m2/s)
Alta	$h > 1.0 \text{ m}$	ó	$vh > 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0.2 \text{ m} < h < 1.0$	y	$0.2 < vh < 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0.2 \text{ m} < h < 1.0$	y	$vh < 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$

Por su parte, para la probabilidad también se consideran tres categorías, alta, media y baja. A los eventos generados por crecientes cuya probabilidad anual de excedencia es inferior al 2%, es decir aquellos asociados a periodos de retorno superiores a 50 años, se les asigna una calificación de probabilidad baja. Por su parte, se califican con probabilidad media a aquellos eventos asociados a una probabilidad anual de excedencia entre el 2% y el 10%, es decir, con periodos de retorno superiores a 10 años e inferiores o iguales a 50 años. Finalmente, los eventos con una probabilidad anual de excedencia igual o superior al 10% se consideran con una probabilidad alta, es decir a aquellos asociados a periodos de retorno de 10 años o menos.

La calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad según lo recomendado en Fiebiger (1997) y Ofee (1997). Aquellos eventos que presentan una intensidad alta son calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Por su parte, los eventos con probabilidad media e intensidad media se califican con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 123 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza para avenidas torrenciales según la probabilidad y la intensidad.

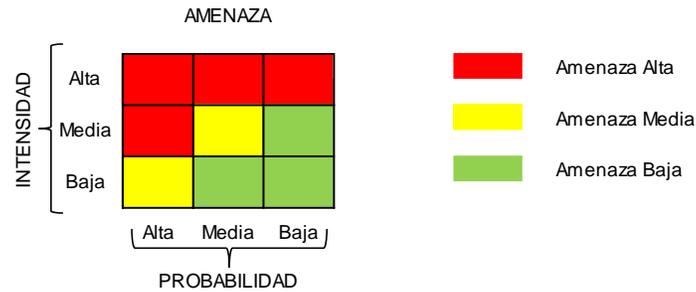


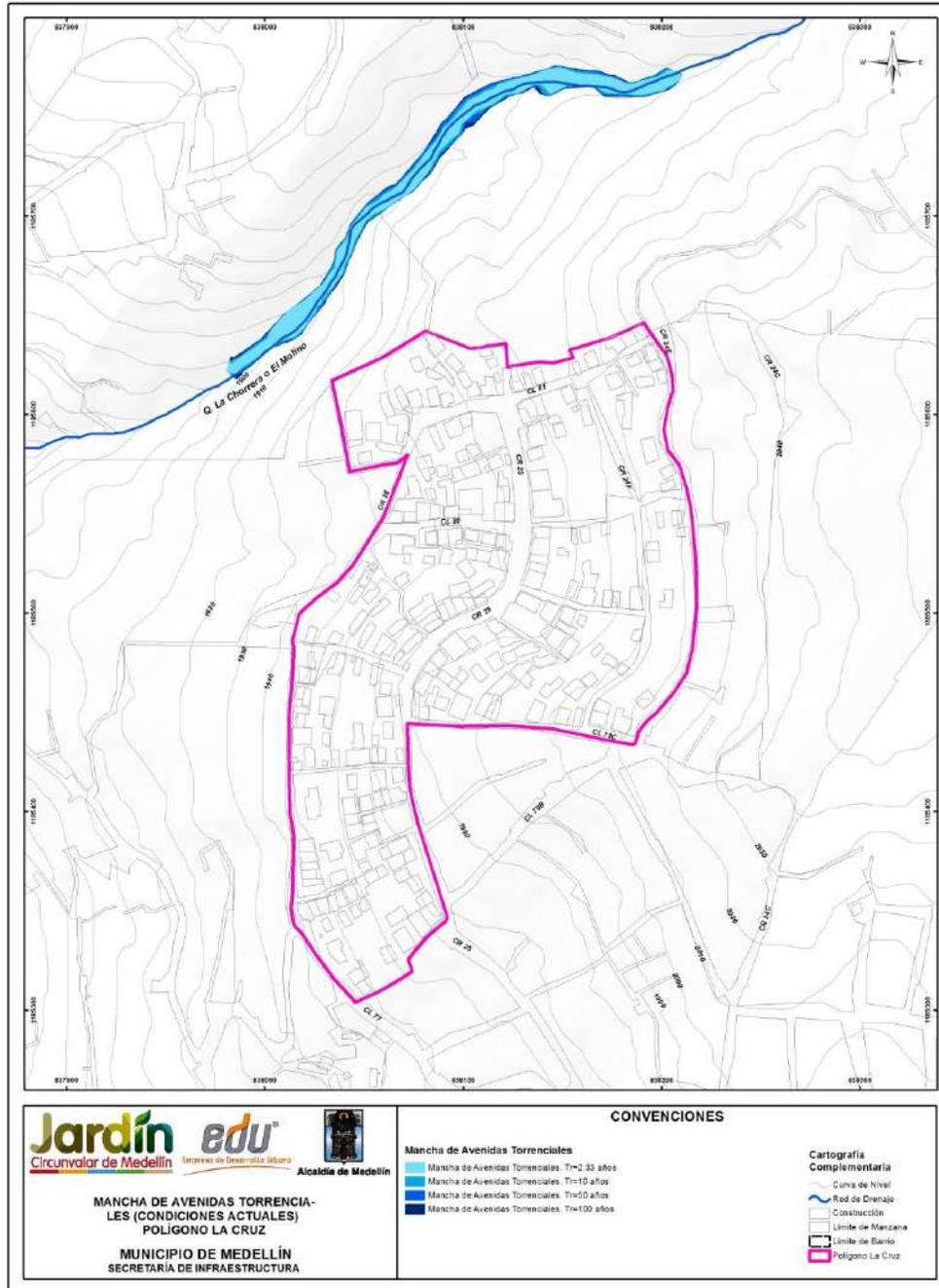
Figura 123. Asignación de la amenaza para avenidas torrenciales a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno

15.5 2RESULTADOS

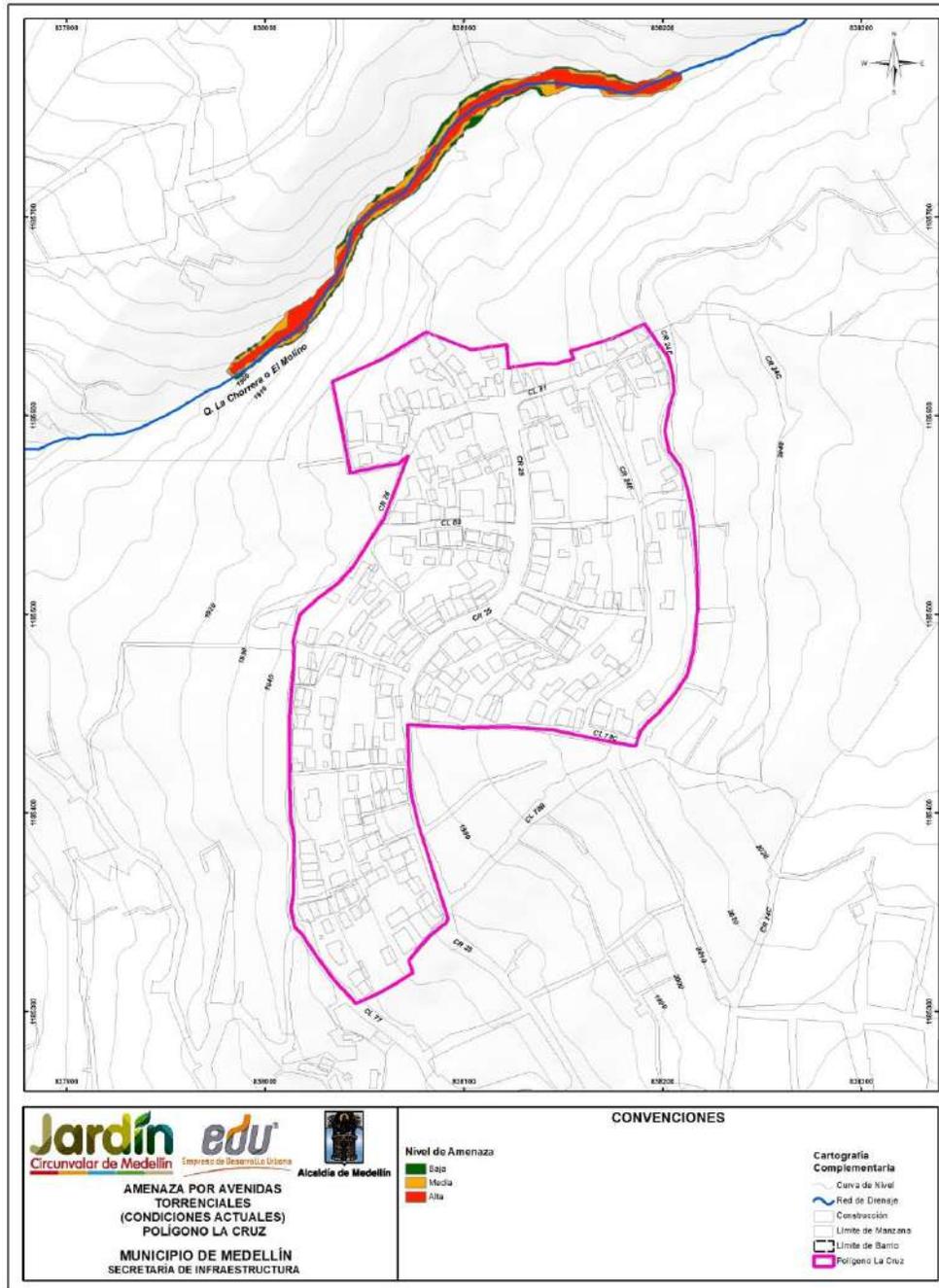
En el Mapa 38 se presenta la mancha de las avenidas torrenciales en condiciones actuales para el tramo de quebrada evaluado. Así mismo, en el Mapa 39 se presenta la amenaza por este fenómeno, ambas estimadas siguiendo la metodología descrita en el numeral anterior.

Puede observarse en estas figuras que las manchas del fenómeno y las manchas de la amenaza quedan fuera del polígono de estudio, por lo que puede concluirse que al interior del Polígono La Cruz no se presenta amenaza por ese tipo de fenómenos.

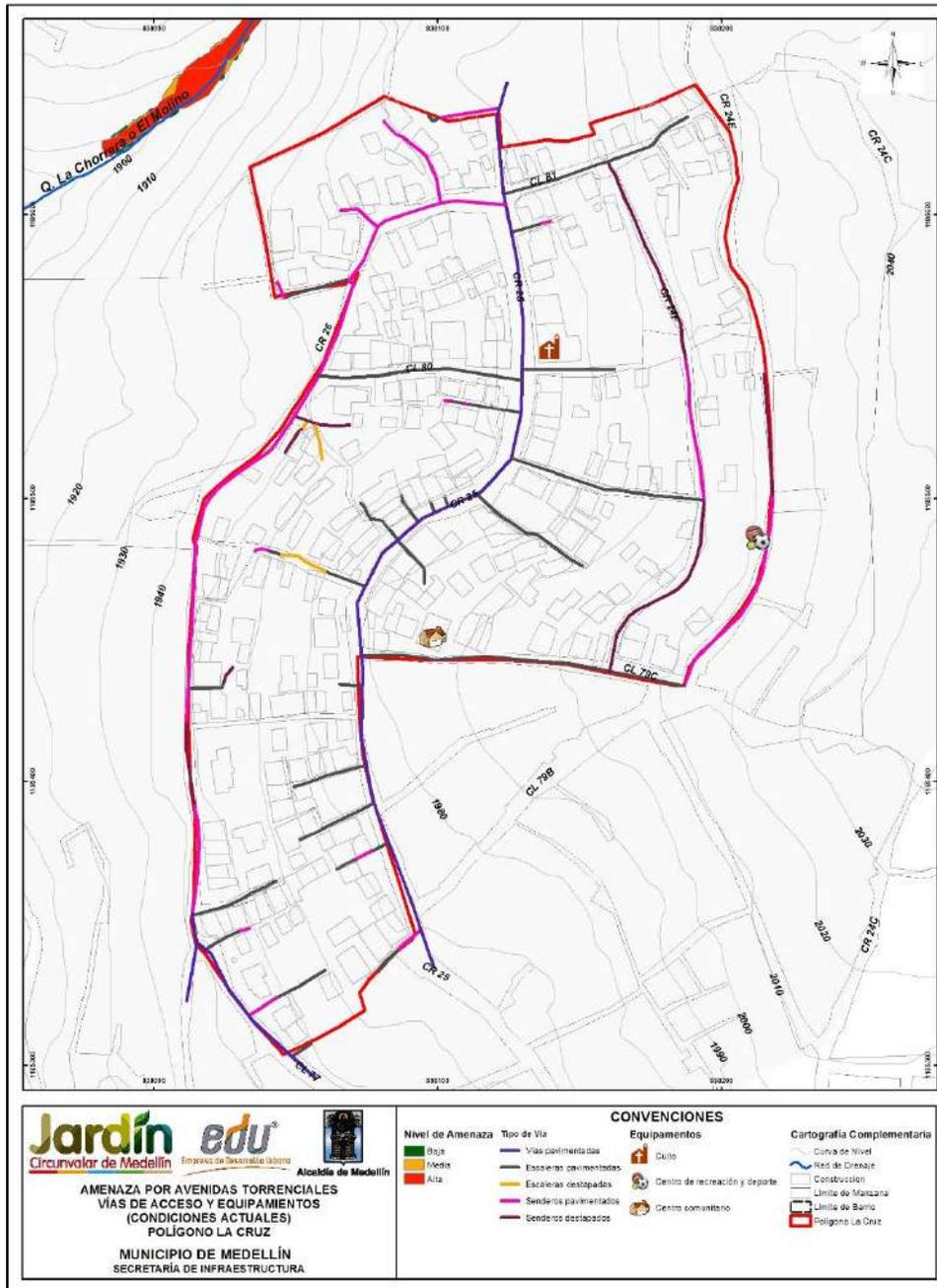
En el Mapa 40 se presenta el grado de amenaza por avenidas torrenciales en el que se clasificaron los tramos de vías o andenes, e infraestructura especial (equipamientos). Dentro del polígono La Cruz no se presenta ningún grado de amenaza por avenidas torrenciales, dado que no hay influencia de este evento en la zona de estudio. No se presentan mapas relacionados a inundaciones de aguas claras ya que este no es el caso crítico.



Mapa 38. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz
($C_v=0.3$)
(23_LCHManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_C y
23_LCHManchaAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 39. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz (Cv=0.3)
(27_LCHAmenazaAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 27_LCHAmenazaAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 40. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.
(LCHAmendozaAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_C)

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

15.6 AMENAZAS POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES PARA PLANIFICACIÓN DEL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales tienen en común al elemento hidrológico como uno de los detonantes del evento, y las amenazas que generan ambos fenómenos están concentradas casi siempre en las zonas aledañas o bajo influencia de los cauces. Para la planificación de la ordenación del territorio se hace entonces necesario seleccionar cuál de los dos eventos o tipos de amenazas debe ser el empleado para esta labor.

Al realizar un análisis comparativo, las manchas de los fenómenos de avenidas torrenciales cubren una mayor extensión que las manchas de inundaciones. Esto implica también, junto con el sistema de clasificación empleado para calificar la amenaza, que ésta última para los eventos de avenidas torrenciales sea más severa en comparación con la amenaza generada por las inundaciones.

Por lo tanto, si bien estos dos fenómenos no afectan al interior del Polígono La Cruz, es necesario afirmar que para efectos de planificación del ordenamiento del territorio se recomienda emplear la amenaza indicada por los eventos de tipo torrencial.

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

16. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

16.1 ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL

Según el POT (2014) del municipio de Medellín, la vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Para entender la vulnerabilidad y los factores que lo controlan, es necesario dividir los elementos expuestos de las características que hacen que ese elemento sea vulnerable. Adicionalmente, debe incluirse en la medición o determinación de la vulnerabilidad, las capacidades de determinada comunidad el resistir a una amenaza en específico y a la capacidad de recuperarse en caso de que el evento ocurra. Es así entonces como los elementos de la vulnerabilidad pueden ser subdivididos en elementos expuestos, elementos resistentes y elementos resilientes:

- ✓ Los elementos expuestos están directamente asociados a la localización geográfica del elemento en relación a la amenaza.
- ✓ Elementos resistentes se asocian a las características de las edificaciones en el caso de la vulnerabilidad física.
- ✓ Elementos resilientes se asocian a la habilidad del elemento alcanzado por la amenaza de retomar sus capacidades.

Para este proyecto en especial, la vulnerabilidad se enfatizó en el análisis de la vulnerabilidad física al interior de los polígonos del proyecto Barrios Sostenibles y metodológicamente se enfocó en los siguientes aspectos primordiales:

Inicialmente se realizó un análisis de información básica. Para esto se consideraron varios aspectos importantes consignados en el documento técnico elaborado por la Universidad San Buenaventura (2014) bajo el contrato *“Estudios y diagnóstico físico para la formulación de los proyectos barrios sostenibles en los sectores Golondrinas, Versalles, Rancho de lata al interior de los macroproyectos Llanaditas, La Cruz y El Picacho, dentro del marco del Proyecto Cinturón Verde Metropolitano en la Ciudad de Medellín”*. En este estudio se levantó información de localización de las viviendas, tipos de estructuras, estado y condiciones de las mismas, características de las estructuras entre otras que se considera importantes para este nuevo proyecto.

La información de la Universidad San Buenaventura (2014) fue posteriormente verificada y complementada a través de trabajos de campo. En los trabajos y visitas de campo por el personal especialista en estructuras se identificó y localizó dentro de cada polígono de Barrio Sostenible, los elementos de estructura física expuestos como son: líneas vitales (vías, acueducto, alcantarillado, gas, poliductos); equipamientos

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

(acueductos veredales, equipamientos de salud, parques, plazas, plazoletas, servicios públicos, 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 del proyecto Barrios Sostenibles.

Finalmente, toda esta información se zonificó en un mapa denominado de vulnerabilidad física, categorizando la vulnerabilidad de cada estructura en alta, media y baja, de acuerdo a las características de los elementos expuestos. De forma adicional, en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las personas que habitan las viviendas y la misma también fue categorizada según el número de personas afectadas dentro de una estructura.

16.2 VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA

16.2.1 Metodología de análisis

La metodología utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad física a movimientos en masa, se fundamentó en la propuesta establecida por Li et al. (2010) y Uzielli et al. (2008) además de otros trabajos existentes en la literatura científica. Este trabajo presenta una propuesta metodológica para determinar la vulnerabilidad ante la amenaza de movimientos en masa y propone un modelo cuantitativo para la determinación de la vulnerabilidad de las estructuras. Como parte adicional, el trabajo sugiere una función aproximada para estimar la vulnerabilidad de las personas que se encuentran dentro de las estructuras.

La base para determinar la vulnerabilidad física según Li et al. (2010), está soportada sobre la intensidad arrolladora que podría experimentar un fenómeno y la resistencia de los elementos físicos expuestos, lo anterior entonces se explica con que la vulnerabilidad es función de la intensidad y la resistencia.

La intensidad para este enfoque, se define como el conjunto de parámetros distribuidos espacialmente, que describe la capacidad arrolladora de un fenómeno natural (Hungar, 1997) en este caso un movimiento en masa. Según Amatruda et al. (2004), la intensidad podría estar expresada 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 124). Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

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

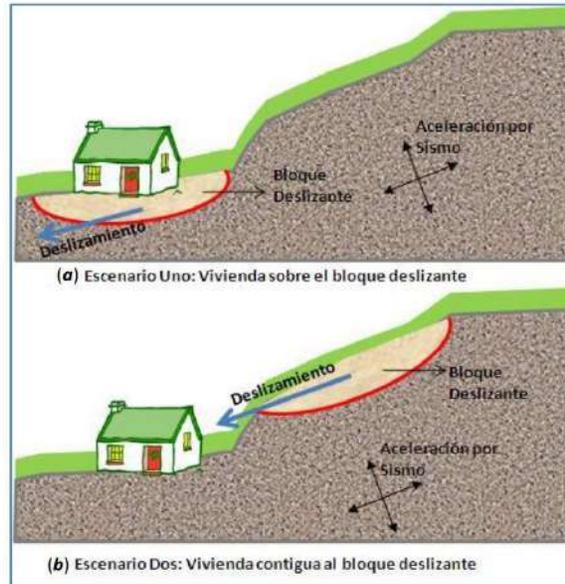


Figura 124. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa

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 54) 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 54. 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.

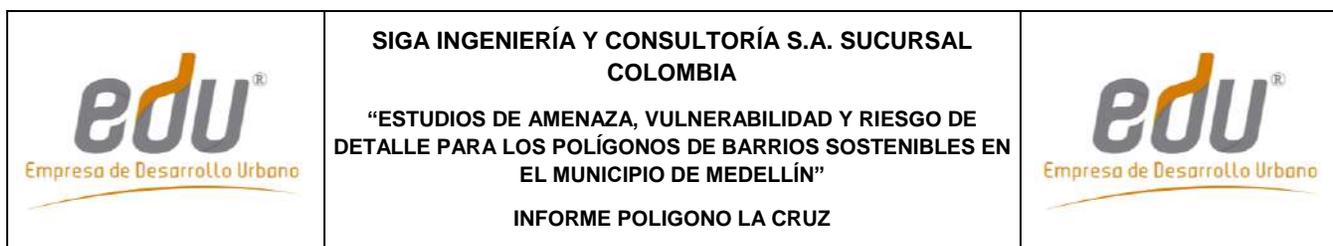
La resistencia refleja la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del fenómeno con un determinado grado de severidad. Para las personas, esta misma resistencia representaría la capacidad de reacción y evacuación. En el caso de las estructuras, la resistencia total es función de 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 podría establecer unos rangos de valores para determinadas profundidades de fundación.

$\xi_{sfd}=1.05$ Para $D_{fun} > 10$ m

$\xi_{sfd}=0.63$ Para $2 \text{ m} < D_{fun} < 10$ m

$\xi_{sfd}=0.5$ Para $D_{fun} < 2$ m

De la Tabla 55 hasta la Tabla 57 se presentan los demás factores que hacen parte de la evaluación de la resistencia de las estructuras propiamente.

Tabla 55. 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 56. 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 57. 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.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0,5 \\ 1,0 - \frac{2(R - I)^2}{R^2} & 0,5 < \frac{I}{R} \leq 1,0 \\ 1,0 & \frac{I}{R} \leq 1,0 \end{cases}$$

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 125 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la distancia (d) y la altura (h) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z=h/d$.

Finalmente, Guimaraes (2015) llegó a establecer una intensidad definida a partir de la relación de los parámetros geoméricos de la amenaza y de la resistencia de las estructuras impactadas. Así entonces, la vulnerabilidad estructural física se definió matemáticamente como:

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

La anterior ecuación tiene sentido físico cuando se observa que la vulnerabilidad estructural física (V_e) es la inversa de la capacidad de resistencia (R) de las estructuras.

La Figura 126 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.

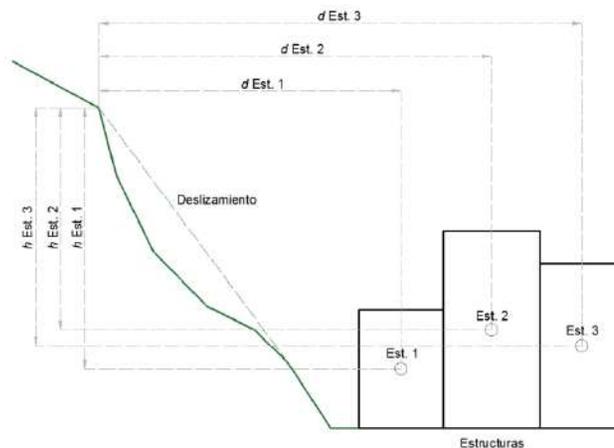


Figura 125. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables

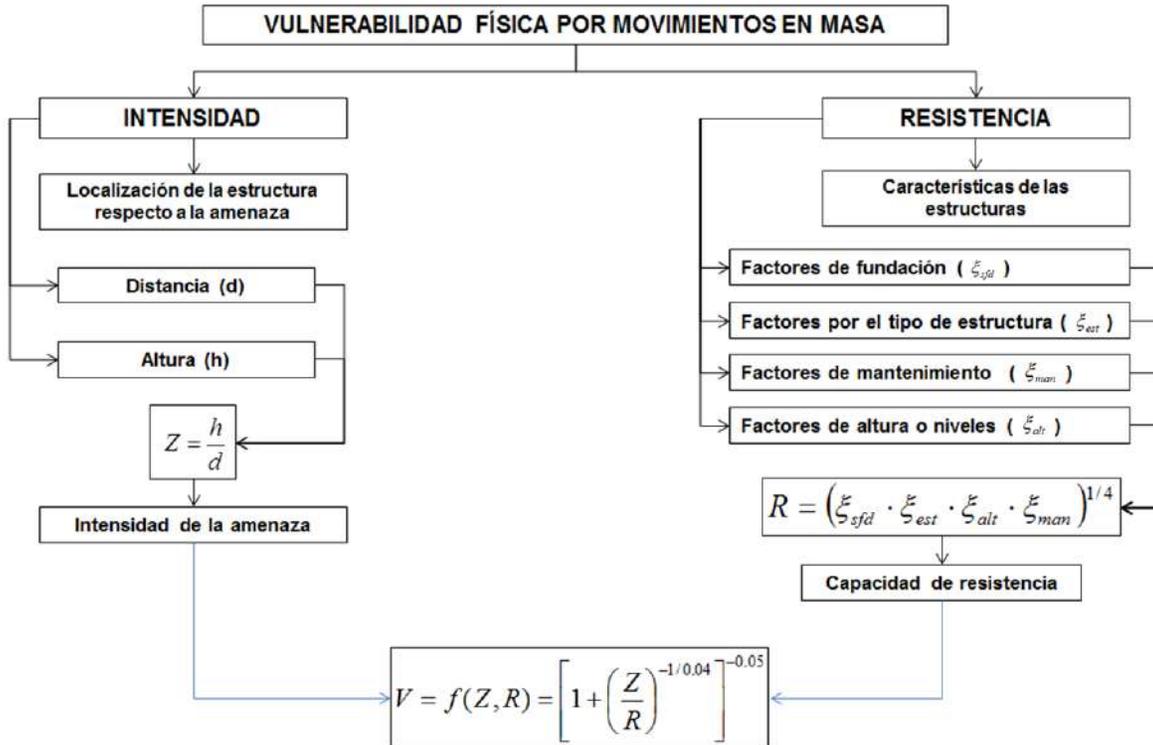


Figura 126. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa

16.2.2 Calibración de la metodología

La metodología presentada en el numeral anterior y explicada en detalle en el Informe I-2445-01-Rev7, fue calibrada a partir del proceso de inestabilidad ocurrido el 27 de septiembre de 1987 en el Cerro Pan de Azúcar, en la ciudad de Medellín. Dicho deslizamiento que terminó impactando parte del Barrio Villatina, en la Comuna 8, provocó la muerte de alrededor de 500 personas, la destrucción de unas 100 viviendas aproximadamente y cerca de 2400 personas damnificadas, por lo que fue considerado como una de las grandes tragedias ocurridas en la ciudad y hasta el 2007 como uno de los 10 desastres urbanos más importantes del mundo según Coupé *et al.*, (2007).

16.2.2.1 Polígono asociado al Deslizamiento Villatina

En la UMI delimitada para el Polígono San Antonio, también objeto de estudio en el Proyecto Barrios Sostenibles (SIGA, 2018), se presentó el conocido como deslizamiento Villatina, el cual generó una mancha de deslizamiento clave para la calibración de la metodología de trabajo usada para evaluar el riesgo por deslizamiento en todos los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles.

Con el objetivo de hacer tal calibración, se procedió al trazado de la que debió ser en su momento la mancha o polígono asociado al deslizamiento Villatina. Se ha construido sobre la cartografía del año 1973, de tal manera que siendo previa a la ocurrencia del deslizamiento permite ejecutar un análisis del tipo retrogresivo “back analysis”.

Como insumo para definir el polígono, se utilizaron registros fotográficos del deslizamiento, tomados desde diferentes ángulos, la descripción del movimiento en masa según los expertos del tema, la información recopilada durante la campaña de campo que hizo parte de este estudio y la interpretación de fotografías aéreas. Esta última actividad permitió identificar la corona y algunos puntos de referencia claves.

Dentro de los puntos que sirvieron como guía para establecer el posible límite de la mancha, se identificó una geoforma denominada en el capítulo de geomorfología del Estudio del Polígono San Antonio (SIGA, 2018) como Peldaño Tectónico, ubicado en la parte SSW del deslizamiento, un drenaje ubicado en el límite occidental y las vías con nomenclatura Calle 56 EE, Calle 56 D y Carrera 16 (Figura 127).

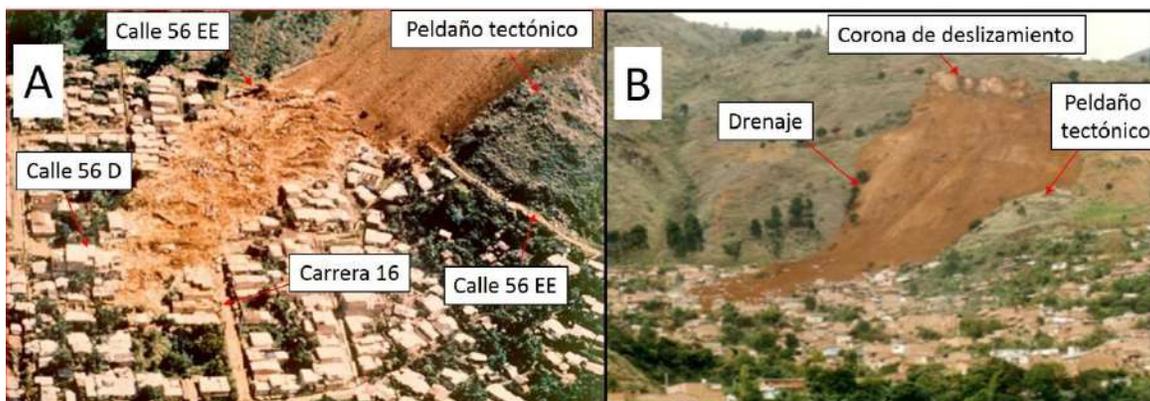


Figura 127. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo

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 128).

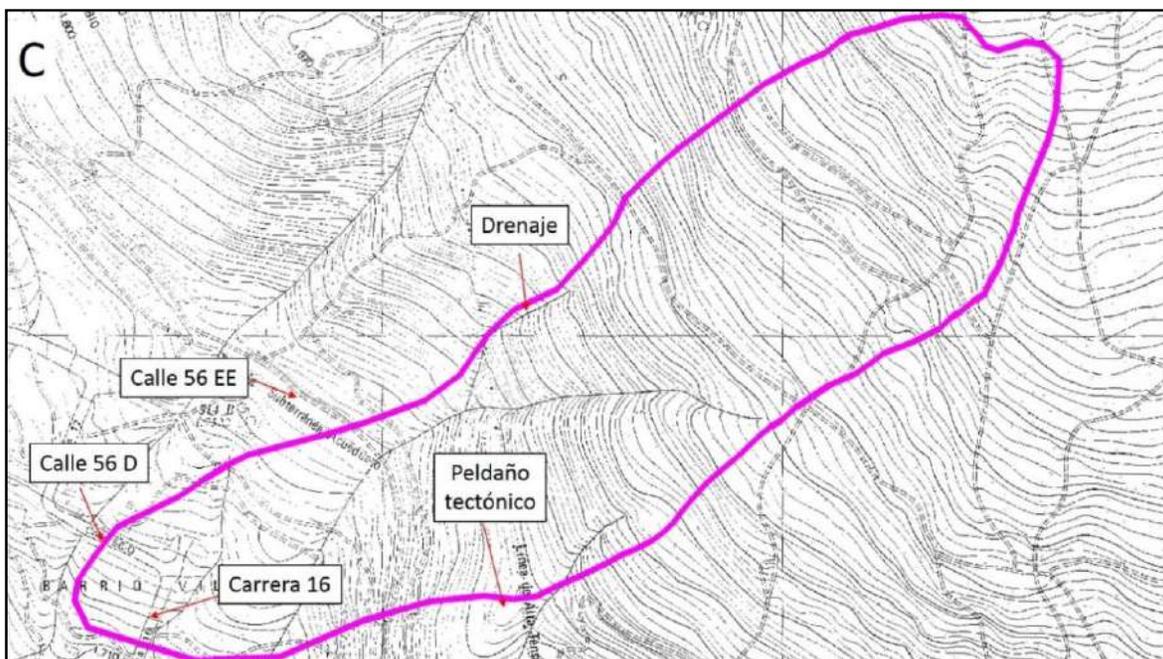


Figura 128. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías

La Figura 129, a continuación, muestra de nuevo el polígono asociado al deslizamiento mencionado, partiendo de su escarpe de tipo acorazonado y llegando hasta la zona conocida como Campo Santo. En el Mapa 41 y la Figura 130 se presentan las unidades geomorfológicas y el Perfil A-A, trazado en parte de la zona del deslizamiento Villatina; de la UMI San Antonio. La explicación en detalle de dichas unidades geomorfológicas se presenta en el Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales para el Polígono San Antonio (Siga, 2018).

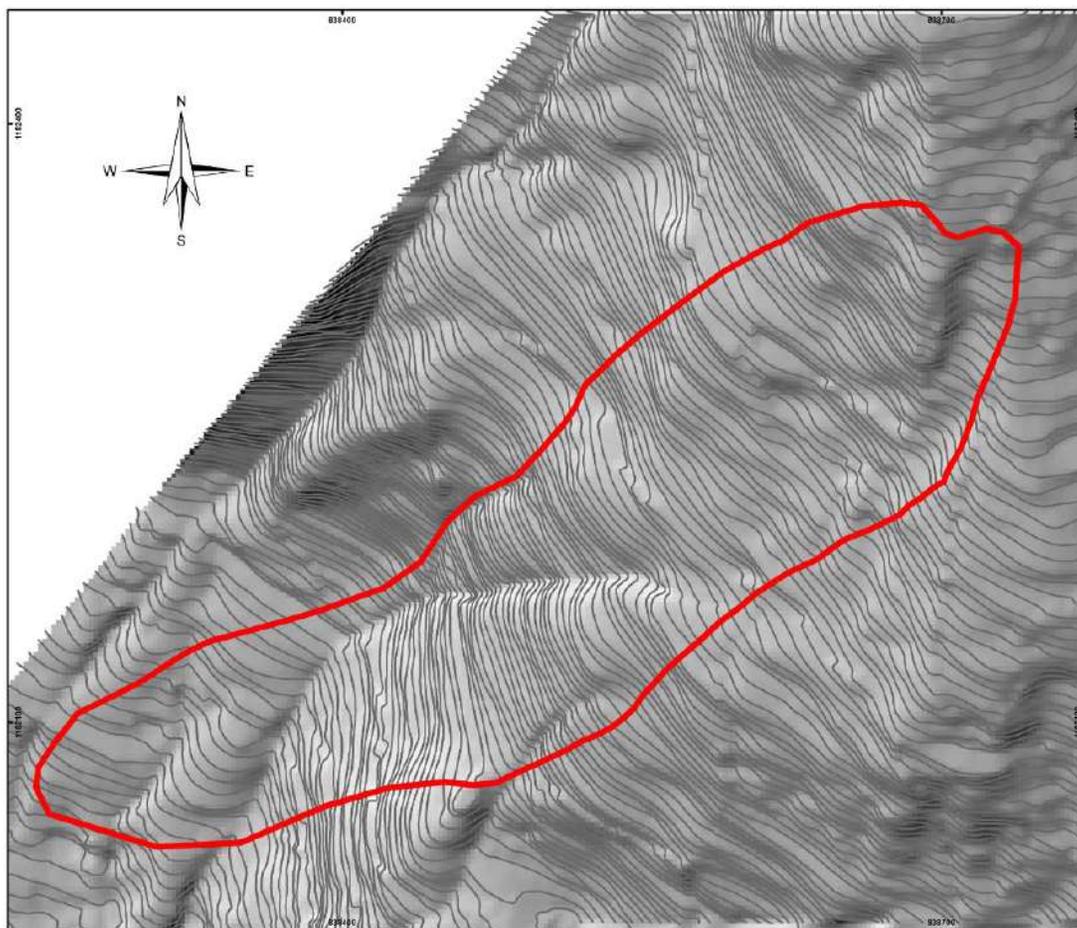
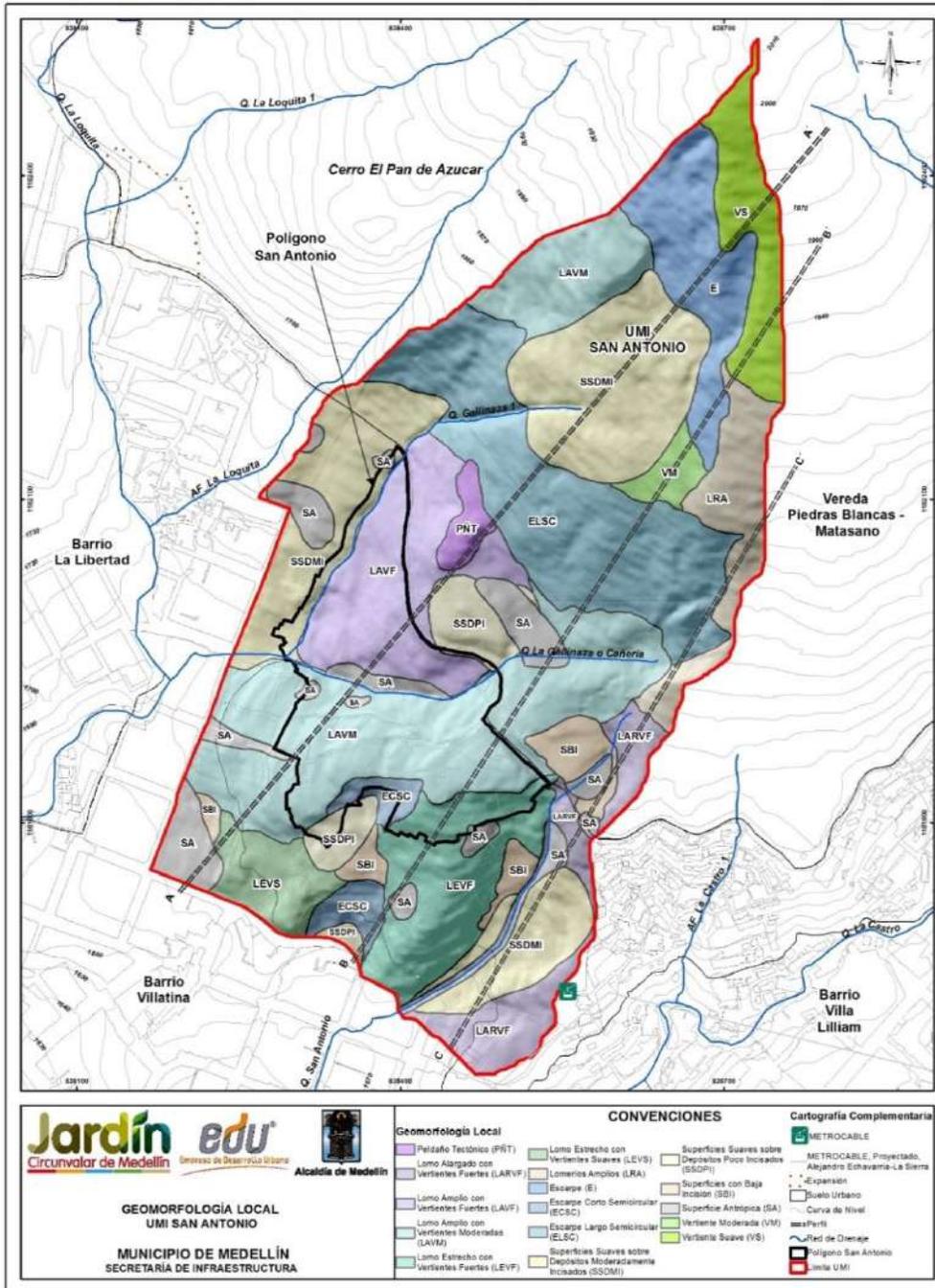


Figura 129. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973



Mapa 41. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

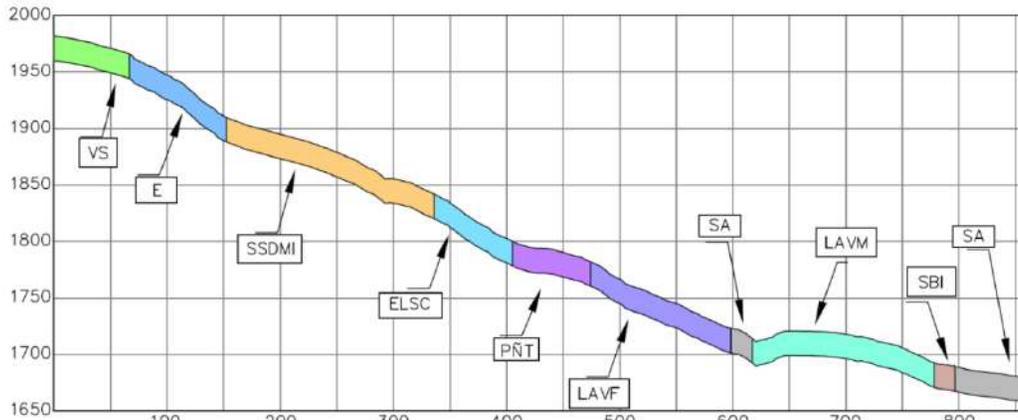


Figura 130. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

El movimiento del material se da desde la unidad de escarpe (E) donde la pendiente es muy alta (mayor a 30°), continua sobre la unidad de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) que tiene pendientes predominantemente altas (15°-30°) y controlado por las geoformas cóncavas (vaguadas) presentes en esta unidad. Nuevamente entra en una zona de pendientes muy altas asociadas a la unidad de escarpe largo semicircular (ELSC) donde se encuentra el inicio de la cuenca de la Quebrada Gallinaza 1, que por su valle estrecho y abrupto facilita la movilidad de materiales en su cauce y que marca la división entre las unidades geomorfológicas de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) al occidente y la unidad de lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), esta última con pendiente muy alta. En este punto, debido a la diferencia en la geomorfología del sector, el deslizamiento se comporta distinto al occidente y al oriente.

El movimiento se extiende hacia el oriente hasta la unidad geomorfológica peldaño tectónico (PÑT) que sirve como barrera que desvió el material hacia el occidente. Este desvío junto a la pendiente de la unidad lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), provocan que el material aumente la velocidad y se movilice en dirección al cauce de la Quebrada Gallinaza 1 e incluso la sobrepase.

En la margen occidental a la altura de la unidad escarpe largo semicircular (ELSC), el material se encausa tanto en el cañón de la Quebrada Gallinaza 1 como en el cañón de una quebrada que se observa claramente en la cartografía del IGAC (1973) y en las fotografías planteadas en la Figura 127. 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 127). Es importante mencionar que el drenaje utilizado como referencia, no hace parte de la red hidrográfica de la cartografía actual del POT (2014), siendo este un cambio morfológico importante ocurrido después del fenómeno deslizamiento Villatina.

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

16.2.2.2 Factor de intensidad

Se habló en el Numeral 16.2.1 sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de una estructura de acuerdo con la localización respecto a un probable movimiento en masa. Según Guimaraes (2015) se consideran dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, se tiene en cuenta la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 125 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la altura (h) y la distancia (d) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z=h/d$.

La metodología para llegar a la definición de esta variable de vulnerabilidad Z es como se indica a continuación. Para mayores detalles se recomienda consultar el Informe I-2445-01A-Metodología SIG.

- ✓ Se crean puntos críticos (focos de deslizamiento) con el objetivo de determinar cuáles sitios tienen los valores más altos de probabilidad de ocurrencia de deslizamiento. Para facilitar esta búsqueda, el archivo raster se convierte a puntos y luego se seleccionan aquellos más críticos. Los valores umbral cambian para algunos polígonos, pero de manera general se consideraron como críticos aquellos puntos cuyo valor superó a 0,097724987.
- ✓ Se calcula de distancia (d) desde cualquier punto del territorio hasta el foco más cercano. Con los puntos críticos definidos se procede a generar una superficie de distancia con respecto a ese punto, pero esta superficie tiene la propiedad de considerar la inclinación del terreno.
- ✓ Se genera un raster de altura de referencia para generar así otro raster que sirva como referencia para establecer la diferencia de alturas entre el punto crítico y cualquier punto del territorio. Este raster es una malla con un único valor, el valor de altura para el punto crítico.
- ✓ Se determina la diferencia de alturas de cada sitio del territorio con respecto al foco (h). En la sentencia para generar esta nueva superficie se hacen nulas aquellas celdas cuyo valor de altura está por encima del punto crítico, es decir, el modelo está considerando que existe afectación por desprendimiento de materiales sólo para las zonas que están por debajo del punto crítico.
- ✓ Se calcula un raster de Intensidad (Z) para cada punto, lo cual consiste en generar una superficie que denota el grado de intensidad de un movimiento en masa. Este raster está en función de la distancia al punto crítico y de la diferencia de alturas entre el sitio evaluado y la altura del punto crítico. La ecuación que se ingresa al cuadro de diálogo del es (h/d) .

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

- ✓ Se genera un raster de intensidad máxima (Z) que es el resultado de tomar los raster de intensidad de cada punto crítico y para cada ubicación evaluar cuál es máximo valor y asignarle ese a la superficie definitiva.

El cálculo del factor de intensidad (Z) en comparación con el polígono del numeral anterior se considera entonces la mejor manera de darle validez a la metodología usada.

16.2.2.3 Comparación de factor de intensidad con polígono de deslizamiento

La Figura 131, a continuación, presenta en una misma imagen el mapa del modelo geológico de las UMI's San Antonio y Pinares de Oriente obtenido con la cartografía del 2014 tomada del POT y el factor de intensidad (z) calculado con la cartografía del IGAC (1973), en la zona aferente al deslizamiento Villatina, la cual es cercana al Polígono San Antonio. Se ha incluido además el polígono asociado al deslizamiento según los geólogos de esta oficina, el cual se había mostrado y explicado ya en el Numeral 16.2.2.1 de este mismo informe.

Es importante aclarar que el polígono rojo de la Figura 131 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.

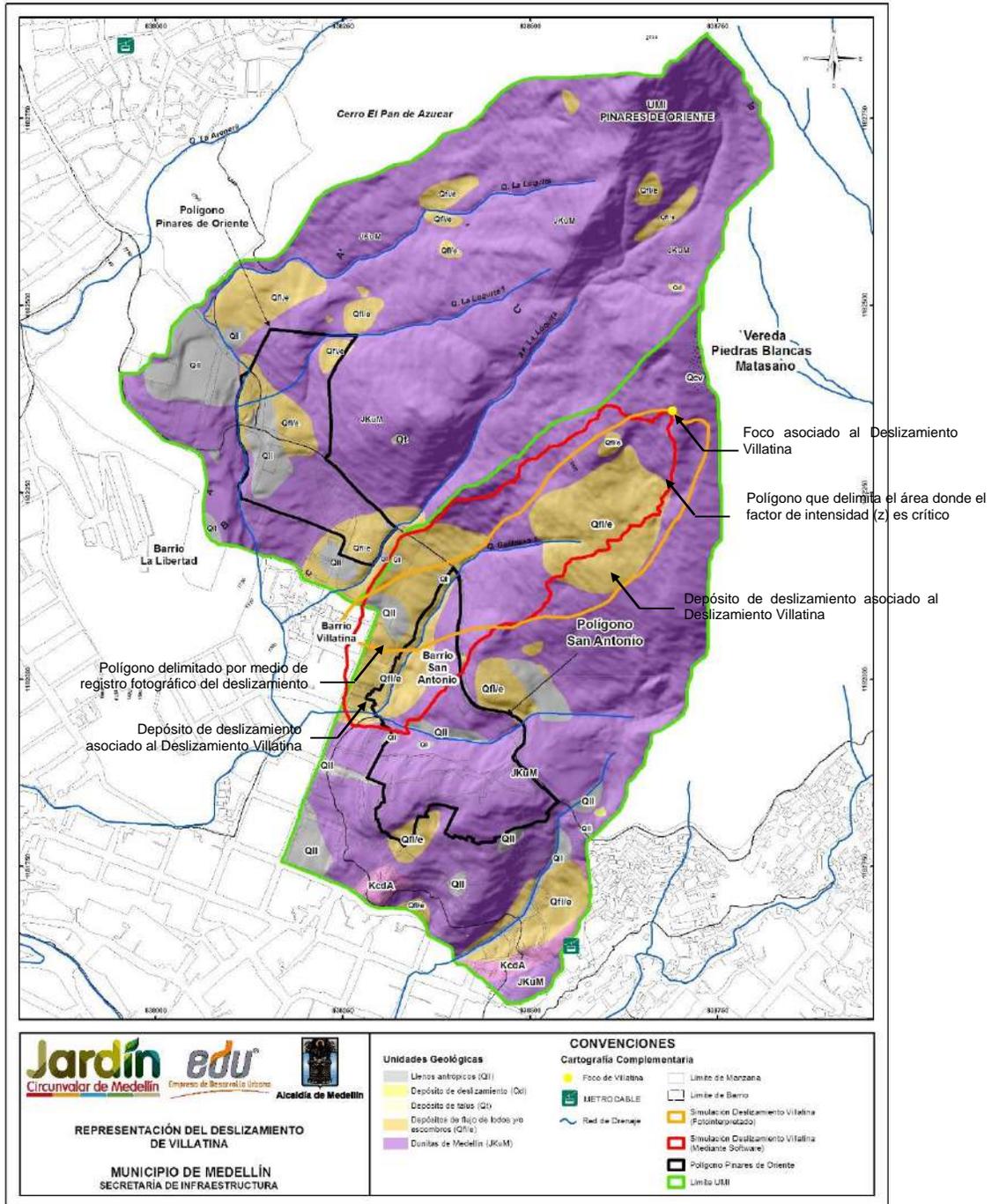


Figura 131. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio

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

Se destacan varios hechos importantes que hacen que con este ejercicio se pueda dar validez a la metodología usada en este estudio para evaluar el riesgo por deslizamiento teniendo en cuenta el factor de intensidad.

- ✓ En primer lugar, se tiene que el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento está contenido, en términos prácticos, dentro del polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico. Las zonas que del primer polígono quedan por fuera del segundo son pocas y se asocian simplemente a la corona amplia acorazonada que tuvo del deslizamiento Villatina, en comparación con el foco único que la metodología considera para determinar el área donde el factor de intensidad (z) es crítico.
- ✓ Ambos polígonos llegan a lo que se conoce hoy con el nombre de Campo Santo y cubren el drenaje principal (Quebrada Gallinaza 1) y el secundario al oeste del primero. Se tiene entonces de esta forma una trayectoria muy similar del deslizamiento Villatina según ambos polígonos. La extensión de ambos polígonos es casi la misma, lo cual es muestra clara de que el factor de intensidad (z) considerado como crítico es el adecuado.
- ✓ Ambos polígonos explican la localización de las formaciones geológicas denominadas flujos de lodos y escombros asociadas al deslizamiento Villatina. Incluso el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es un poco más amplio en la parte baja y cubre todo lo que en este sector se ha denominado flujos de lodos y escombros, mostrando así que la metodología puede ser conservadora en lugar de liberal, en cuanto al no cubrimiento de áreas susceptibles de ser impactadas con deslizamientos.

No se debe olvidar que el modelo correspondiente asume condiciones ideales que gobiernan los fenómenos físicos modelados, por lo tanto es una aproximación de la realidad. Bajo este criterio es necesario entender que los resultados obtenidos no deben considerarse como valores invariantes, sino que corresponden a órdenes de magnitud que incluyen las incertidumbres con las cuales se conforman los modelos respectivos y son, por consiguiente, las herramientas que permiten apoyar la toma de decisiones. Por tal motivo es normal que se presenten algunas diferencias. Sin embargo, para efectos de la calibración de la metodología de trabajo, se considera que la similitud obtenida entre el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento y el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es racionalmente precisa. Finalmente, se puede concluir con base en el ejercicio efectuado que la metodología usada en este estudio es la adecuada.

16.2.3 Levantamientos de campo y análisis de la información

Para hacer cumplir la metodología anteriormente expuesta, se recolectó información primaria de los componentes relevantes para el análisis. El trabajo inicio con la revisión de la información básica y posteriormente se realizaron visitas de campo donde a través de la implementación de fichas y registros fotográficos se levantaron las estructuras.

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

Para la ejecución de los trabajos de campo de forma ordenada, se realizó previamente una zonificación de los polígonos en función de las manzanas físicamente formadas con el objetivo de distribuir los trabajos en campo.

El polígono de intervención fue dividido en cinco zonas (Figura 132), y para la delimitación de éste se utilizaron los siguientes referentes físicos: al norte el barrio Bello Oriente, al sur el barrio La Honda, al occidente el barrio El Raizal y al oriente vereda Piedras Blancas y Matasanos del Corregimiento de Santa Elena. El barrio La Cruz se encuentra ubicado en la vertiente sur de la microcuenca de la quebrada El Molino y la vertiente norte de la microcuenca de la quebrada La Honda.

En este capítulo se presentan los resultados de la recolección e inventario de toda la información referente a los componentes físicos relevantes para el cálculo de la vulnerabilidad estructural de acuerdo a la metodología presentada. Los componentes principales inspeccionados fueron: tipo de ocupación, tipo de estructura, estado o condiciones de la estructura, altura de la estructura (número de niveles por edificación) y tipo de cubierta. Se realizó el levantamiento, inspección e inventario completo del polígono La Cruz, con un total de 266 estructuras. Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. En el Mapa 42 se presenta el inventario las vías de acceso y los equipamientos del Polígono La Cruz.

Luego de recopilada la información de campo, ésta es analizada mediante la conformación inicial de una base de datos con la numeración y atributos de cada estructura. Con esta base de datos se realizó un análisis estadístico mediante la implementación de diagramas circulares (Tabla 58 a Tabla 62) para facilitar la interpretación de los resultados.

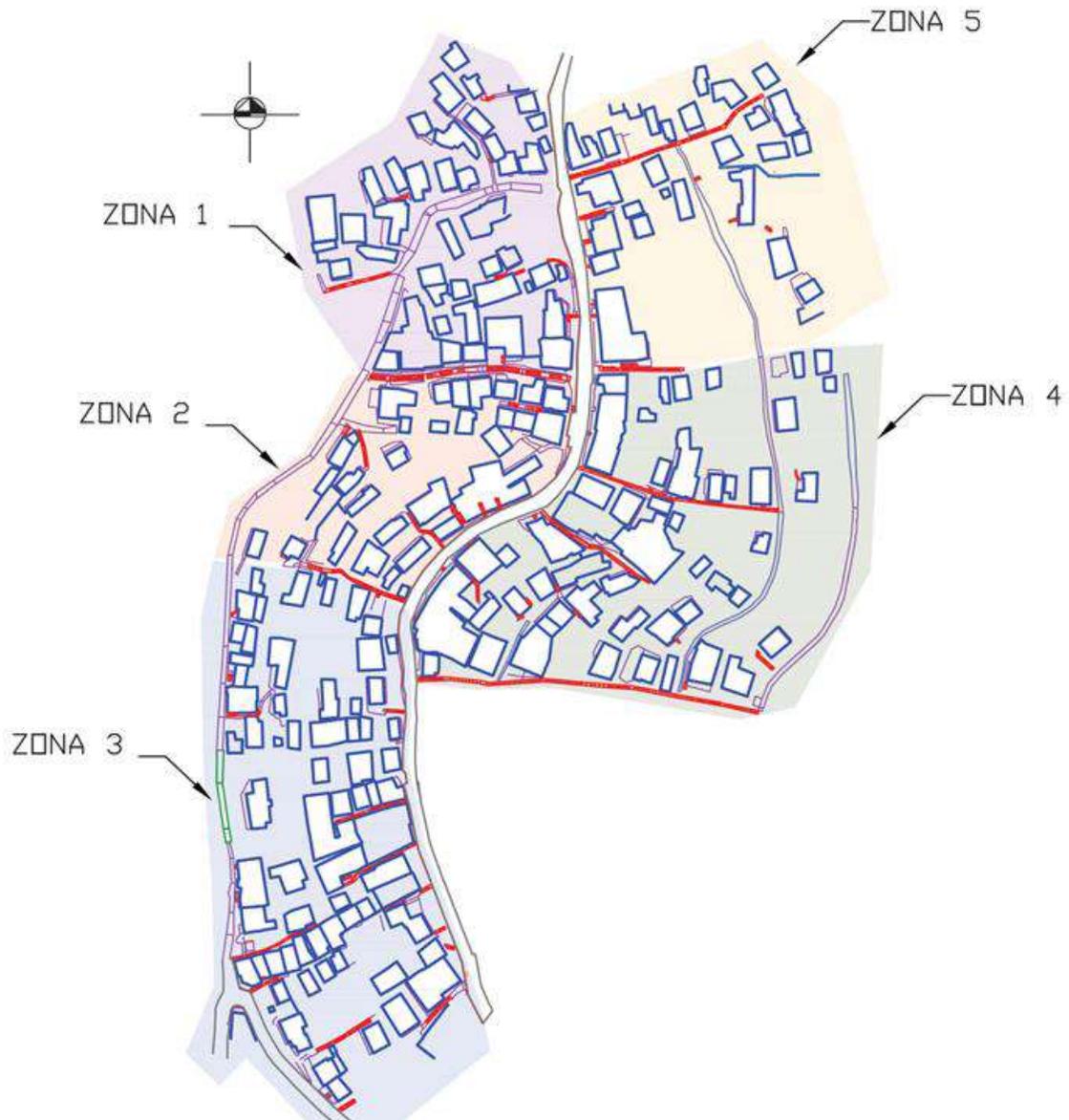
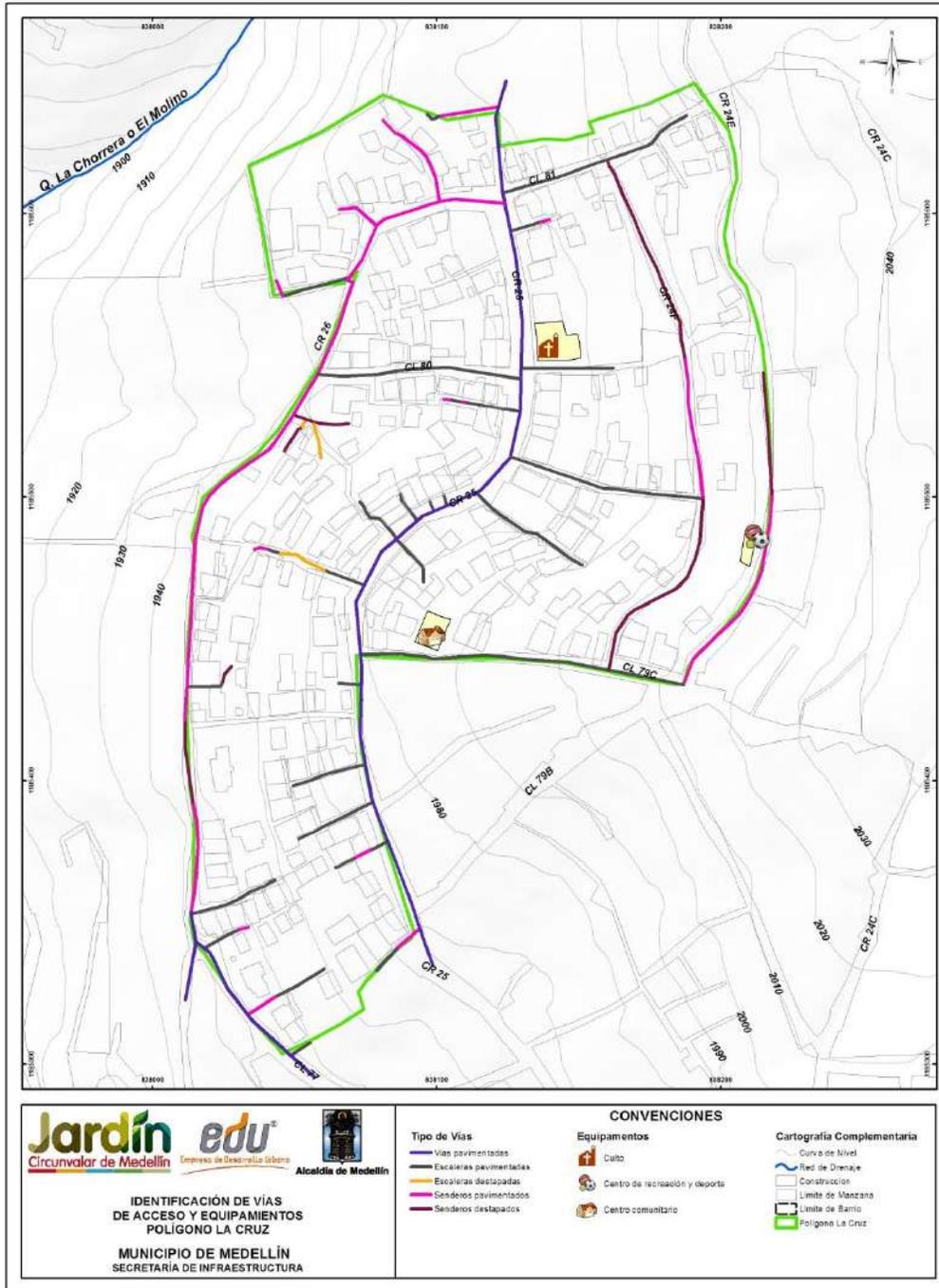


Figura 132. Zonificación del Polígono La Cruz



Mapa 42. Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono La Cruz (39_LCHViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_C y 39_LCHViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T)

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

De forma general, las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio que hace referencia a un estado medio. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta calificación por la razón de estar mejor estructuradas e incorporar en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además se encontraron estructuras en madera y lata 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.

Los equipamientos básicos sociales y comunitarios que se observaron en el polígono de estudio fueron el culto iglesia adventista del séptimo día Sinaí, 1 centro de recreación y deporte correspondiente a un gimnasio abierto, y el centro comunitario junta de acción comunal.

Las vías presentaron las siguientes características: vías vehiculares en pavimento asfáltico y rígido con una longitud de 440 ml, escaleras pavimentadas en concreto con una longitud de 650 ml, escaleras en terreno natural y piedra con una longitud de 32 ml, senderos pavimentados en concreto con una longitud de 495 ml y senderos en terreno natural y piedra con una longitud de 256 ml.

Específicamente en el Polígono de La Cruz se tiene las características que se listan a continuación:

- ✓ El mayor porcentaje de las viviendas en el Polígono La Cruz tiene un tipo de ocupación Residencial, con un 95.49%. Se presenta en menores porcentajes la ocupación Comercial y Mixto con un 2.63% y un 1.88% respectivamente (Tabla 58).
- ✓ En su mayoría las viviendas del polígono tienen un tipo de estructura en Mampostería con un 80.08%. Le sigue las estructuras de madera (Ligera) con un 16.54% y una minoría en estructura Muy ligera con el 3.38% (Tabla 59).
- ✓ En general el estado de la mayoría de las viviendas se ubica en Medio, con un 83,83% del total de las inspecciones realizadas. El porcentaje que le sigue es Malo con un 9.77%. En menores porcentajes se encontraron estructuras Buenas, Muy malas y Muy buenas, con el 3.76%, 2.26% y 0.38%.
- ✓ La mayoría de las viviendas del Polígono La Cruz cuentan con un solo nivel construido, con un 89.47%. Le siguen las edificaciones de dos niveles y de tres a cinco niveles, con un 10.15% y un 0.38% respectivamente. (Tabla 61).
- ✓ La mayoría de las construcciones tienen cubierta en Eternit con un 84.96%, le siguen las cubiertas en Teja de zinc con un 12.41%. Las cubiertas en Losa y Otro tipo se encuentran en menores porcentajes con el 1.5% y 1.13%, respectivamente (Tabla 62).

- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del polígono La Cruz, 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 58. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa

Ocupación	Total Viviendas	%
Residencial	254	95.49
Comercial	7	2.63
Mixto	5	1.88
Total	266	100

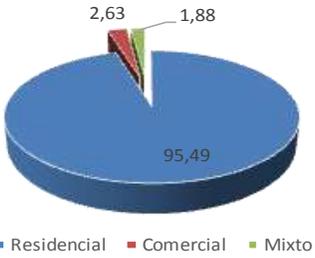


Tabla 59. Tipo de estructura – Movimiento en Masa

Tipo Estructura	Total Viviendas	%
Muy ligera (Lata)	9	3.38
Ligera (Madera)	44	16.54
Mampostería	213	80.08
Total	266	100

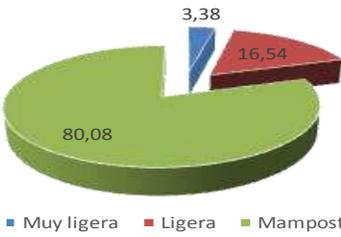


Tabla 60. Estado de la estructura – Movimiento en Masa

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Muy mala	6	2.26
Mala	26	9.77
Media	223	83.83
Buena	10	3.76
Muy buena	1	0.38
Total	266	100



Tabla 61. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa

Altura Estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	238	89.47
De 2 pisos	27	10.15
De 3 a 5 pisos	1	0.38
Total	266	100

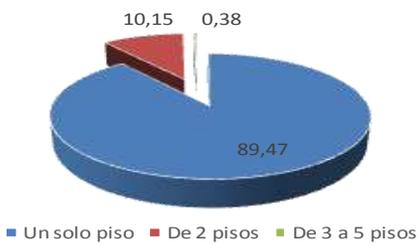
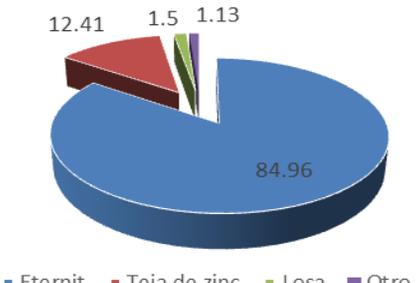


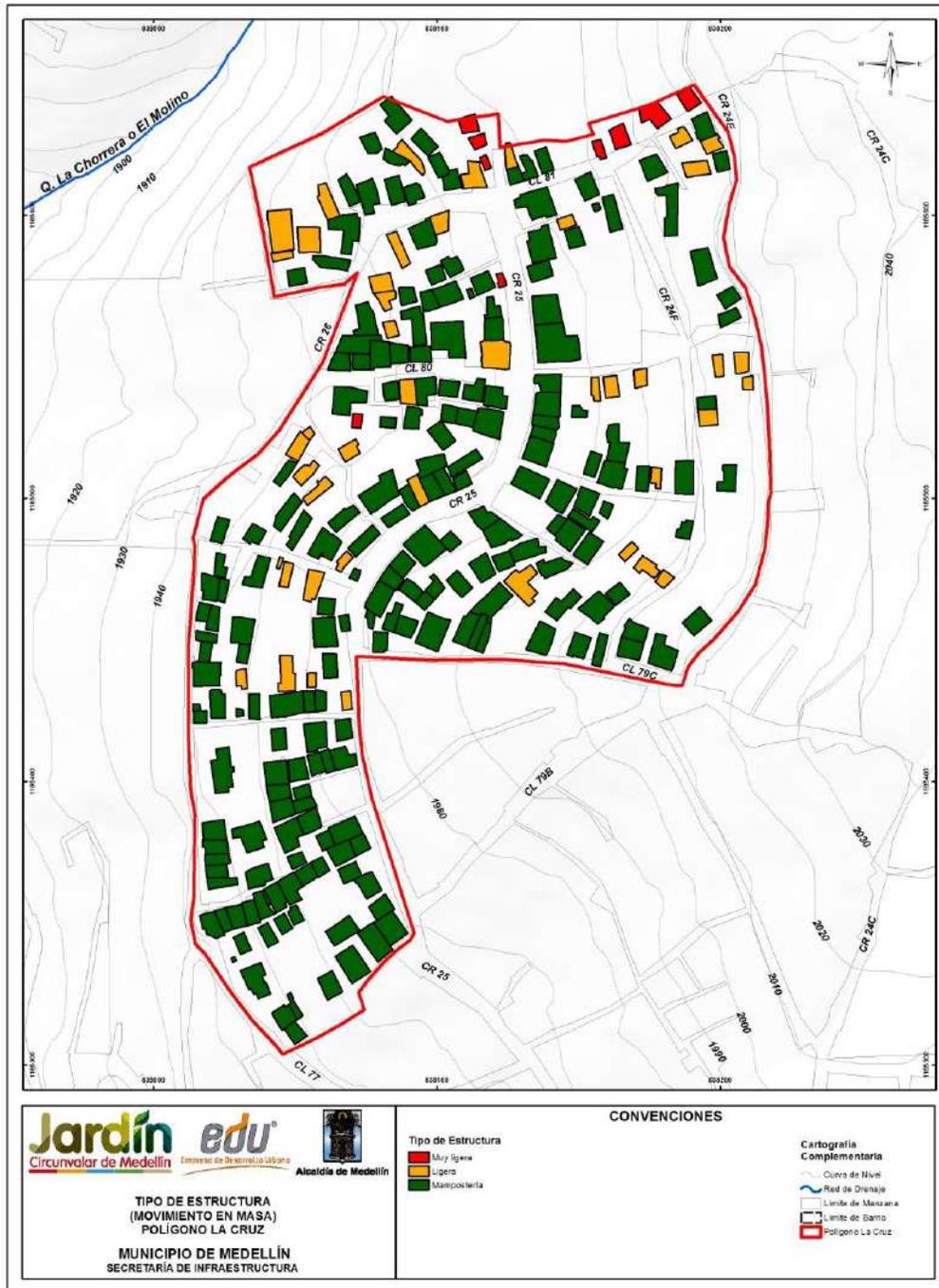
Tabla 62. Tipo de cubierta – Movimiento en Masa

Tipo Cubierta	Total Viviendas	%
Eternit	226	84.96
Teja de zinc	33	12.41
Losa	4	1.5
Otro	3	1.13
Total	266	100

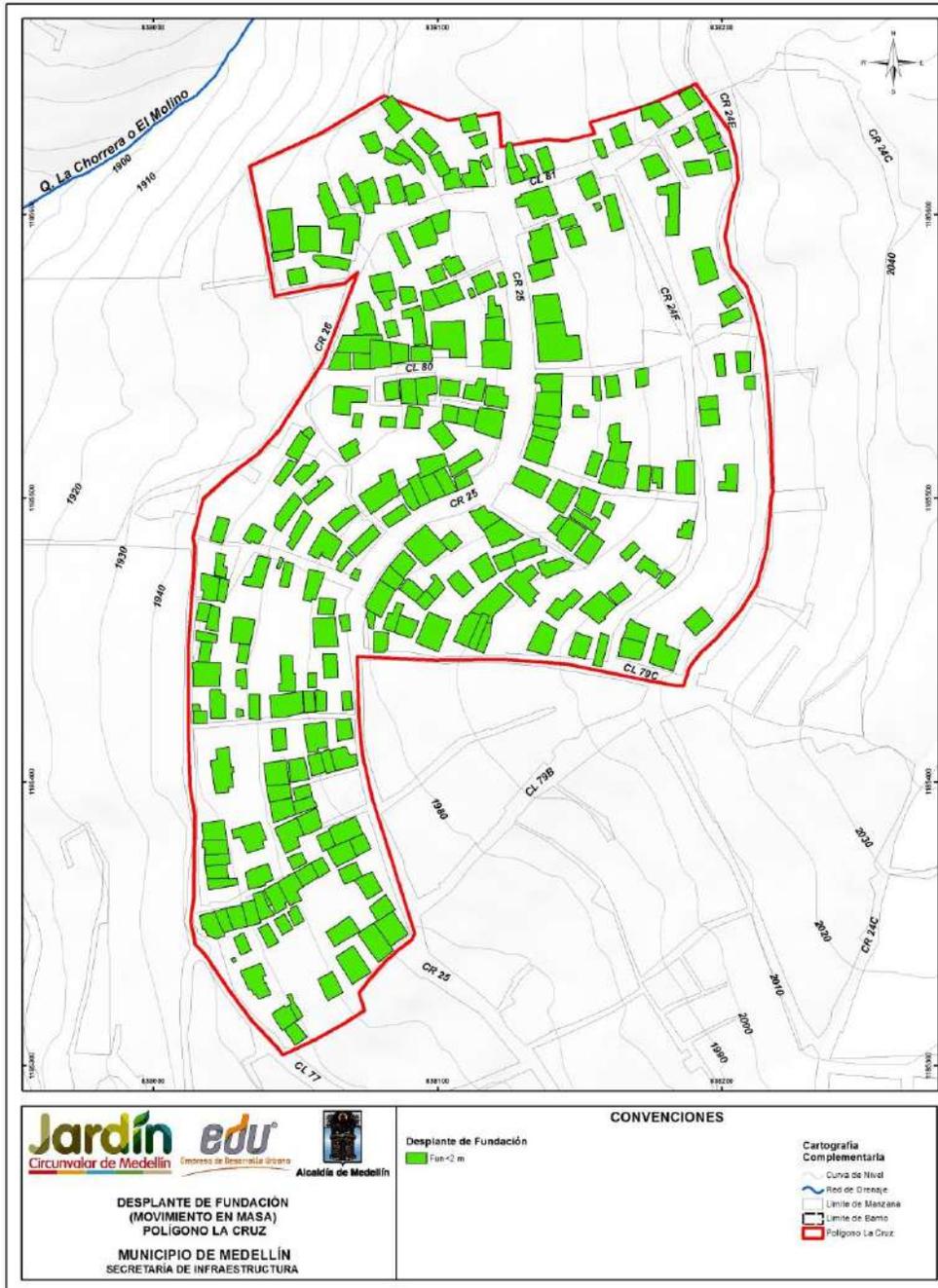


Además de los análisis estadísticos se realizaron mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, los cuales se presentan del Mapa 43 al Mapa 47.

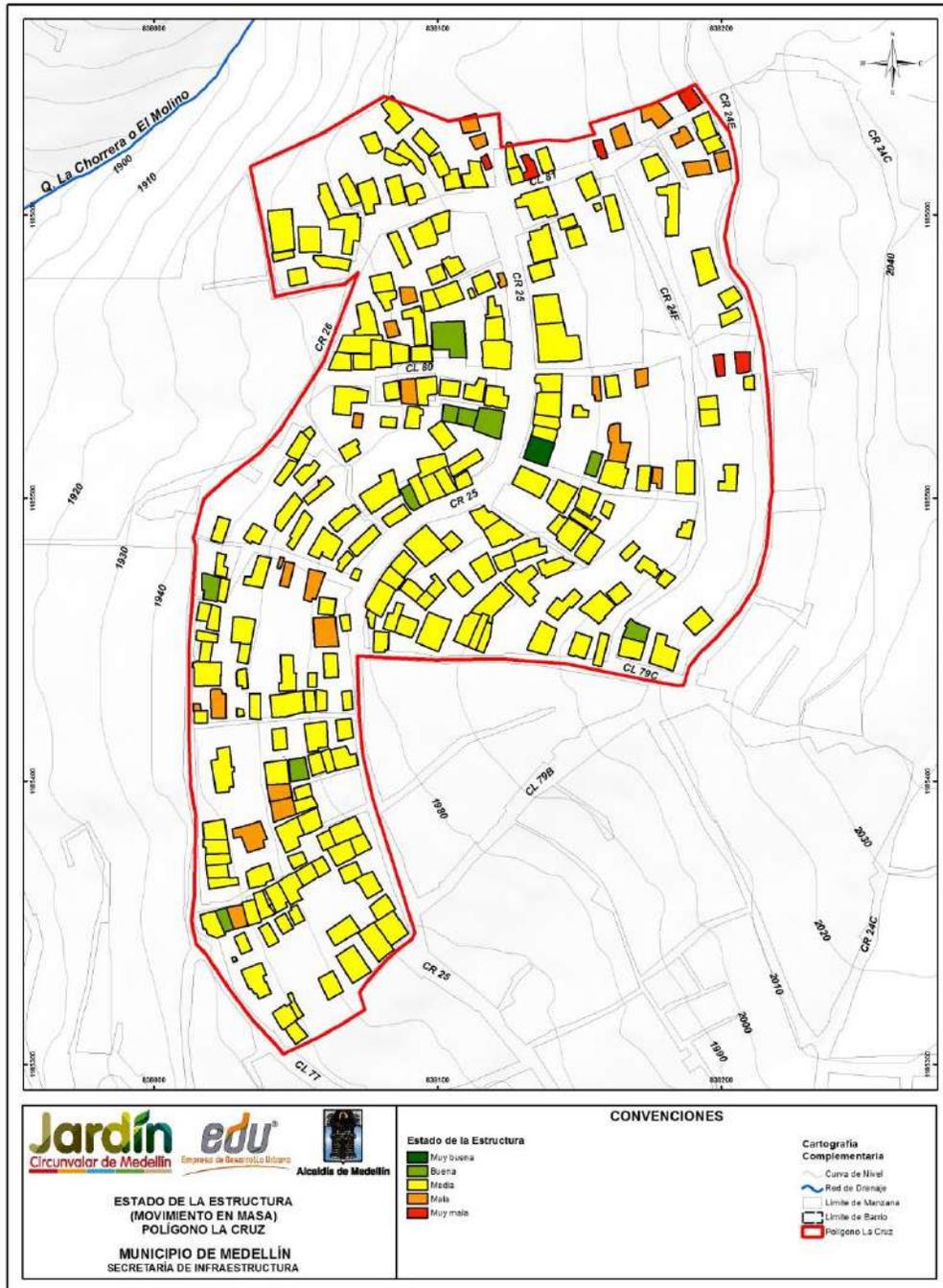
Con la información presentada y la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. El Mapa 48 presenta la distribución del factor resistencia donde un factor de resistencia de 1.0 corresponde a una vivienda de máxima resistencia. En éste se muestra que aproximadamente el 20% de las estructuras presentan un factor de resistencia menor de 0.3 lo que podría asociarse a estructuras muy poco resistentes, mientras que el 80% presentan un factor de resistencia entre 0.3 a 0.7 lo que se podría asociar a una resistencia media. Solo una estructura presentó resistencia por encima de 0.70.



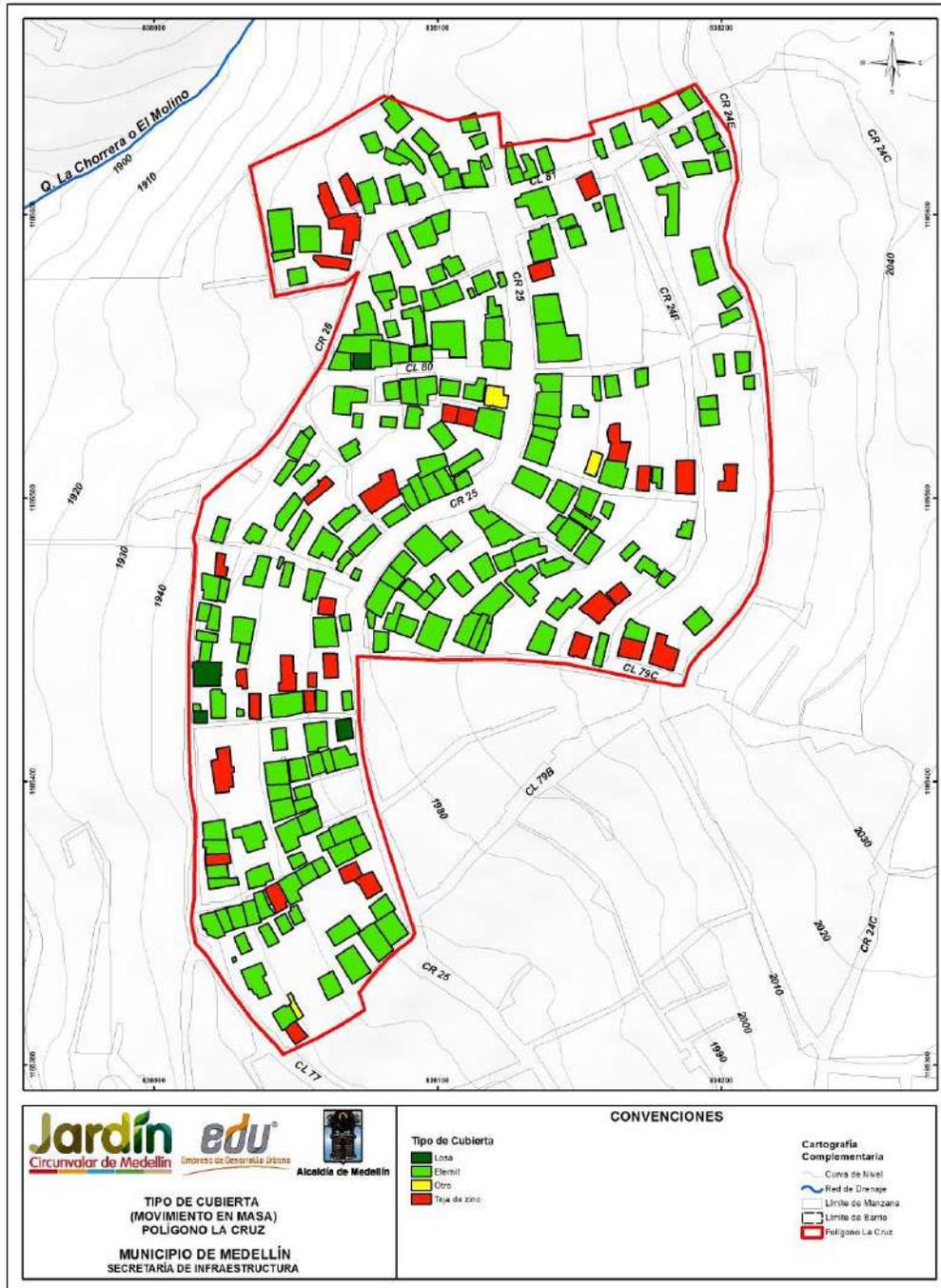
Mapa 43. Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono La Cruz (29_LCHTipodeEstructura_Medellin_C y 29_LCHTipodeEstructura_Medellin_T)



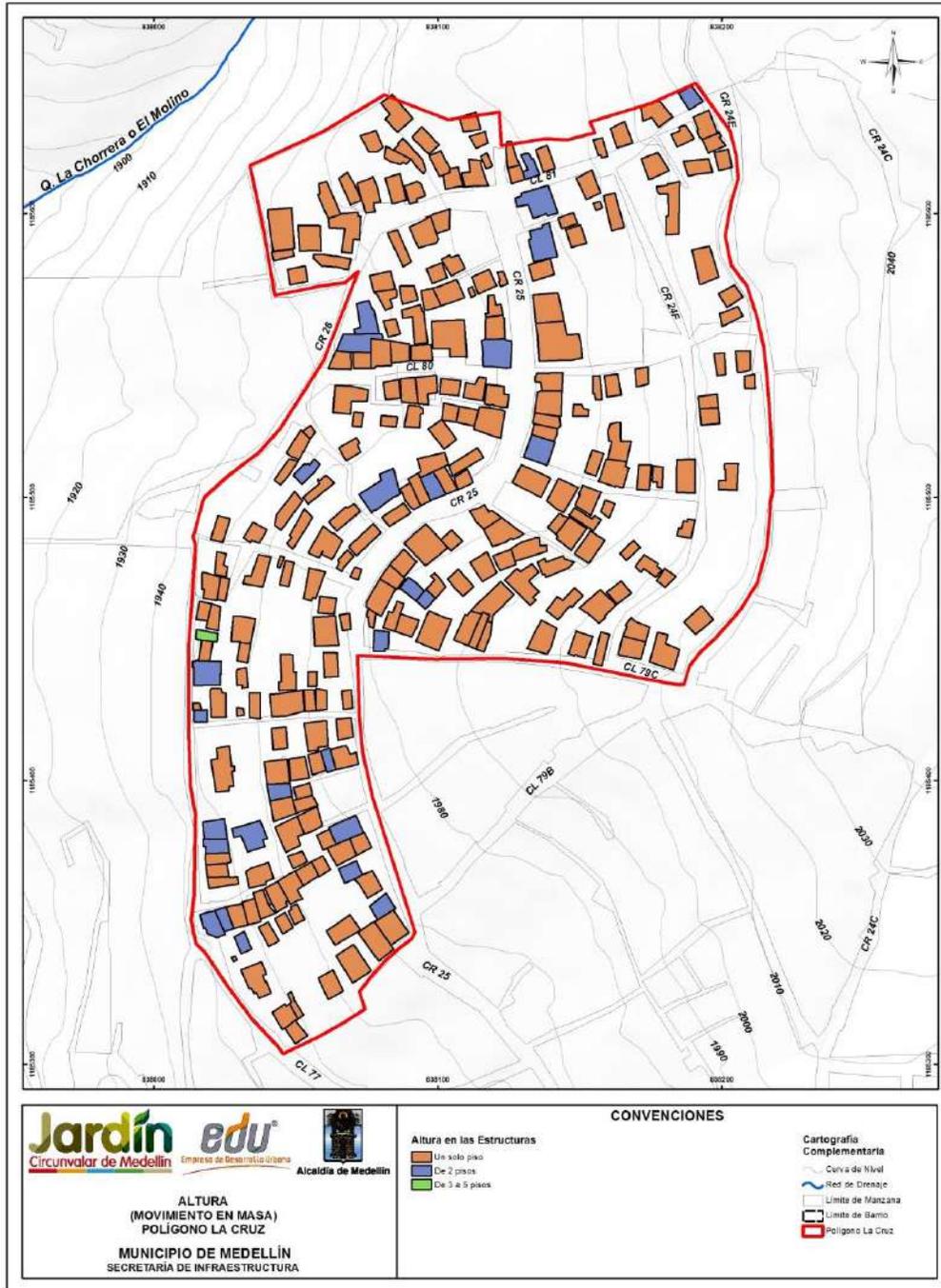
Mapa 44. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono La Cruz
(30_LCHDesplantedeFundaciones_Medellin_C y 30_LCHDesplantedeFundaciones_Medellin_T)



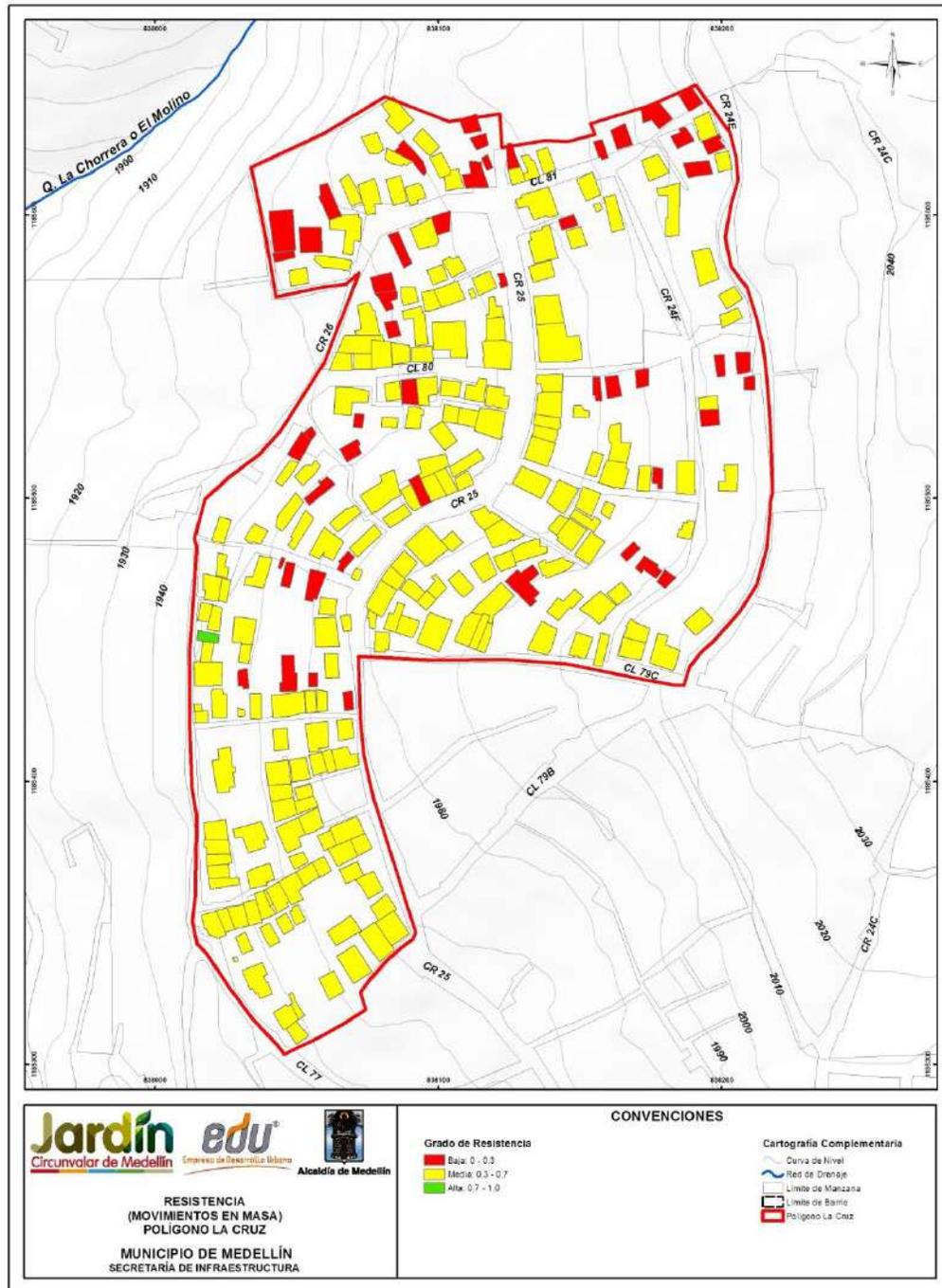
Mapa 45. Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono La Cruz (31_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_C y 31_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_T)}



Mapa 46. Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono La Cruz
(32_LCHTipodeCubierta_Medellin_C y 32_LCHTipodeCubierta_Medellin_T)



Mapa 47. Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono La Cruz (33_LCHAlturadelaConstruccion_Medellin_C y 33_LCHAlturadelaConstruccion_Medellin_T)



Mapa 48. Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa (34_LCHMapadeResistencia_Medellin_C y 34_LCHMapadeResistencia_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 La Cruz, observado en el Mapa 48, se procedió a determinar el factor intensidad (z) a través de los focos de los movimientos en masa más probables que podrían afectar la zona del polígono La Cruz.

Para determinar el factor intensidad (z) se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años (Mapa 36). En este mapa se determinaron las zonas de máxima probabilidad de falla y se evaluó su proximidad al polígono La Cruz. 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 potencialmente afectadas (Mapa 49). Finalmente, se obtuvo un factor de intensidad por efecto del movimiento en masa y su localización respecto a su foco más probable, que en conjunto con la resistencia (R) de cada estructura, permitía obtener la vulnerabilidad estructural de cada elemento:

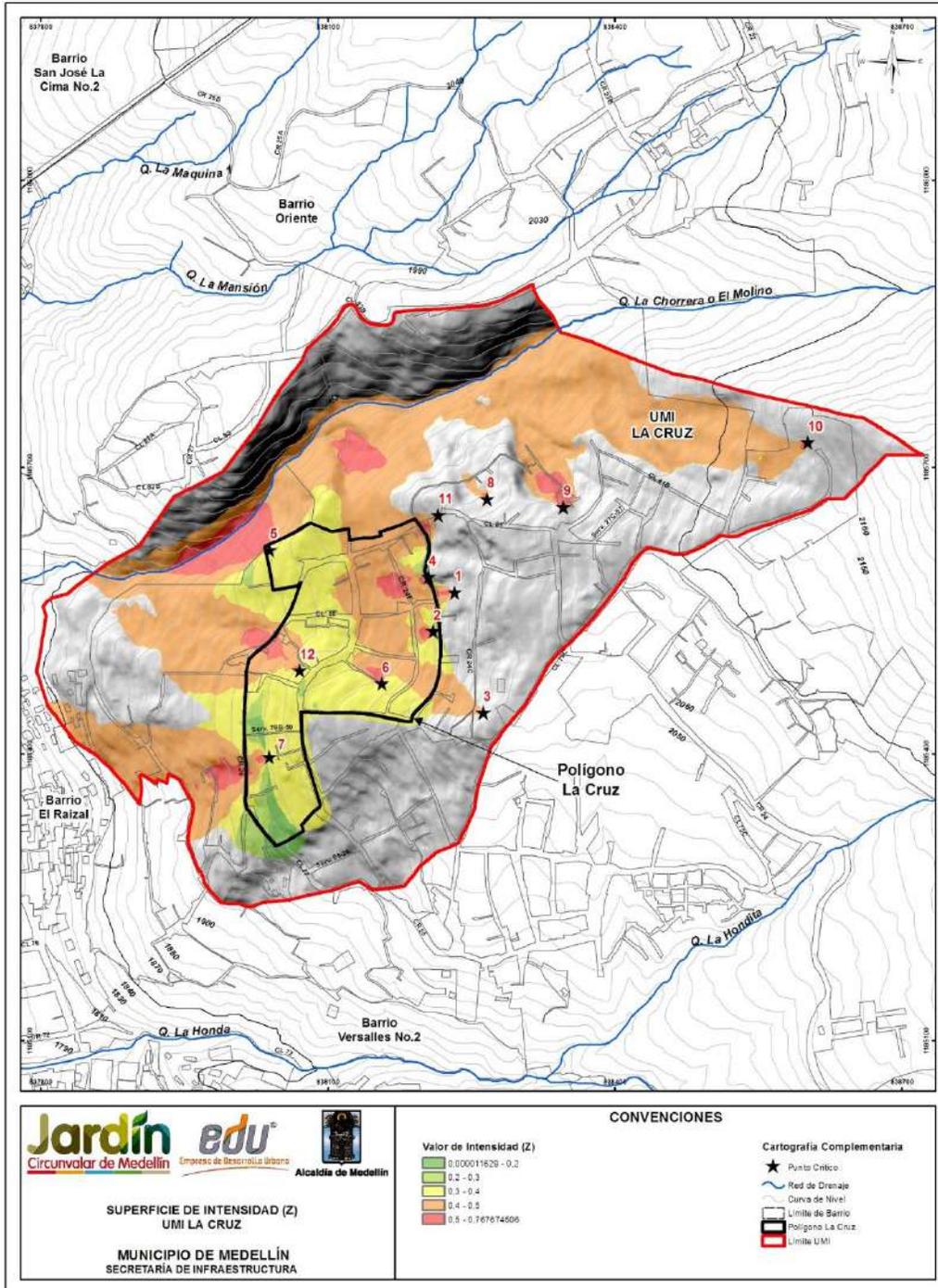
$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

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. Este valor bien puede representar un factor de daño. La Tabla 63 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.

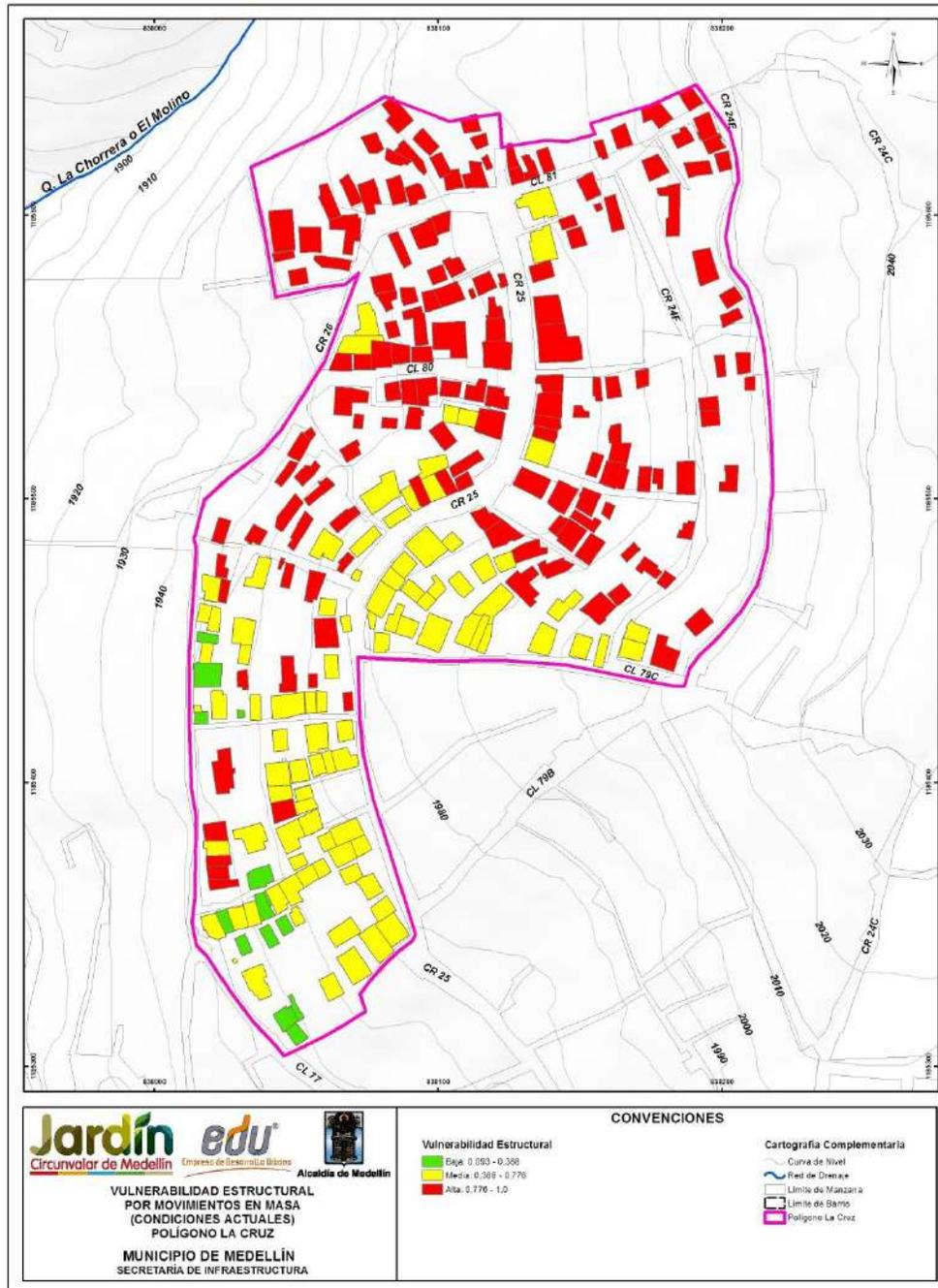
Tabla 63. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría de la Vulnerabilidad	Rango de la Vulnerabilidad	Descripción
Baja	0.0 – 0.388	Estructuras que presentarían condiciones de servicio con ligeros daños los cuales pueden ser solucionados con labores de mantenimiento y repotenciación
Media	0.388 – 0.776	Destrucción parcial de la estructura. Pérdida del servicio de las estructuras. A pesar de que las mismas puedan quedar en pie, el sistema estructural se verá seriamente afectado. Pérdida de elementos de estructurales y de apoyo.
Alta	0.776 – 1.0	Destrucción total de la estructura

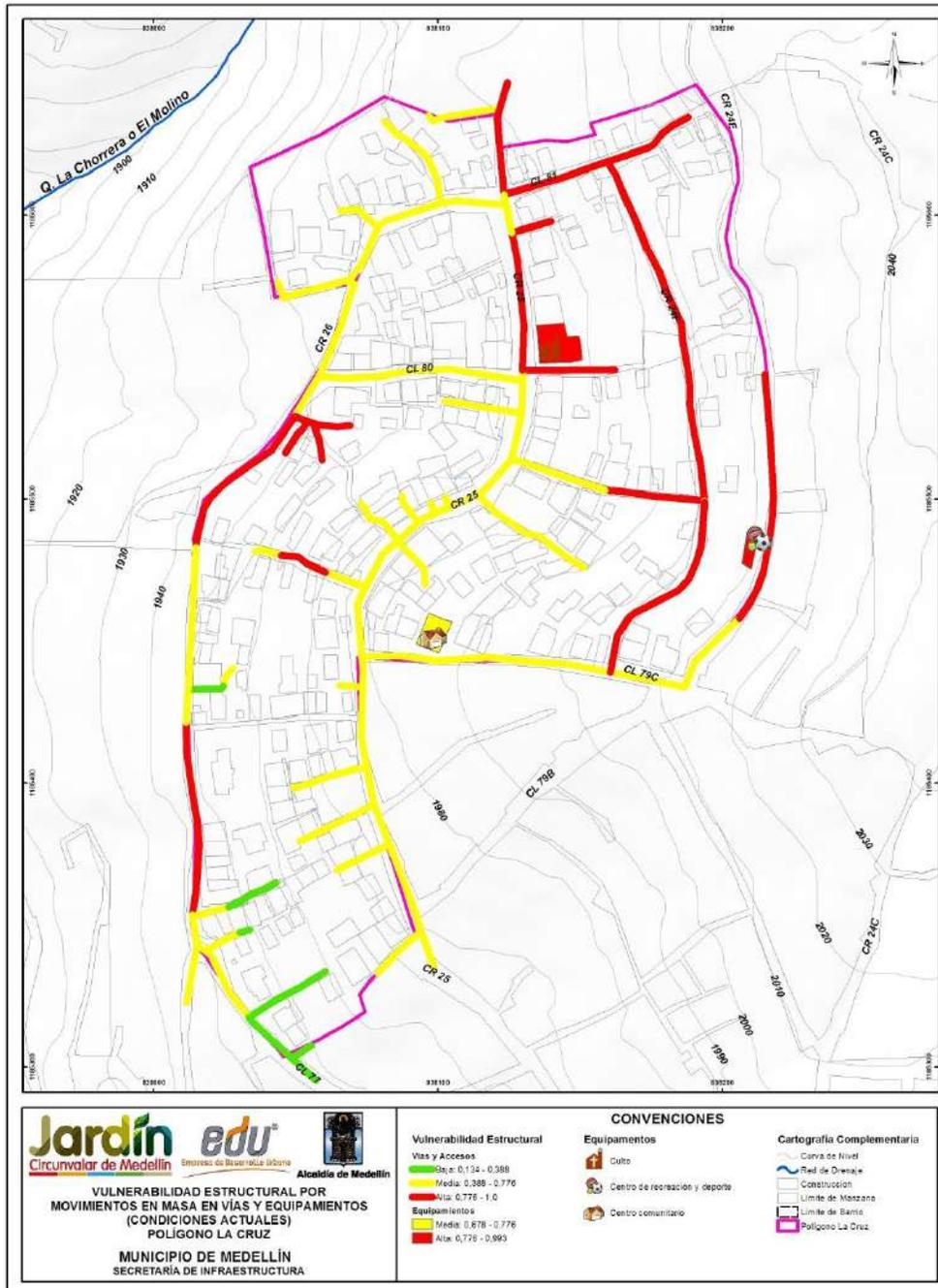
El Mapa 50 y el presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso del Polígono San Antonio, respectivamente, clasificando entre baja, media y alta según el criterio mostrado en la Tabla 63.



Mapa 49. Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono La Cruz (LCHSuperficieIntesidadesZUMI_Medellin_C)



Mapa 50. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono La Cruz
(40_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 40_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso en el Polígono La Cruz

(51_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_Cy
51_LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

La Figura 133 muestra la distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras por movimientos en masa presentada en la Mapa 50. Se ilustra que el 59% de las estructuras presentes al interior del Polígono La Cruz presentan una vulnerabilidad alta, el 35% presentan una vulnerabilidad media y el 5% presentan baja vulnerabilidad. Las estructuras con vulnerabilidad alta se distribuyen en todo el Polígono, con viviendas en su gran mayoría de un solo piso construidas en mampostería (97%).

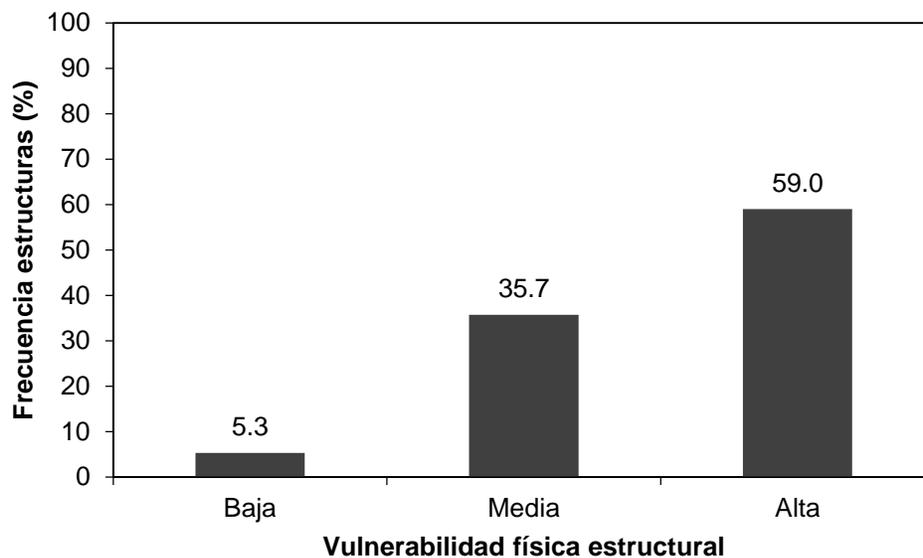


Figura 133. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras

Además de la vulnerabilidad física estructural, la metodología propuesta por Uzielli (2006) permite estimar la vulnerabilidad de las personas (V_p) que se encuentran al interior de las estructuras, en función de la vulnerabilidad estructural (V_e) mediante la expresión:

$$V_p = f(V_e) = 0.0014 \cdot e^{6.07 \cdot V_e}$$

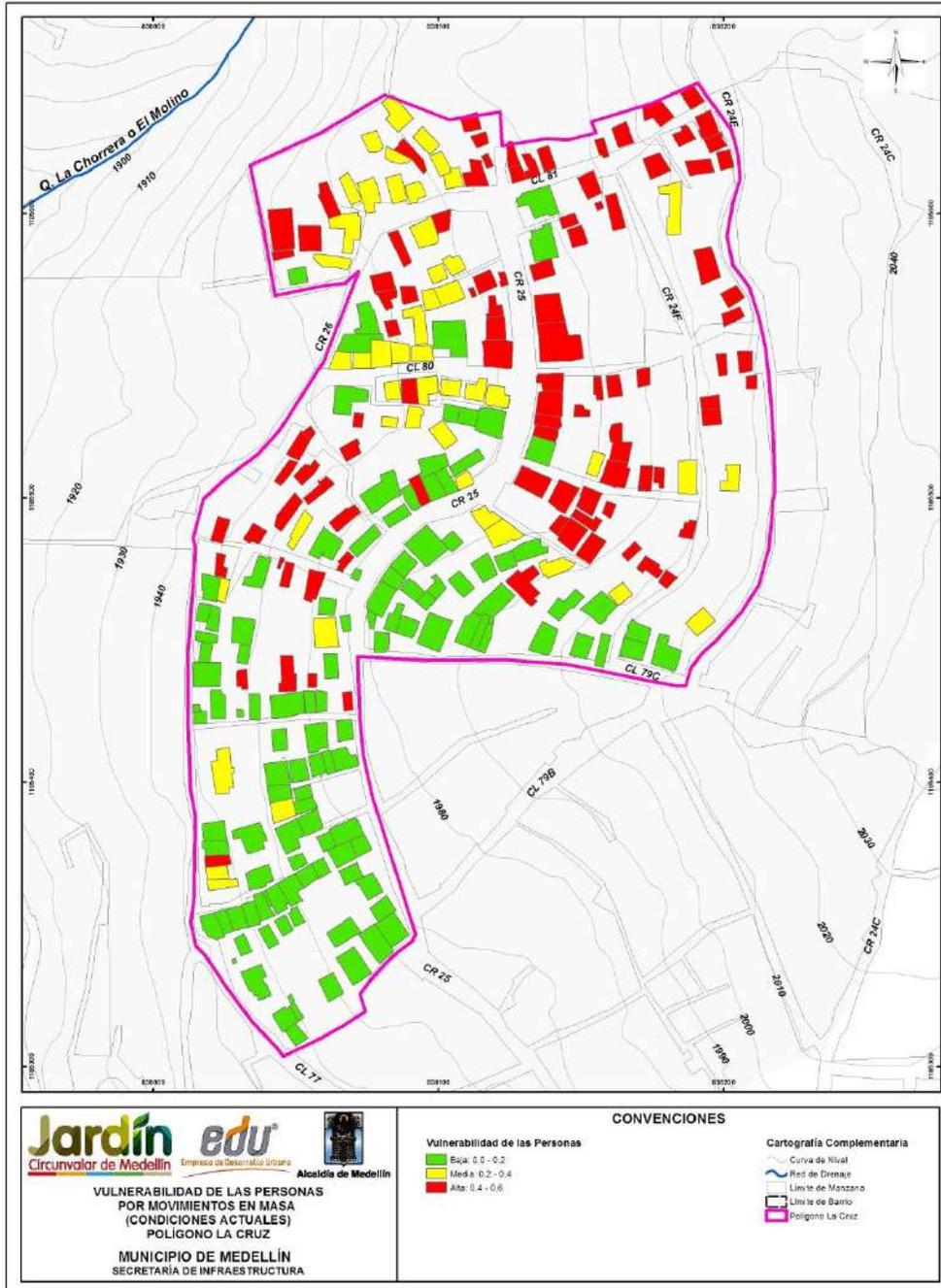
La vulnerabilidad de las personas se expresa en como un número adimensional que varía entre 0 y 0.6, donde 0.6 es el valor de máxima vulnerabilidad de las personas. Finalmente, la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras por efectos de movimientos en masa, se podrá categorizar como se muestra en la Tabla 64.

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

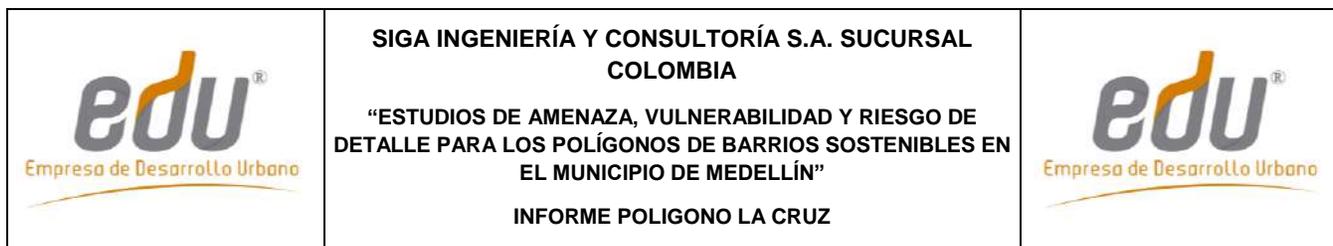
Tabla 64. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa

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 52 presenta el análisis de vulnerabilidad de las personas del Polígono La Cruz por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. En la figura se observa que de las 266 estructuras, 99 de ellas presentan alta vulnerabilidad de personas (37%), 130 presentan vulnerabilidad de personas baja (45%) y 48 presentan vulnerabilidad media (18%).



Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono La Cruz
(41_LCHVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C
41_LCHVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)



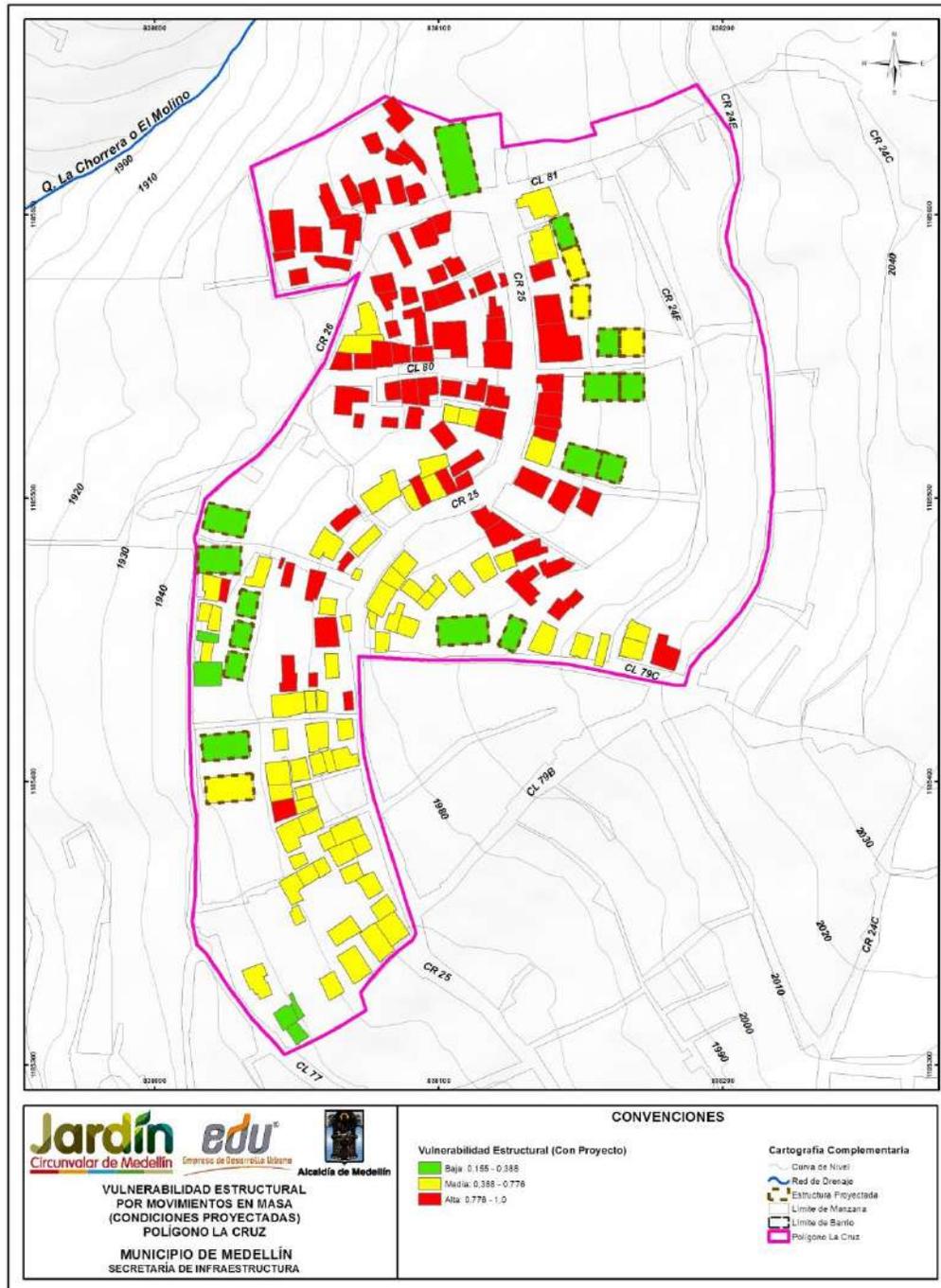
Además del análisis de la vulnerabilidad con las condiciones actuales del proyecto, se hizo una evaluación de la vulnerabilidad estructural y de las personas considerando el futuro Proyecto Barrios Sostenibles.

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 65).

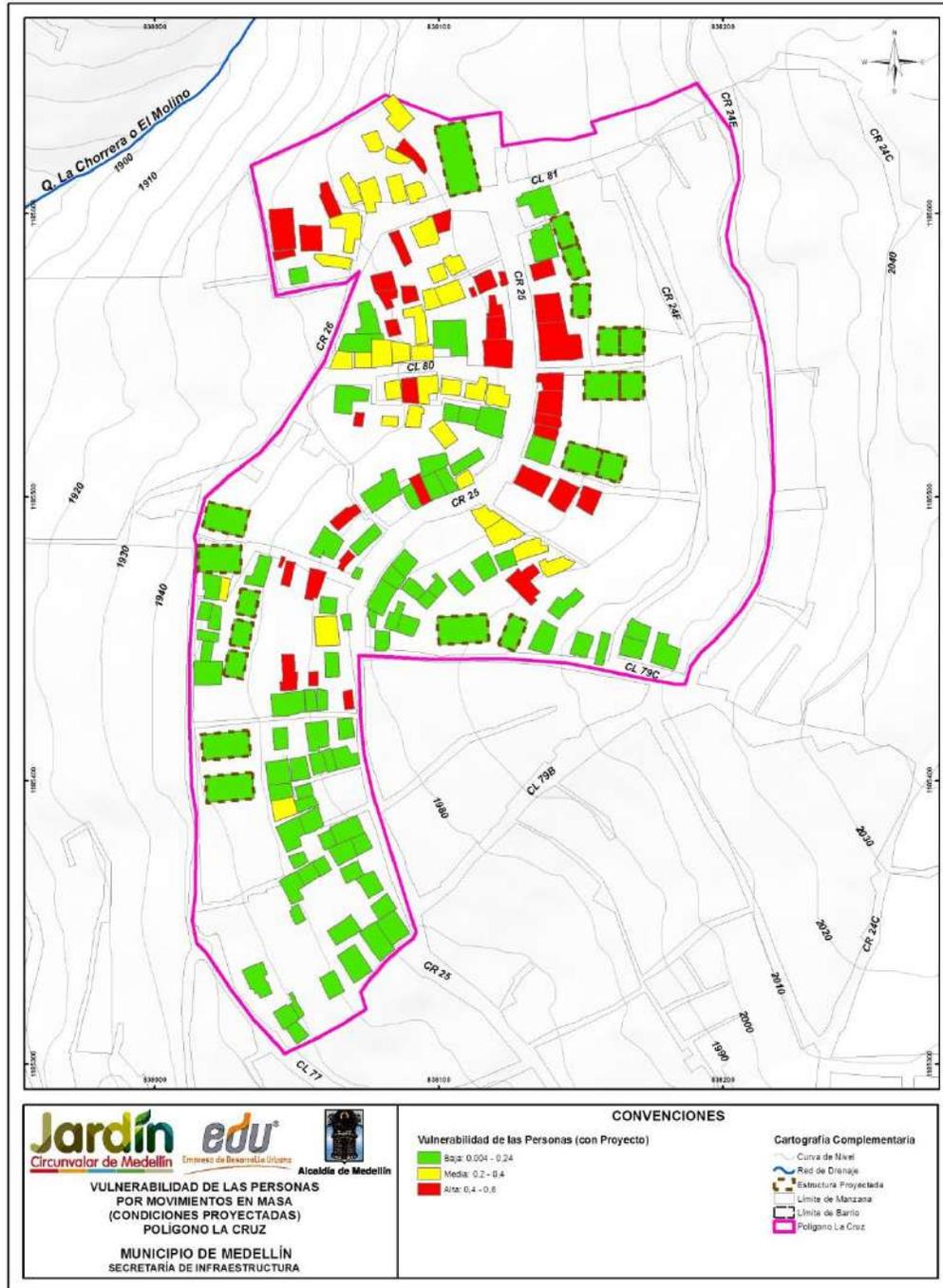
Tabla 65. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono La Cruz

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 53 y el Mapa 54 presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad del Mapa 49. Se observa que las nuevas estructuras se construirán en la parte alta y baja del Polígono donde se tienen pendientes del terreno mayores a 15° y estructuras con vulnerabilidad alta.



Mapa 53. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono La Cruz por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.
(LCHVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)



Mapa 54. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono La Cruz por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (LCHVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)

16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Para el caso de Inundaciones y Avenidas Torrenciales, la vulnerabilidad física se estimará tomando como fundamento la metodología empleada por Thouret et al. (2013) para la evaluación del riesgo por este tipo de fenómenos en Arequipa, Perú. Se considera aplicable esta metodología en la zona del presente estudio dada la gran similitud en tipología estructural que existe en ambas sitios así como la similitud en los fenómenos estudiados.

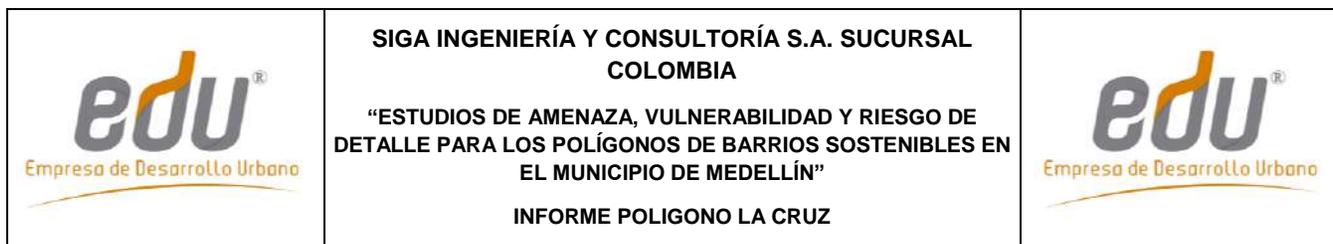
Según esta metodología, la vulnerabilidad física está definida a partir del Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI, por sus siglas en inglés), el cual a su vez está definido según el índice de Vulnerabilidad de la Edificación (BuV). Este último depende estrictamente de las características de las edificaciones, considerando los siguientes tres criterios principales: el tamaño de la edificación, la calidad y/o mantenimiento de su construcción, y la densidad poblacional.

El tamaño del edificio es evaluado a partir del número de niveles, y la calificación de su vulnerabilidad es mayor para aquellas edificaciones que presentan un número de niveles menor. Así, para un edificio de 4 o más niveles, su Factor de Vulnerabilidad por Tamaño de Edificación (FVT) será de 1; para uno de 3 niveles será de 2, para uno de 2 niveles será de 3 y finalmente para uno de 1 nivel será de 4, el mayor de todos.

Por su parte, en Thouret et al. (2013) el factor de vulnerabilidad por la calidad de la construcción (FVC) es evaluada de 1 a 3 según el grado de mantenimiento que presente la edificación. Se asigna una calificación de 1 a aquellas construcciones que tengan buen mantenimiento, 2 a aquellas que tengan un mantenimiento aceptable o medio, y 3 a aquellas que presenten un mantenimiento deficiente. Para el caso en estudio, se considerará para la calidad de la construcción el tipo de material de la vivienda y el estado de la estructura, dado que estos elementos representan con mayor fidelidad el grado de resistencia de la estructura frente a los fenómenos estudiados en la zona. La calificación a adoptar para cada combinación del tipo de material-estado se presenta en la Tabla 66.

Tabla 66. Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTADO DE LA ESTRUCTURA	FACTOR DE VULNERABILIDAD POR CALIDAD DE LA ESTRUCTURA (FVC)
Muy ligera (lata y cartón) o Ligera (Madera)	Muy mala a Mala	3
	Media	3
	Buena o Muy Buena	2
Media (Concreto y madera) o Mampostería	Muy mala a Mala	3
	Media	2
	Buena o Muy Buena	2
Concreto (con o sin refuerzo)	Muy mala a Mala	2
	Media	2
	Buena o Muy Buena	1



Para el factor por Densidad de Población (FVD), en Thouret et al (2013) se emplea una calificación de 1 a 4. Se adopta un valor de 4 para altas densidades, de 3 para densidades medias, de 2 para densidades bajas y de 1 para densidades muy bajas

A partir de estos tres factores, FVT, FVC y FVD, se estima el Índice de Vulnerabilidad de la estructura (BuV) según la siguiente expresión, el cual tomará valores entre 1 y 48:

$$\text{BuV} = \text{FVT} \times \text{FVC} \times \text{FVD}$$

A partir del Índice BuV se estima el Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI), tal como se presenta en la Tabla 67.

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 67. Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV

BuV	RvI	Vulnerabilidad Física
1 a 3	1	Baja
4 a 6	2	Baja
7 a 12	3	Media
13 a 24	4	Alta
25 a 48	5	Alta

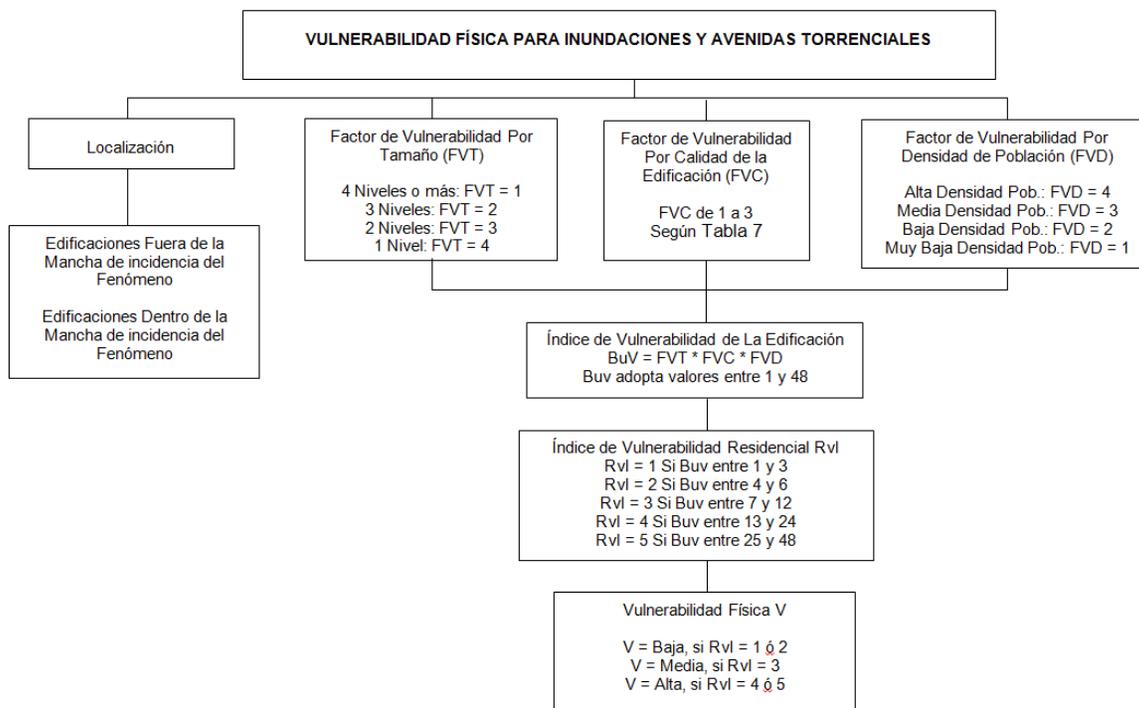


Figura 134. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones y avenidas torrenciales

Para el caso de inundaciones y avenidas torrenciales, las etapas son las anteriormente descritas. La diferencia consiste en que se incluye un atributo adicional para cada estructura, que es la densidad habitacional.

Del Mapa 55 al Mapa 59 se presentan los mapas de atributos para cada estructura, los cuales corresponden a Tipo de Estructura, Estado de la Estructura, Altura de la Construcción, Densidad de Población y Grado de Vulnerabilidad a Inundación.

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

- ✓ En el polígono La Cruz, La mayoría de las construcciones del polígono tienen un tipo de estructura en Mampostería con un 80.08%. En menor porcentaje se encuentran las estructuras Ligeras con un 19.92% (Tabla 68).
- ✓ En el Polígono La Cruz el estado que predomina la mayoría de las construcciones se ubica en estado Medio, con un 83.83% del total de las inspecciones realizadas. Le siguen las estructuras en estado Malo con un 12.03%. En menor porcentaje se encuentran estructuras Buenas con un 4.14% (Tabla 69).

- ✓ En el polígono La Cruz, La mayoría de las viviendas del polígono cuentan con un solo piso construido con un 89.47%. Le siguen las edificaciones de dos pisos y de tres pisos con un 10.15% y 0.38% respectivamente (Tabla 70).
- ✓ Un poco más de la mitad de las construcciones en el Polígono La Cruz presentan una densidad Muy baja con un 56.77%. Le siguen las edificaciones con densidad Baja con un 34.21%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades Medias y Altas con un 6.39% y 2.63% respectivamente (Tabla 71).

Tabla 68. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	53	19.92
Mampostería	213	80.08
Total	266	100

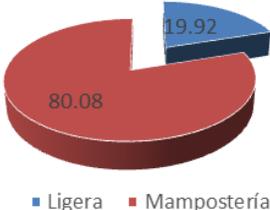


Tabla 69. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Estado Estructura	Total Viviendas	%
Mala	32	12.03
Media	223	83.83
Buena	11	4.14
Total	266	100

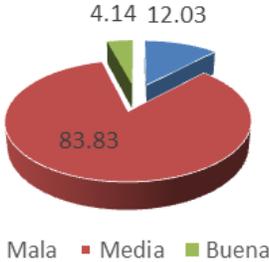


Tabla 70. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Altura de la estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	238	89.47
De 2 pisos	27	10.15
De 3 pisos	1	0.38
Total	266	100

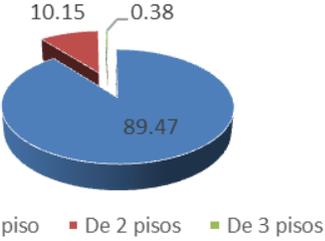
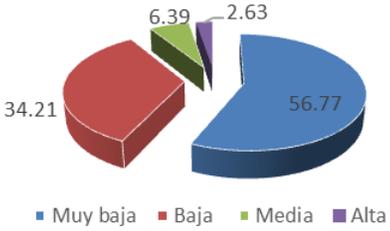


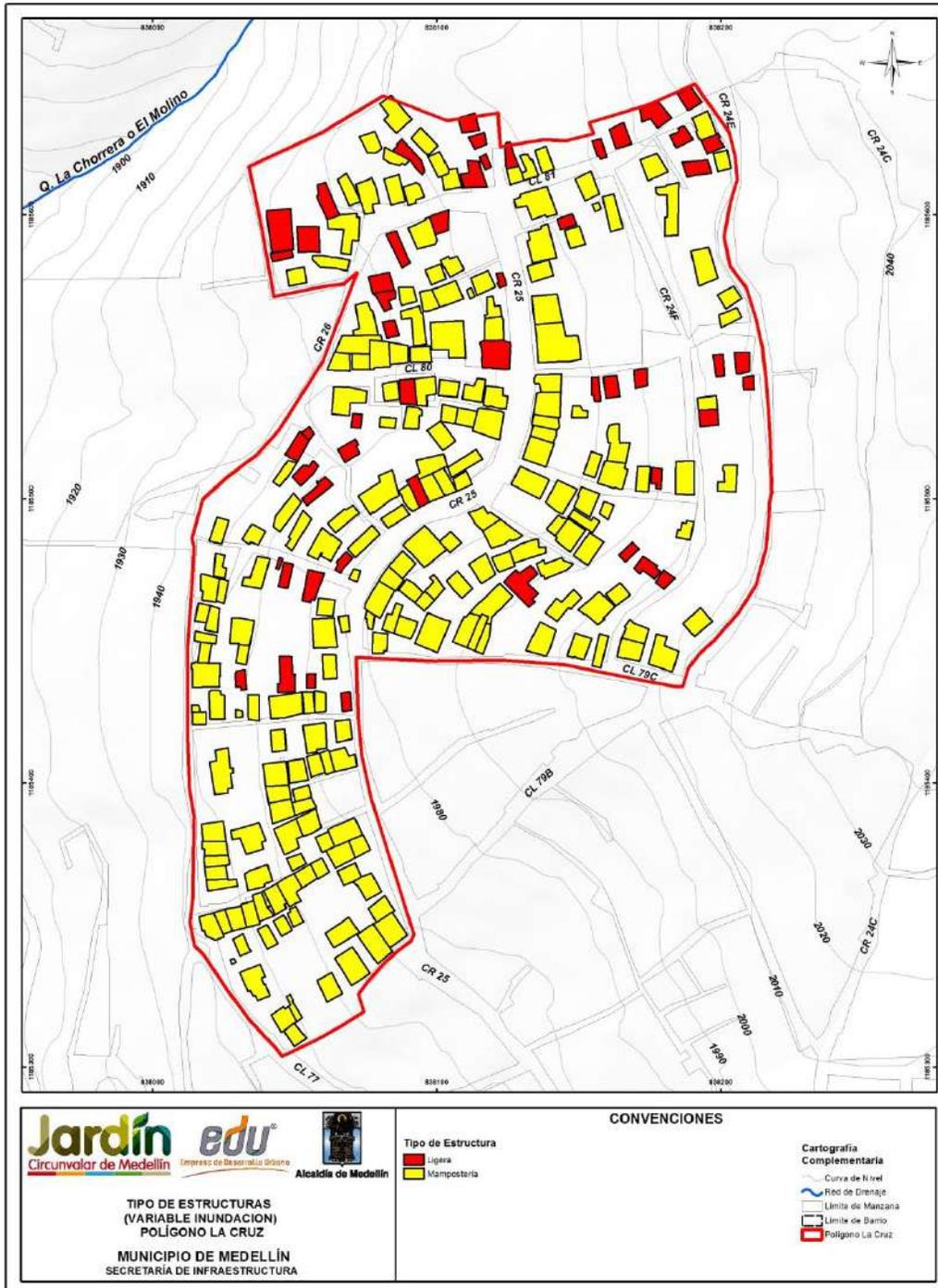
Tabla 71. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Densidad de población	Total Viviendas	%
Muy baja	151	56.77
Baja	91	34.21
Media	17	6.39
Alta	7	2.63
Total	266	100

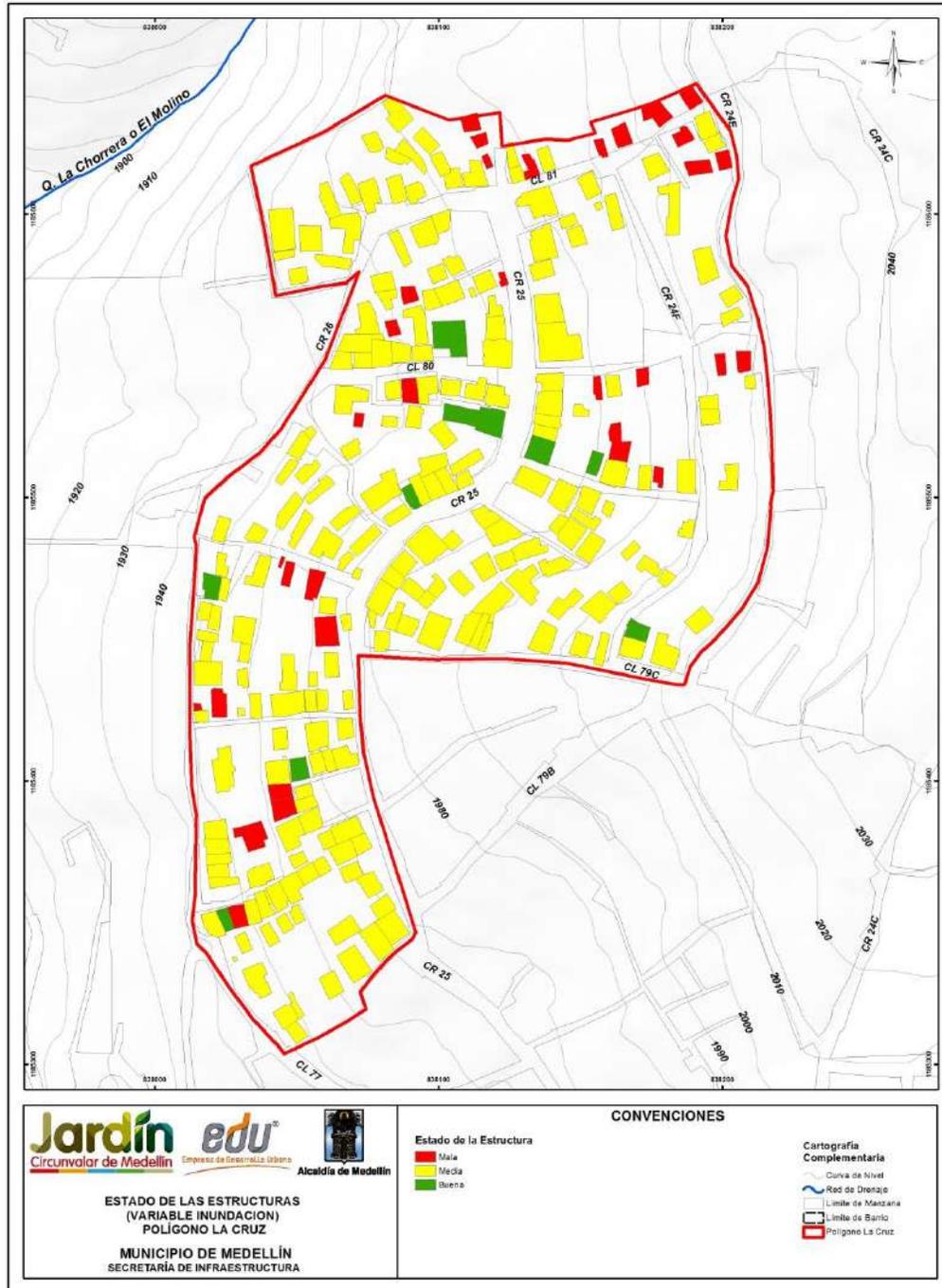


Finalmente con la información y con la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por inundaciones y avenidas torrenciales, se determinó el índice de vulnerabilidad residencial de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta (Mapa 59). El Mapa 60 se presenta igualmente la vulnerabilidad de las estructuras ante inundaciones, considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles.

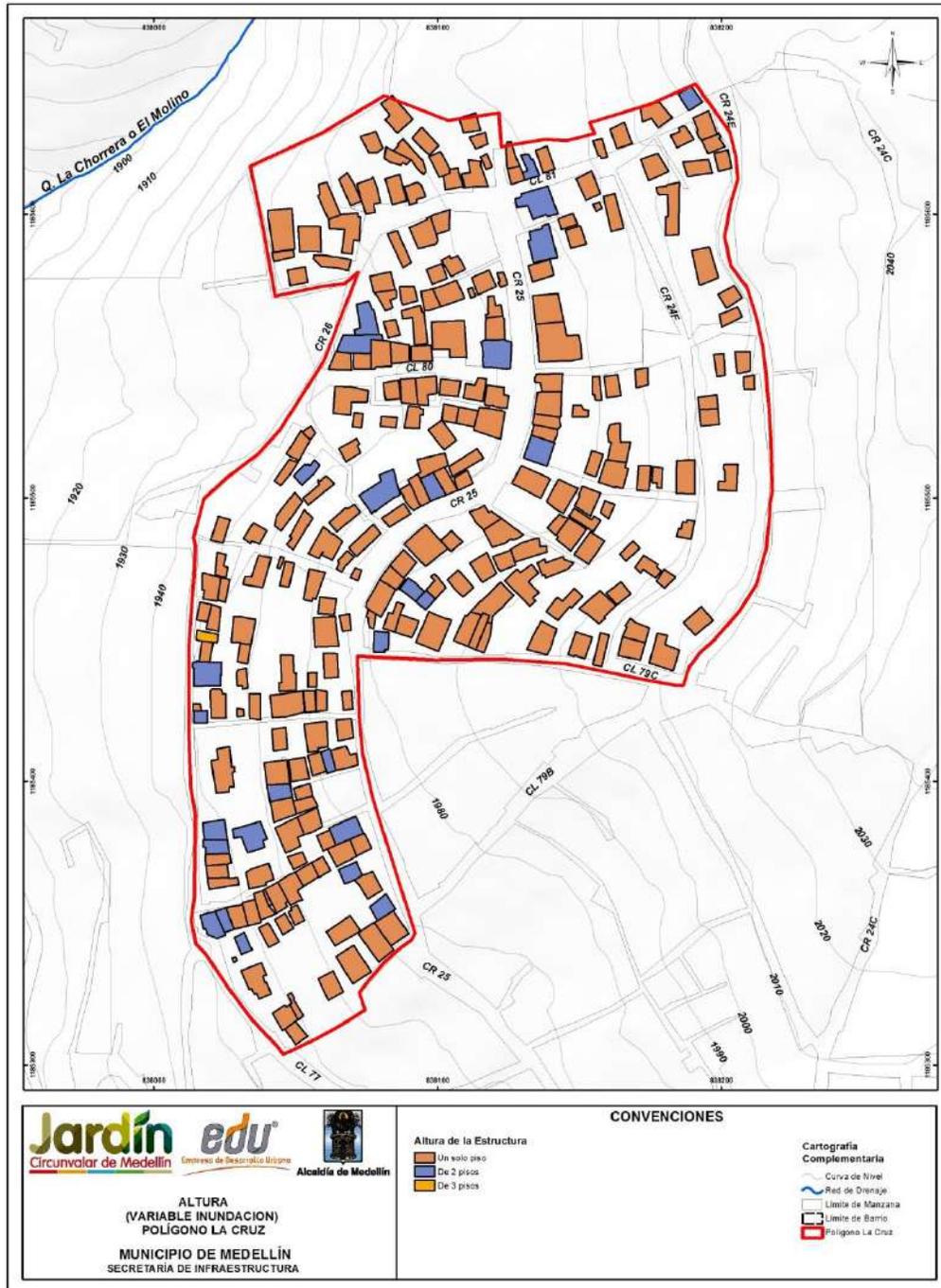
De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono La Cruz. Para el caso de las vías, se tiene que el Factor de Vulnerabilidad por Densidad (FVD) y el Factor de Vulnerabilidad por Tamaño (FVT) son constantes con los valores 4 y 4 respectivamente, asociados a Alta Densidad debido a la circulación de personas y vehículos y considerando que son estructuras de una planta. Para el caso de los equipamientos, su grado de vulnerabilidad sigue siendo el indicado por la misma metodología y factores aplicados en el análisis de vulnerabilidad de las edificaciones. En el Mapa 61 se presenta el mapa resultado del análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales para el Polígono La Cruz



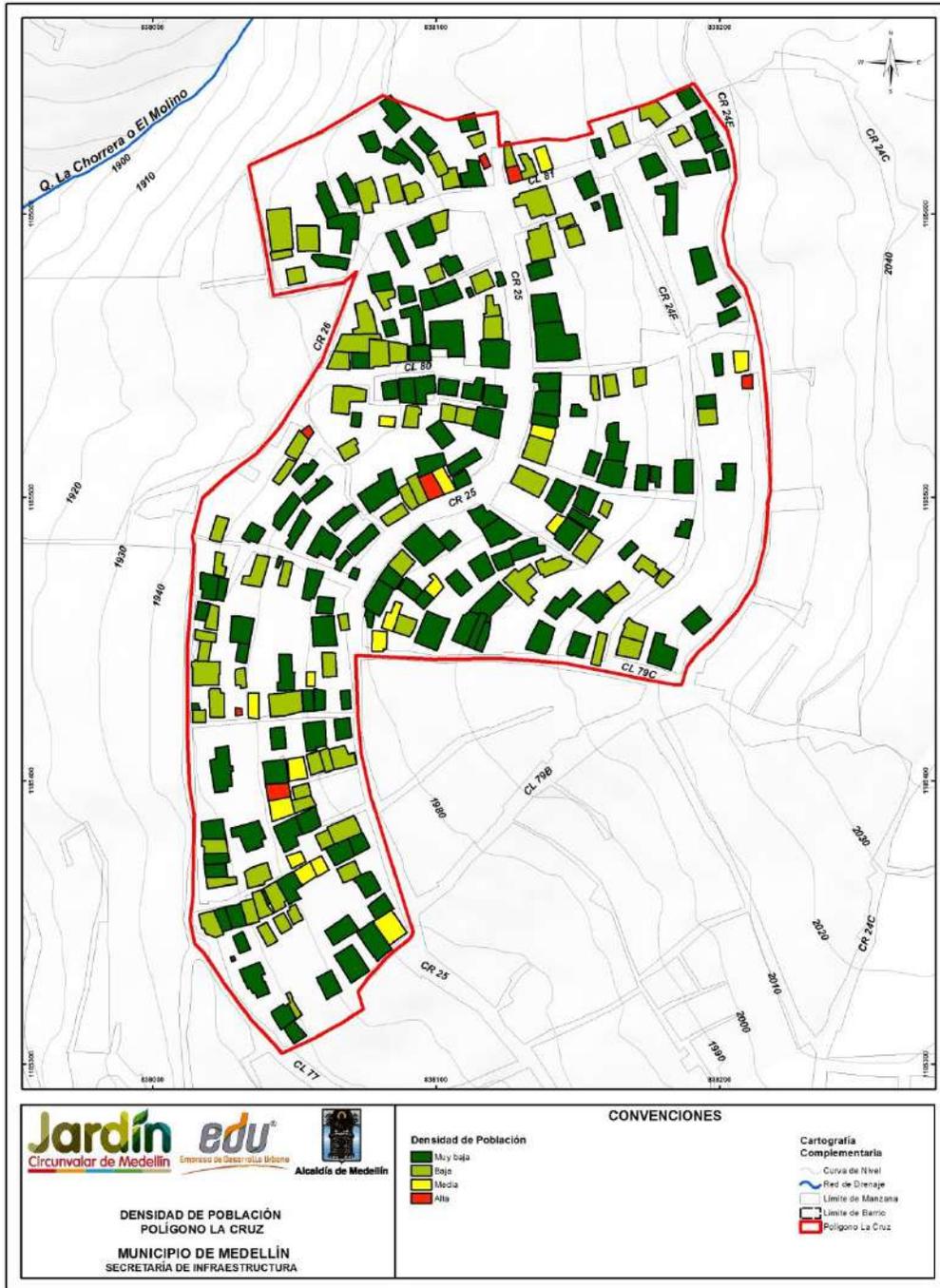
Mapa 55. Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono La Cruz (35_LCHTipodeEstructura_Medellin_C y 35_LCHTipodeEstructura_Medellin_T)



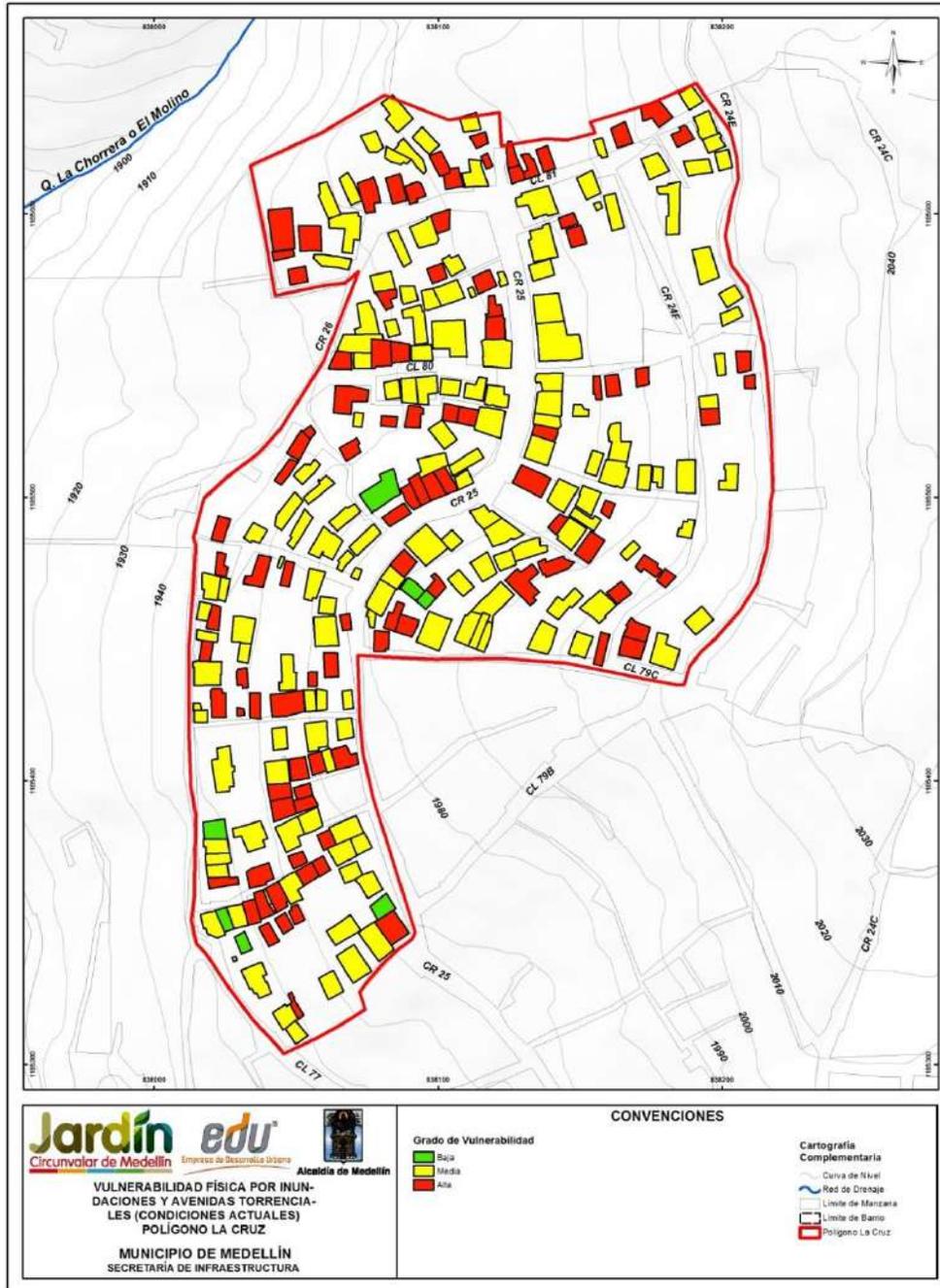
Mapa 56. Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono La Cruz
 (36_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_C y 36_LCHEstadodelaEstructura_Medellin_T)



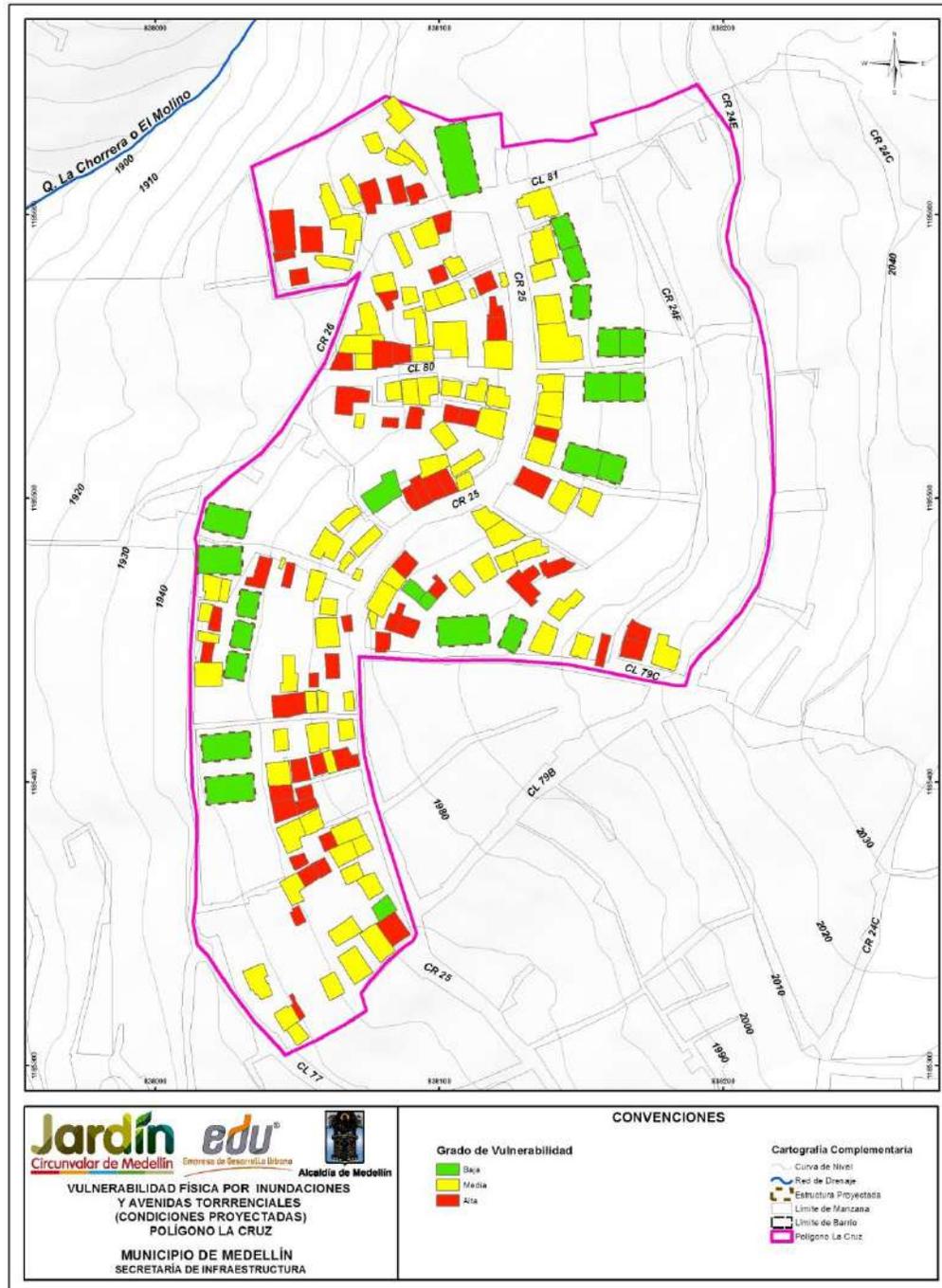
Mapa 57. Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono La Cruz
 (37_LCHAlturadelaConstruccion_Medellin_C y 37_LCHAlturadelaConstruccion_Medellin_T)



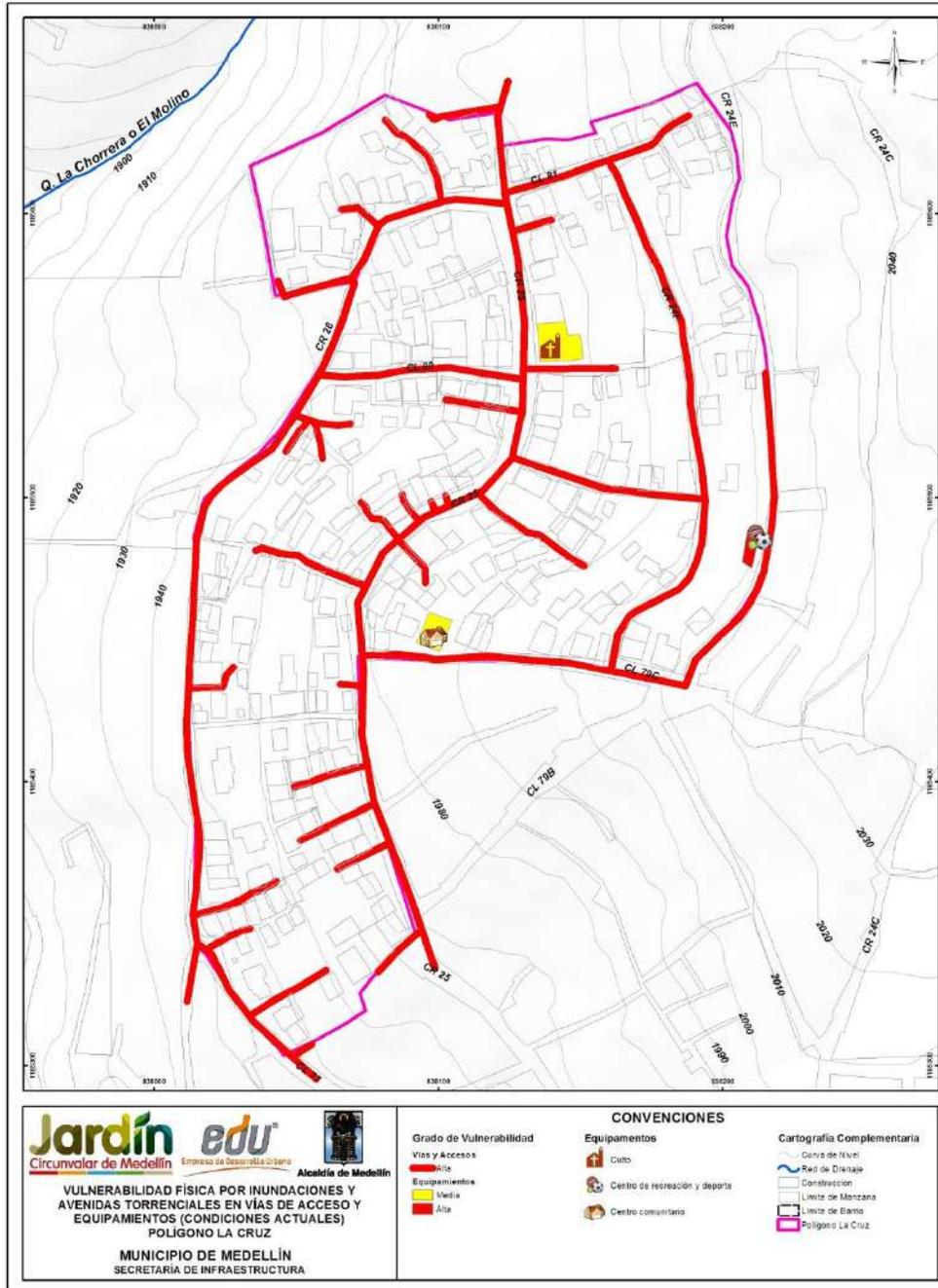
Mapa 58. Localización espacial la densidad de la población en el Polígono La Cruz (38_LCHDensidaddePoblacion_Medellin_C y 38_LCHDensidaddePoblacion_Medellin_T)



Mapa 59. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en condiciones actuales para el Polígono La Cruz
(42_LCHVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_C y 42_LCHVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T)



Mapa 60. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones para el Polígono La Cruz con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (LCHVulnerabilidadFisicaporInundacionesProyecto_Medellin_C)



Mapa 61. Análisis de vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales en el Polígono La Cruz para las Vías de Acceso y Equipamientos
(52_LCHVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_C y 52_LCHVulnerabilidadAvenTorrenAccesosEquipamientos_Medellin_T)

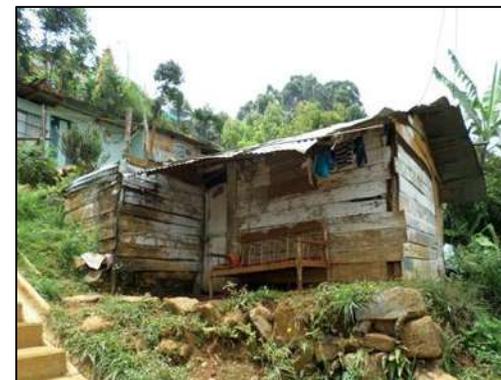
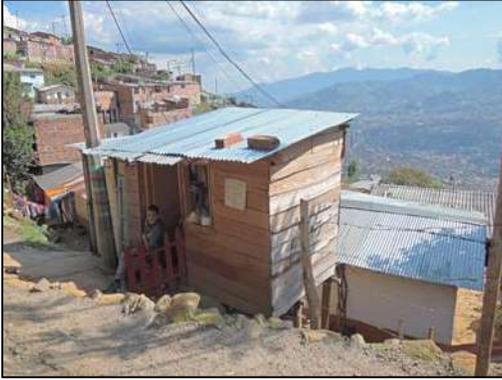
16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS

De la Tabla 72 se presenta el registro fotográfico para las zonas en las que se dividió el Polígono La Cruz.

Tabla 72. Registro fotográfico en el Polígono La Cruz







	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 necesario su estimación cuantitativa para la toma de decisiones. Estos análisis pueden llevarse a cabo, por ejemplo, en forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un evento o escenario o aleatorio, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín et al., 2013).

Las cuantificaciones son claves, puesto que permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas. Más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis empleados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos. Además, facilita la comunicación entre profesionales, propietarios y tomadores de decisiones (Corominas et al., 2014). Analíticamente, el riesgo específico se podrá calcular con base en la siguiente expresión:

$$R = P(H_i) \cdot V \cdot E$$

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

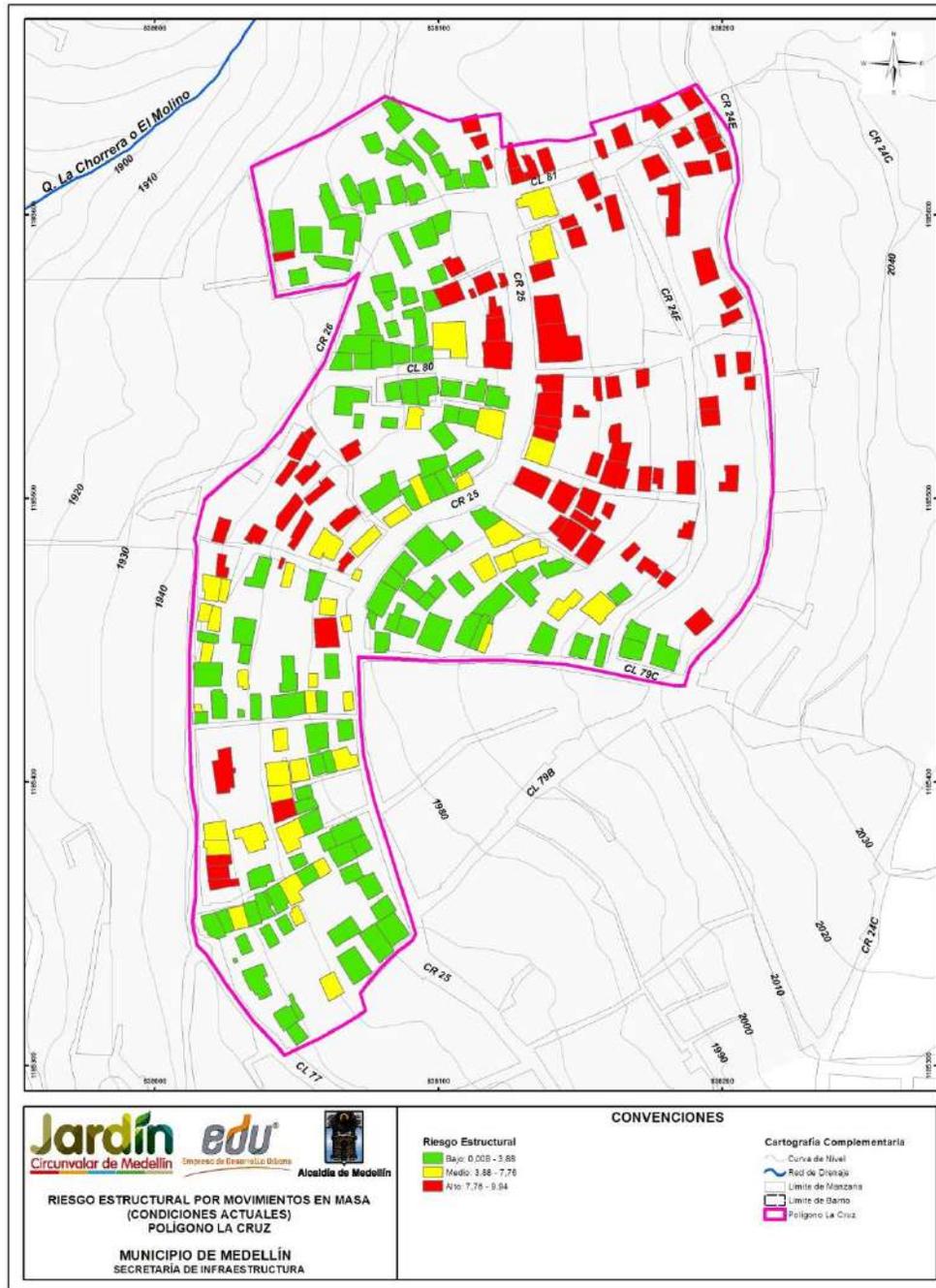
Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (H_i), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. En este caso los escenarios de amenaza son el de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. $P(H_i)$ es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica (H_i) en un tiempo dado y en un área específica. V es vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud (H_i) expresada en una escala entre 0 y 1 como en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa. E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por la amenaza; para el caso de personas.

Teniendo en cuenta lo anterior, los términos a los que se quiere llegar con los análisis de riesgo, son análisis materializados bien sea representados en porcentajes de pérdidas, costos económicos o en pérdidas de vida. De esta forma se tendrá un valor tangible del riesgo que permitirá la toma de decisiones en cuanto al proyecto.

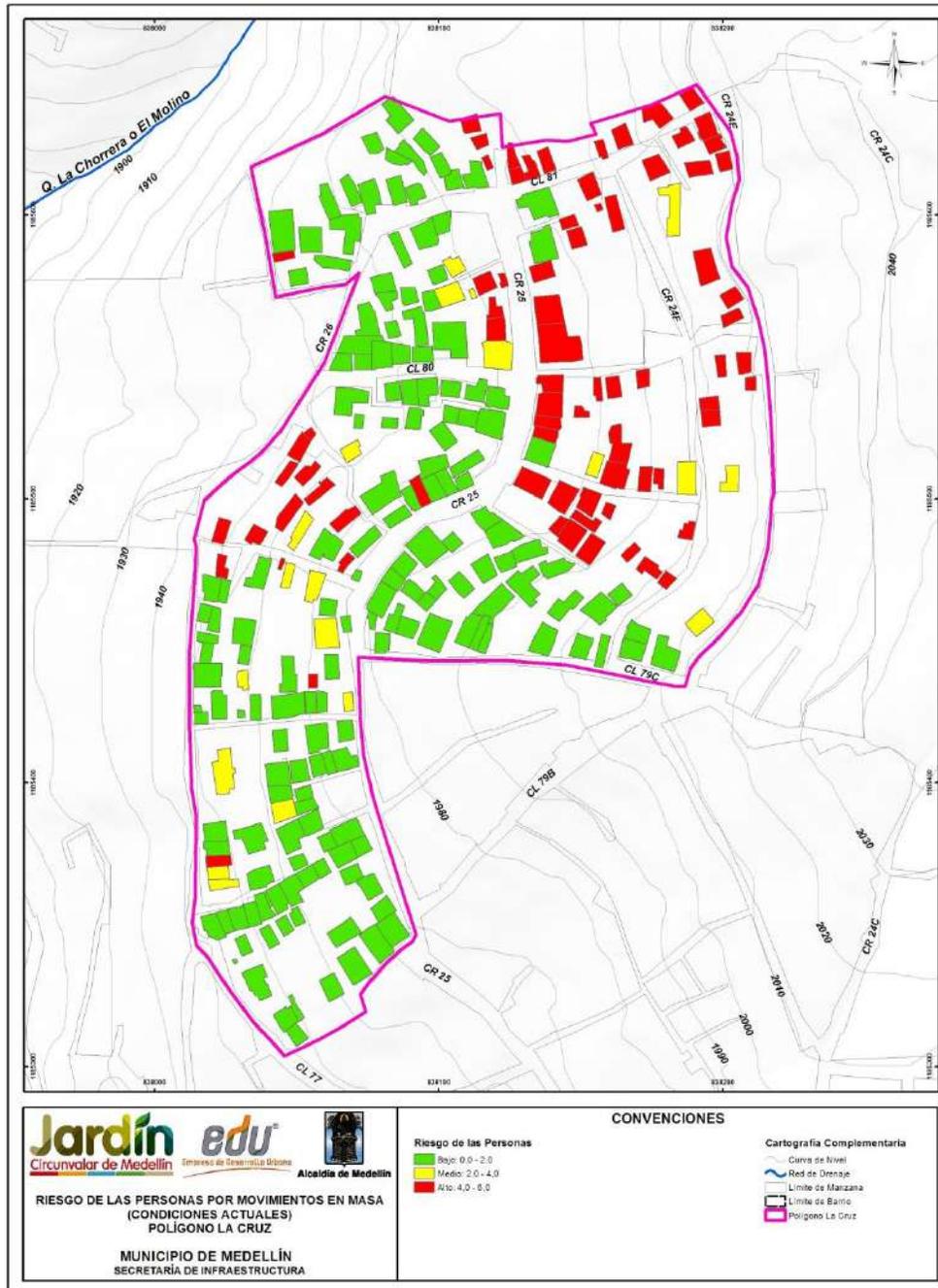
17.3 RESULTADOS

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años (Mapa 36), 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.

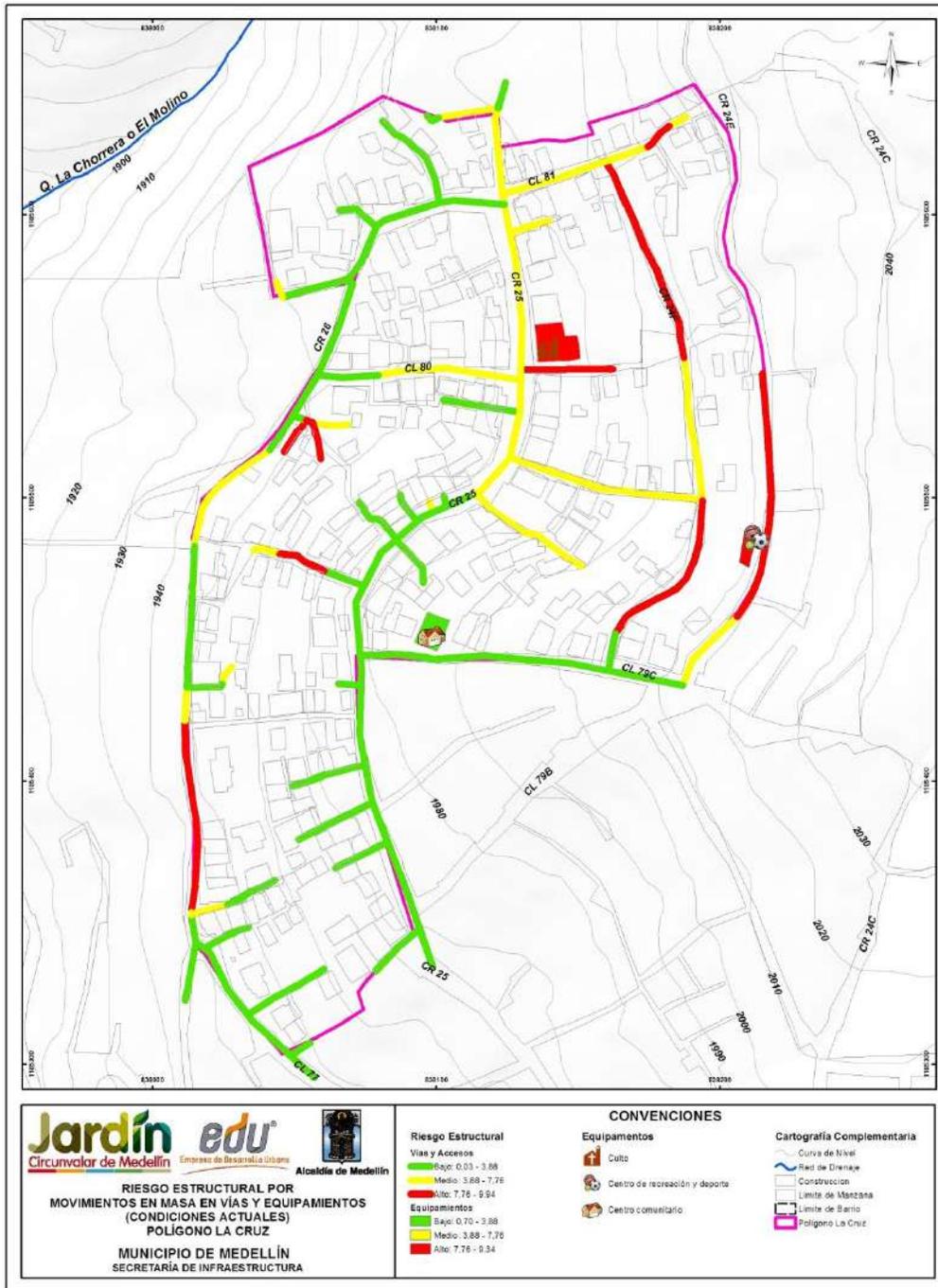
En el Mapa 62 y en el Mapa 63, a continuación, se presentan los resultados de los análisis de riesgo considerando las condiciones actuales, en términos de porcentaje de pérdidas económicas y en términos de porcentaje de pérdidas de vidas respectivamente. El Mapa 64 presenta la categorización del riesgo 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.



Mapa 62. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono La Cruz
(43_LCHRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y
43_LCHRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 63. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono La Cruz
(44_LCHRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y 44_LCHRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 64. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso por movimientos en masa (53_LCHRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C y 53_LCHRiesgoEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se generó un mapa de riesgo total que consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Este mapa de riesgo total se hizo basados en la propuesta del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en su Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015).

Tabla 73. 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 74.

Tabla 74. 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.

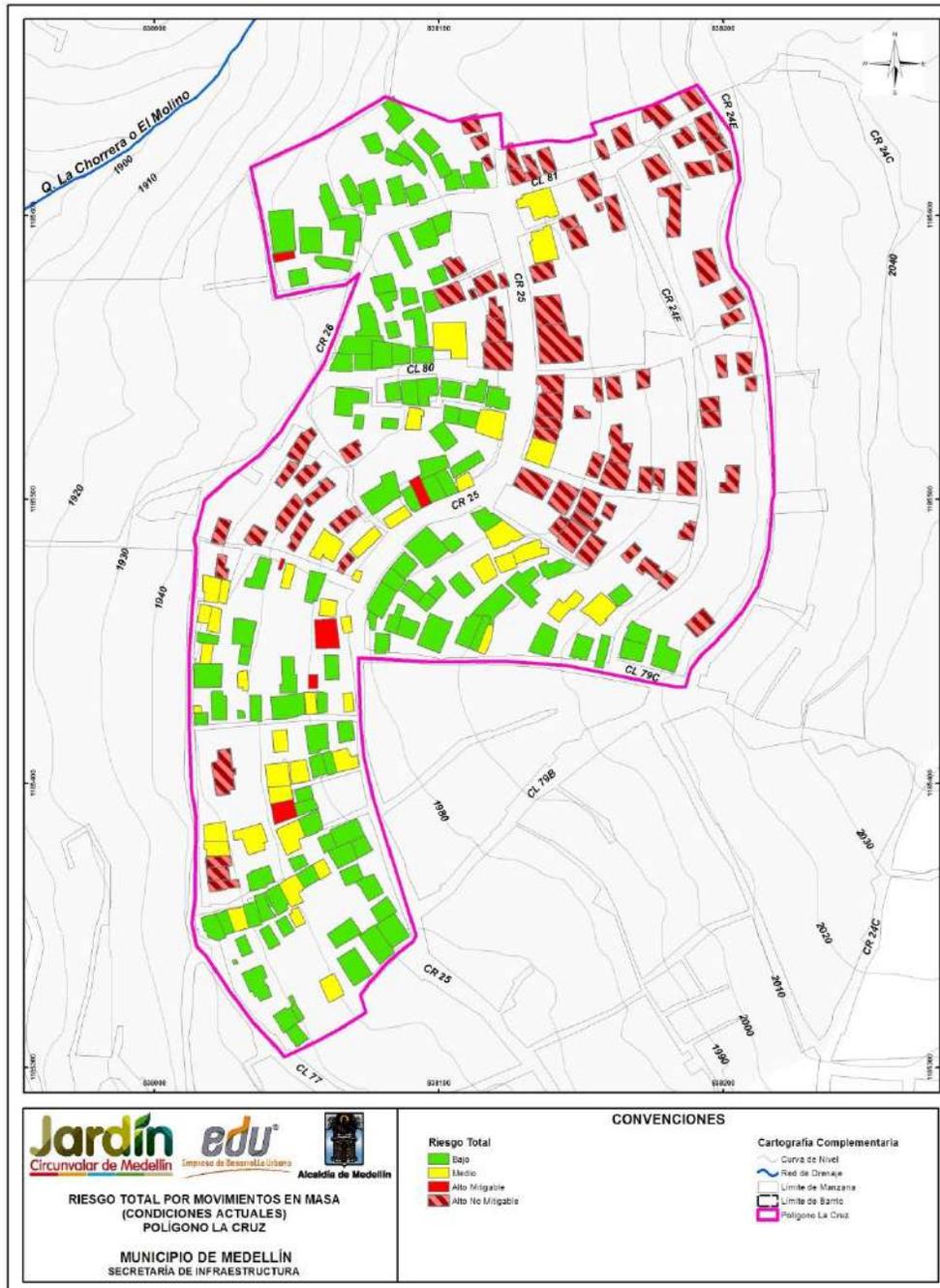
Adicionalmente, la categoría de riesgo alto fue subcategorizada en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura exceden los costos de las alternativas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si por el 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 65 se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 266 estructuras, 130 de ellas presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (49%), 44 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (16%) y 92 presentan riesgo alto ante movimientos en masa (35%), de las cuales 86 estructuras presentan riesgo alto no

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

mitigable por motivos que serán explicados en el Numeral 20.1. Se puede observar que se tiene un gran número de estructuras del sector nororiental del polígono con riesgo alto y algunos sectores en el costado occidental. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad al interior y por fuera del polígono la responsable principal de los resultados obtenidos.

En la Tabla 75 se presenta la descripción de cada una de las estructuras que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa. En el Capítulo 20 se exponen las consideraciones tenidas en cuenta para la clasificación de las estructuras como riesgo alto no mitigable.



Mapa 65. Análisis de riesgo total de vivienda y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono La Cruz (45_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_C y 45_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T)

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

Tabla 75. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono La Cruz

Estructura	COBAMA	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura
23	311007	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
38	311007	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
68	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
81		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
89	311014	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
90	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
92		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
94		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
100	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
101		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
102	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
103	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
105	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
107	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
108	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
109	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
110	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
111	311011	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
114	311014	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
115	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
116	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
117		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
118	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
119	311011	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Dos pisos
120	311011	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
121		Residencial	Mampostería	<2 m	Buena	Un piso
124		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
125		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
126	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
133		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso

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

Tabla 75. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono La Cruz

Estructura	COBAMA	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura
135	311015	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
143		Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
145		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
146	311014	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
147	311014	Comercial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
148		Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
149		Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
151	311015	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
154	311012	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Dos pisos
157		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
160	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
161	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
163	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
165	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
167	311012	Comercial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso
169	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
172	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
173	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
176	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
179	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
181		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
185		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
186	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
190	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
194	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
197	311015	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
198	311018	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
199		Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
201	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Mala	Un piso
202	311018	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso

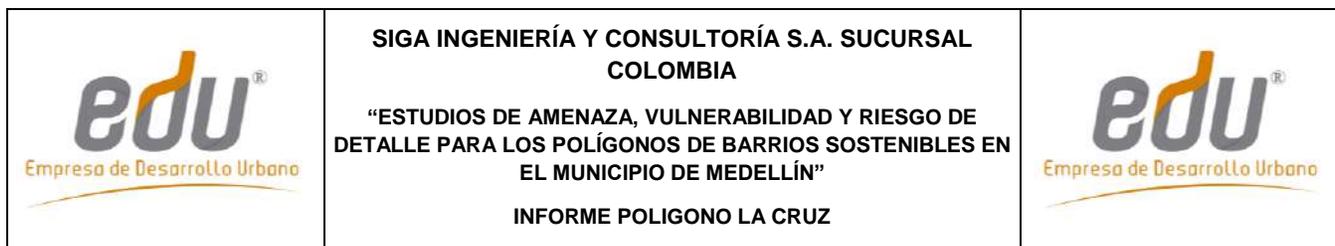


Tabla 75. Inventario de las estructuras en alto riesgo no mitigable por movimientos en masa en el Polígono La Cruz

Estructura	COBAMA	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura
203	311018	Residencial	Mampostería	<2 m	Muy mala	Dos pisos
205	311018	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
206		Residencial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso
209	311015	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
210	311018	Residencial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso
211	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
212		Residencial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso
213	311018	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Dos pisos
223	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
224	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
225	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
226	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
227	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
228	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
229	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
243	311007	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
244	311007	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
250	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
251	311012	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
254	311018	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
255	311015	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
256	311015	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
257	311013	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
263	311014	Residencial	Mampostería	<2 m	Mala	Un piso
266		Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
267		Residencial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso

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 La Cruz 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 135.

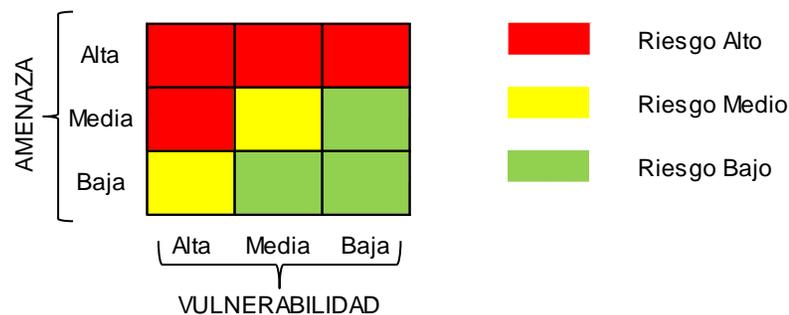
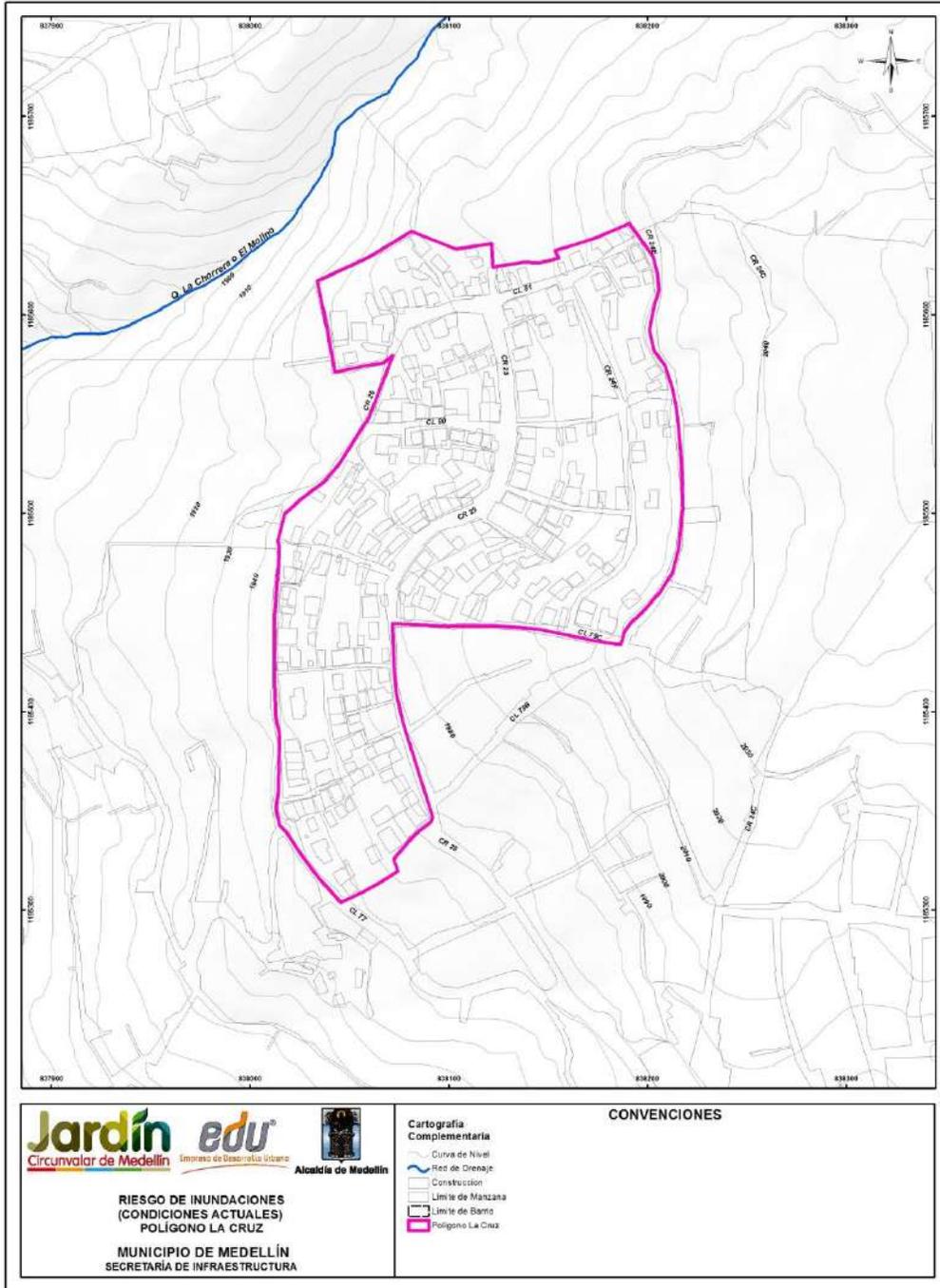


Figura 135. Clasificación del riesgo para inundaciones y avenidas torrenciales según el grado de amenaza y de vulnerabilidad

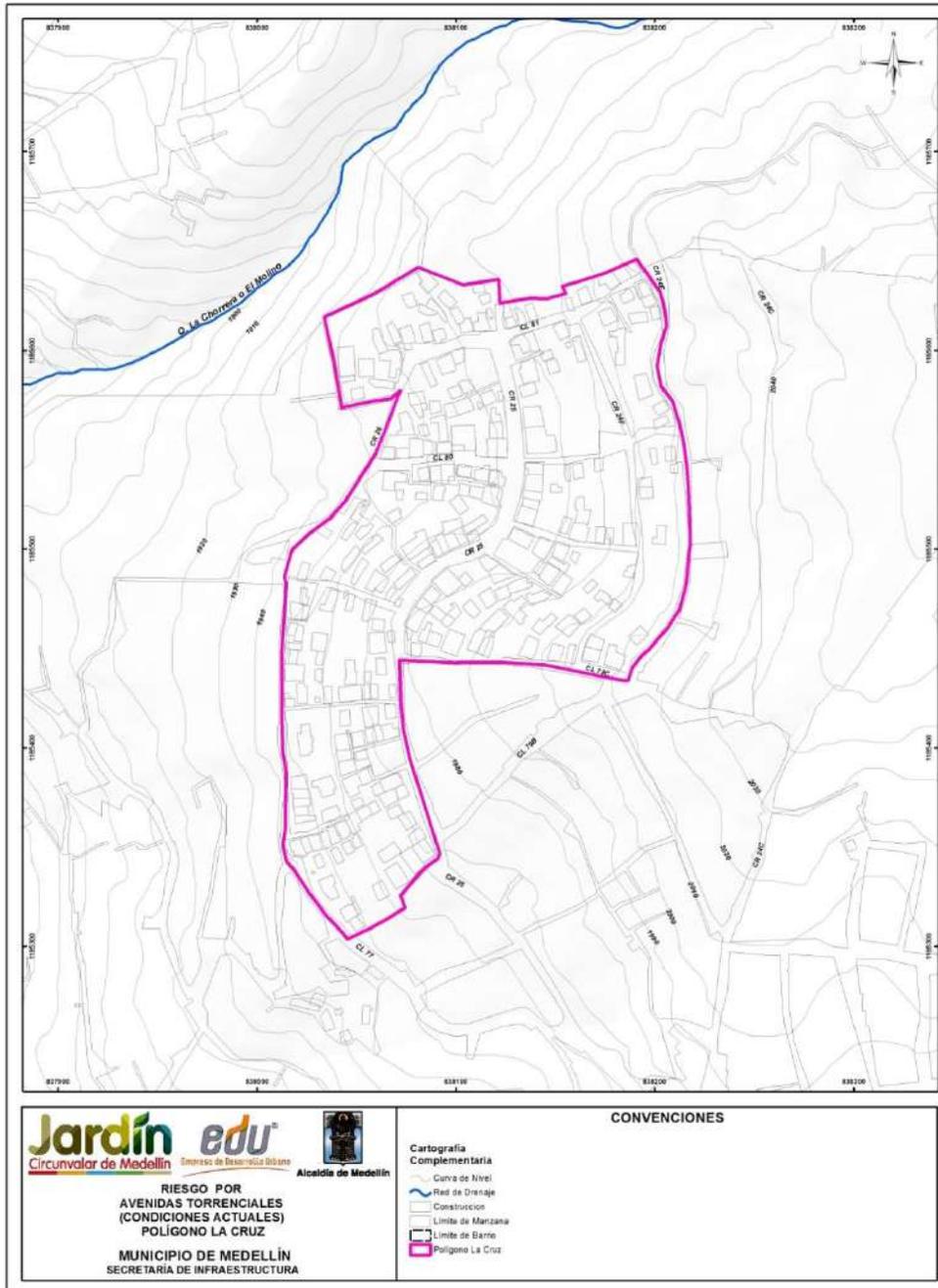
18.2 RESULTADOS

Luego de aplicar la metodología para la clasificación del nivel del riesgo ante fenómenos de inundación y avenidas torrenciales, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Mapa 66 y el Mapa 67, respectivamente. Debido a que la evaluación de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales no muestra afectación dentro del Polígono La Cruz tampoco se presenta riesgo por estos fenómenos (por tanto los mapas no presentan zonas con riesgo asignado).

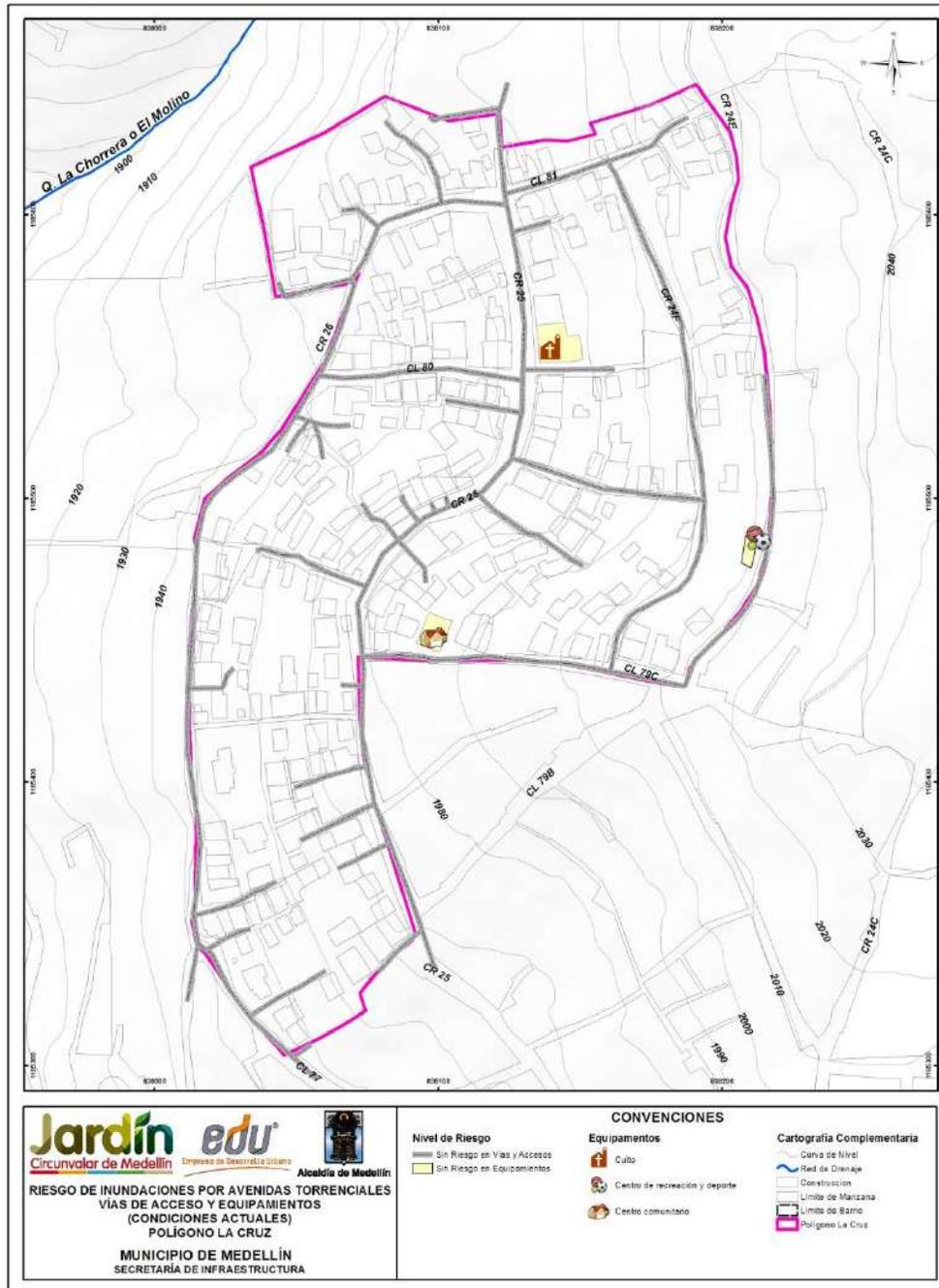
De igual manera, en el Mapa 68 se puede observar el nivel de riesgo para las vías de acceso y equipamiento. En este caso, no existe una amenaza por avenidas torrenciales por ende no se presentara un riesgo ante este evento. No se presenta mapas relacionados a inundaciones (aguas claras), ya que el caso crítico está relacionado a un posible evento de avenidas torrenciales.



Mapa 66. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para viviendas y construcciones (47_LCHRiesgoInundaciones_Medellin_C y 47_LCHRiesgoInundaciones_Medellin_T)



Mapa 67. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para viviendas y construcciones
(49_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_C y 49_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_Medellin_T)



Mapa 68. Riesgo por avenidas torrenciales en condiciones actuales en el Polígono La Cruz para las vías de acceso y equipamientos
(54_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_C y 54_LCHRiesgoAvenidasTorrenciales_ViasEquipamientos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 La Cruz. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según información entregada por La EDU a SIGA, en los mapas de amenaza por movimientos en masa y por inundaciones. Posteriormente se hizo una valoración de la vulnerabilidad de las estructuras correspondientes a las redes y con base en estos dos aspectos se hicieron análisis sobre el riesgo al que finalmente están expuestas las redes.

19.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES

En el Polígono La Cruz se presenta cobertura parcial de redes de acueducto y de alcantarillado de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse en el Mapa 69 o en el Mapa 70.

- ✓ En relación con la red de alcantarillado, las líneas existentes se encuentran ubicadas en la Carrera 25 desde el sur hasta el norte del polígono, y en las Calles 80, Calle 79C y en otras calles intermedias drenando siempre en sentido de oriente a occidente desde la parte alta hasta la parte baja del polígono. Casi la totalidad de las líneas de alcantarillado corresponden al tipo residual, en concreto, con diámetros entre 150 mm y 200 mm.
- ✓ En relación con la red de acueducto, las líneas existentes están ubicadas principalmente sobre la Carrera 25 desde el sur hasta el norte del polígono, y en las Calles 80, 79C y la calle ubicada en el extremo norte del polígono. La totalidad de las líneas de acueducto al interior del polígono son de material policloruro de vinilo (PVC), con un diámetro de 75 mm.
- ✓ En relación con las redes de gas, este polígono no cuenta con cobertura de este tipo de redes por parte de EPM.

Con la finalidad de detectar si existen otras redes de servicios públicos diferentes a las de EPM, se superpuso el levantamiento topográfico realizado por La EDU con el mapa de las redes de EPM. Este ejercicio permitió concluir que casi todas las redes que presenta la información de topografía de La EDU corresponden a las de EPM, con excepción de algunas cámaras de inspección ubicadas en el límite occidental del polígono sobre la Carrera 26 correspondientes a red de alcantarillado.

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.

19.3 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA

En el Mapa 36 se presenta el mapa de zonificación de la amenaza considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo

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

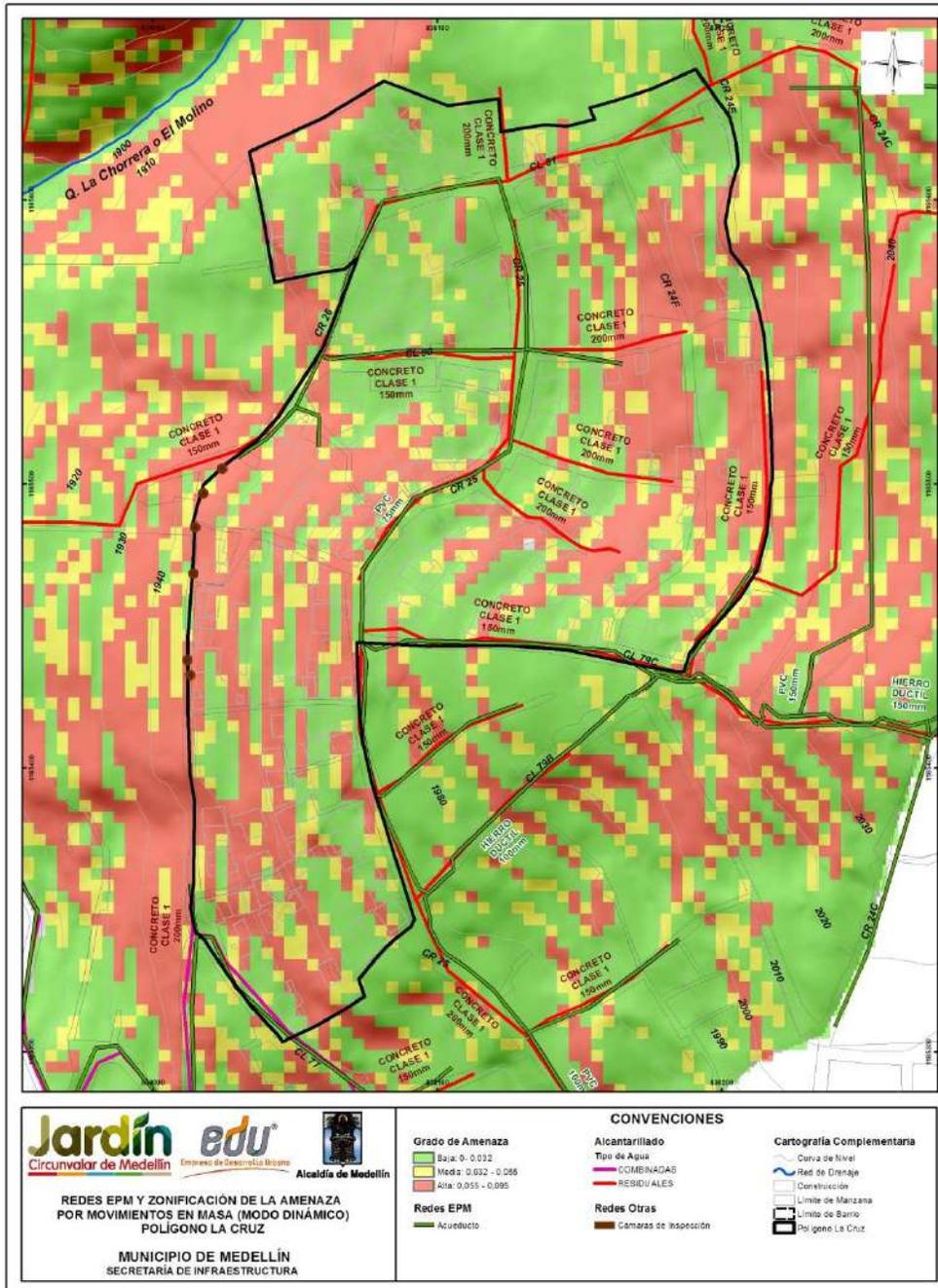
de exposición de 50 años. En la Mapa 69 se presenta este mismo mapa pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.

La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa, mostrada en el Mapa 69, permite ver diferenciadas las redes de acueducto, alcantarillado y gas de EPM y de otras redes hechas por la comunidad, sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un sismo de 0.25g. Resultan especialmente importantes de analizar los tramos de redes que se encuentran en zonas de amenaza alta, al interior del polígono como tal. En este sentido, se resaltan los tramos de redes de EPM que se localizan a lo largo de las tres escaleras pavimentadas que van hacia el costado nororiental del polígono y en el sendero destapado localizado en la parte alta del polígono, sobre la Carrera 24E. Se trata de redes de acueducto construidas con tuberías de PVC con diámetro de 75 mm y redes de alcantarillado construidas con tuberías en concreto de 150 mm.

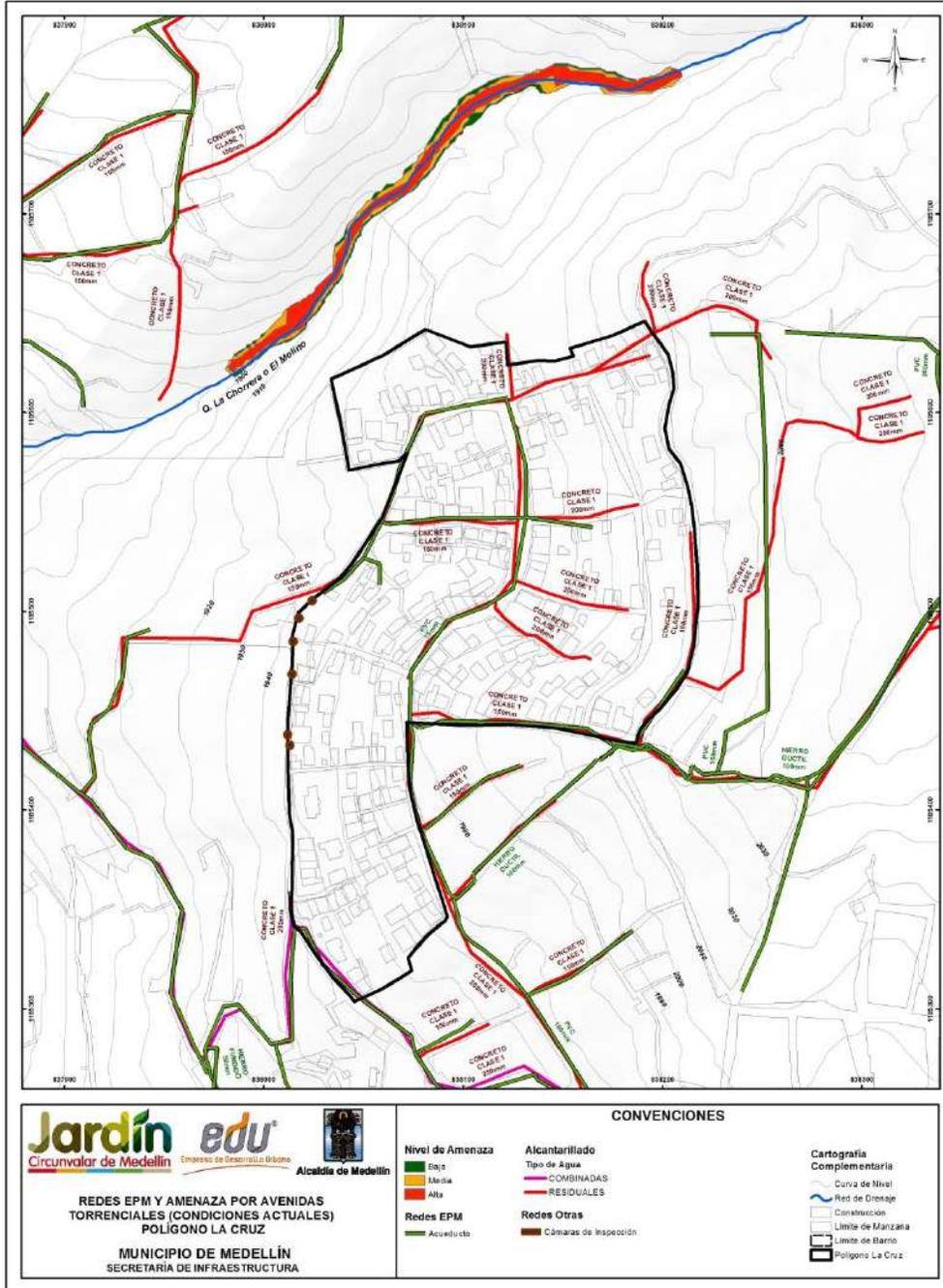
Sobre la Carrera 26, en los límites del polígono, la amenaza por movimientos en masa es también alta. En este sector se tiene igualmente un tramo de redes de EPM y seis cámaras de inspección construidas por la comunidad. Se trata de redes de acueducto construidas con tuberías de policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 75 mm y redes de alcantarillado construidas con tuberías en concreto de 150 mm y 200 mm

En el Mapa 30 y el Mapa 73 se presentan los mapas de amenaza por inundaciones para el Polígono La Cruz. En el Mapa 39 y el Mapa 77 se presentan los mapas de amenaza por avenidas torrenciales para este mismo polígono. En el Mapa 70 se presenta este mismo mapa de amenaza por avenidas torrenciales pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes. Sólo se presenta la superposición sobre el mapa de avenidas torrenciales dado que éste es más desfavorable que el de amenaza por inundaciones (éste último cubre completamente las zonas afectadas por inundaciones), y las zonas de amenaza por torrencialidad no alcanzan a intersectar las redes al interior del Polígono La Cruz, quedando así cubierto el análisis por inundaciones.

La superposición efectuada sobre los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales, mostrada en el Mapa 70, permite concluir que el 100% de las redes de servicios públicos existentes al interior del Polígono La Cruz se encuentran por fuera de las zonas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.



Mapa 69. 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 (LCHRedesEPMYAm amenazaMovimientos en Masa_Medellin_C)



Mapa 70. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por avenidas torrenciales. Condiciones actuales.
(LCHRedesEPMAvenidaTorrencial_Medellin_C

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

19.4 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 para el acueducto en policloruro de vinilo (PVC). Algunas características de estas tuberías son mostradas a continuación, en los Numerales 19.4.1 a 19.4.2. En el Numeral 19.4.3 se cita específicamente la vulnerabilidad de estas redes según las características de los materiales con los cuales están conformadas.

19.4.1 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 del tipo 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.

19.4.2 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.

19.4.3 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.

19.5 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad de las redes de servicios públicos, como se explicó en el numeral anterior, se concluye que el riesgo en el cual se encuentran las redes ubicadas justo en las zonas de amenaza alta por deslizamiento es también alto. Se resalta el hecho de que todas las redes de servicios públicos que actualmente se encuentran en riesgo alto ante fenómenos de movimientos en masa se encuentran en áreas de riesgo no mitigable según el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín (POT, 2014). Se recomienda entonces que se evalúe en conjunto con E.P.M. la

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

situación de riesgo de las redes en estos tramos para que se hagan los correctivos del caso.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones y avenidas torrenciales al interior del Polígono La Cruz, en los apartados anteriores se concluyó que el 100% 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 y avenidas torrenciales.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 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 zonificó el Polígono La Cruz en tres zonas, considerando las áreas potenciales de inestabilidad (Figura 136).

El análisis de riesgo efectuado por movimientos en masa, dio lugar a un número importante de estructuras con riesgo alto en la Zona 1, aproximadamente el 60%. Las estructuras se encuentran principalmente amenazadas por estar inmersas en áreas inestables y por impactos de movimientos en masa de las partes altas ubicadas fuera del polígono. La vulnerabilidad de las estructuras es el factor que predomina cuando las mismas se encuentran en zonas de amenaza alta e incluso media al deslizamiento.

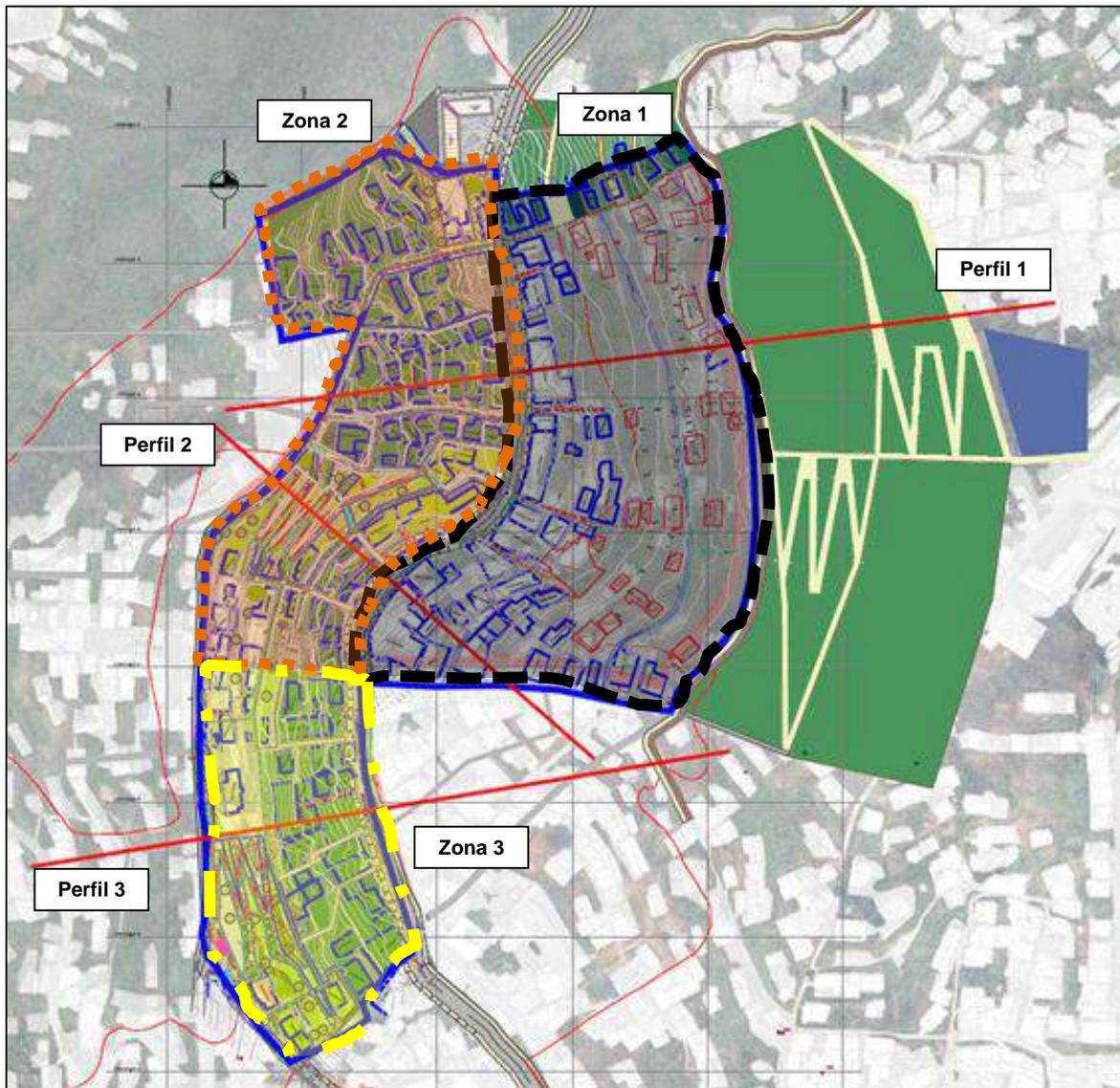


Figura 136. Esquema de localización en planta de los Perfiles analizados incluyendo implantación del Proyecto Barrios Sostenibles

La problemática principal de la Zona 2 y la Zona 3 radica en la vulnerabilidad asociada a las casas que se encuentran inmersas en masas potencialmente inestables o cerca de zonas inestables con probabilidad de falla media y alta. En las Zonas 2 y 3 aproximadamente el 19%, de las viviendas se encuentran en alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa. El mapa del análisis del riesgo de las estructuras por movimientos en masa fue presentado en el Numeral 17.3 (Mapa 65).

Así las cosas, se procedió a la ejecución de análisis de estabilidad en las Zonas 1, 2 y 3, a través de las secciones transversales que consideraran la localización de focos de inestabilidad y en el sentido de la trayectoria principal de estos. La localización en planta de los Perfiles 1 a 3 que fueron los analizados se muestra en la Figura 136.

Los perfiles mencionados fueron analizados en condiciones actuales y teniendo en cuenta la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo, obteniéndose los resultados de la Figura 137 a la Figura 145. El valor de probabilidad de falla incluida en cada figura hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años. Se observa que los resultados obtenidos efectivamente ratifican a los focos como puntos probables de inestabilidad, pudiéndose hacer los comentarios que se presentan más adelante en este mismo numeral.

En la Figura 137 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad en estado actual del Perfil 1, representativo de la Zona 1 del Polígono La Cruz. En la Figura 138 se presenta el análisis de estabilidad considerando como solución una reconfiguración del terreno. Finalmente, en la Figura 139 se presenta la geometría de la solución propuesta, en la cual se incluye una reconfiguración y una pantalla de pilas. En esta solución se implementan taludes con inclinaciones aproximadas de 2.0H:1.0V, con una berma intermedia de 4 m de ancho, acompañados de una pantalla de pilas en la parte baja de la reconfiguración con un diámetro de 1.5 m, separación de 3 m y profundidad mínima de 20 m. El talud de corte inferior tendría una altura aproximada de 35 m, mientras que el talud superior tendría una altura estimada de 25 m.

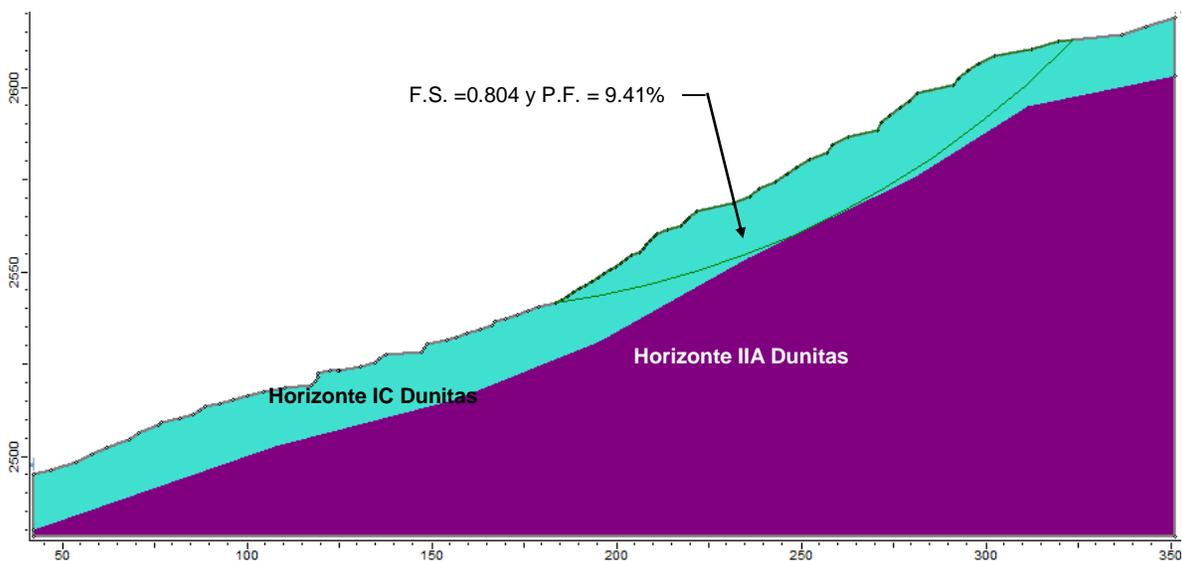


Figura 137. Análisis de estabilidad del Perfil 1 en condiciones naturales

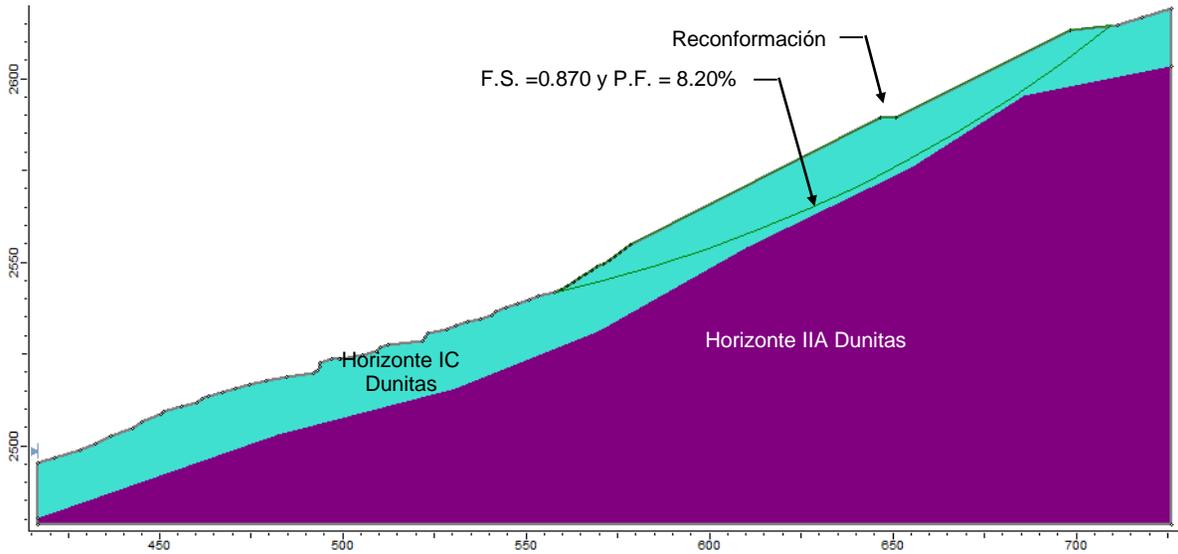


Figura 138. Análisis de estabilidad del Perfil 1 implementando solución con reconfiguración

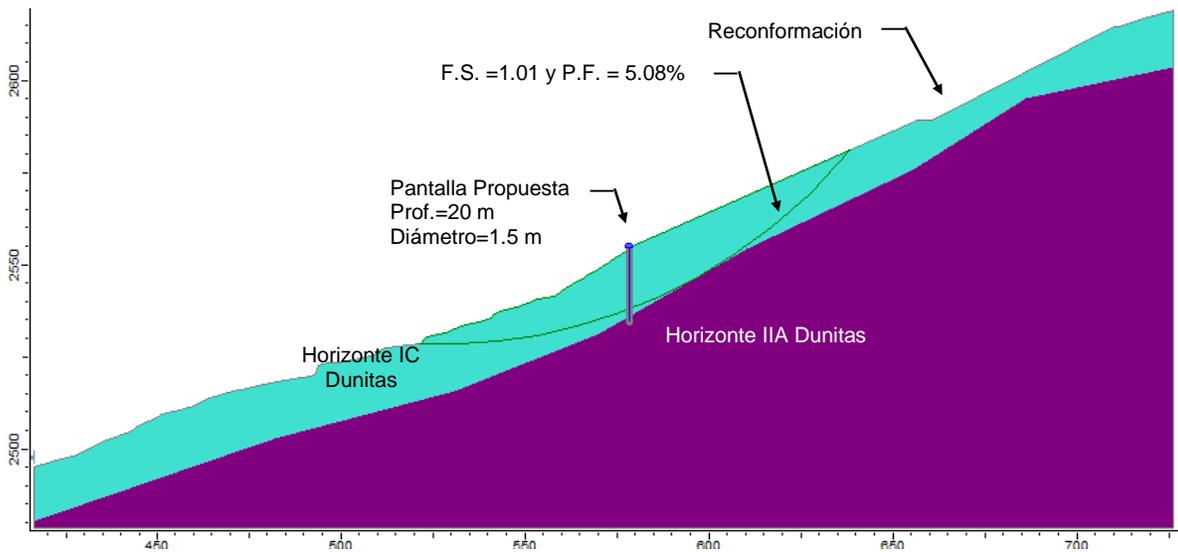


Figura 139. Análisis de estabilidad del Perfil 1 implementando solución con reconfiguración y una pantalla de pilas

Como se observa de la Figura 137 a la Figura 139, la probabilidad de falla $PF_{50\text{años}}$ disminuye del 9.4% al 5.1% para la zona analizada, pasando de una amenaza alta a una amenaza media. Se observa también como la solución implementando sólo la reconfiguración no permite disminuir el nivel de amenaza de alto a medio, considerando que la probabilidad de falla a 50 años para tal alternativa es de 8.20%.

	<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 POLIGONO LA CRUZ</p>	
---	---	---

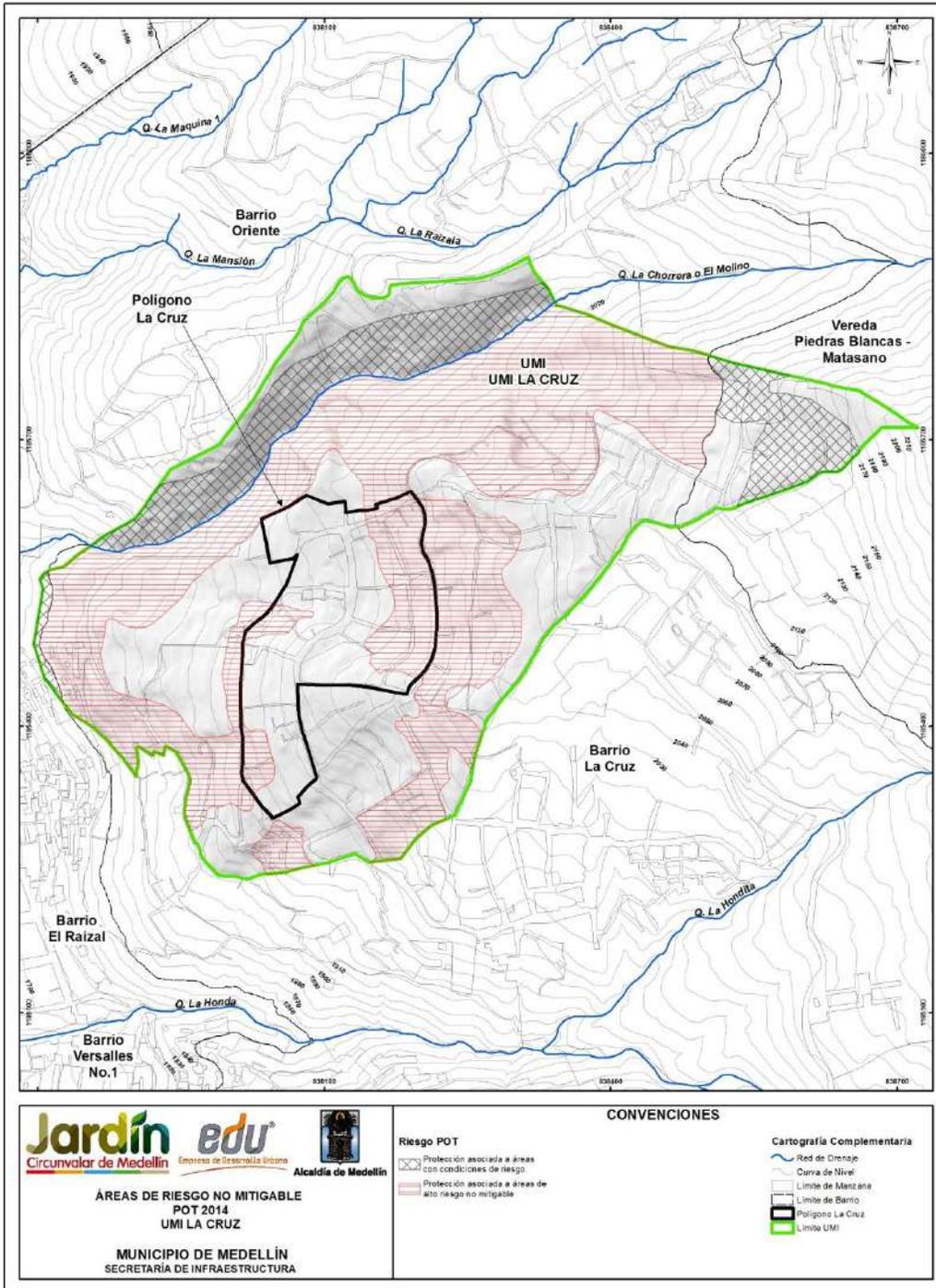
Los resultados indican que, si se aceptan como críticos los niveles de riesgo de este estudio, es necesario reubicar las estructuras que se encuentran en riesgo alto no mitigable (Mapa 65) considerando el gran costo económico y ambiental que representaría la solución con reconfiguración de terreno y pantalla de pilas, debido entre otras cosas a la complejidad constructiva y al gran volumen de tierra que debe ser movilizado. Es muy importante resaltar el hecho de que el resultado encontrado en este estudio coincide con el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín (POT, 2014), ya que éste último cataloga la parte alta de esta ladera como un área de riesgo no mitigable (Mapa 71).

En el sector norte de la Zona 1, en el que se encuentran las viviendas en alto riesgo, se tienen estructuras que presentan riesgo medio por movimientos en masa. A diferencia de las otras estructuras, el riesgo medio de estas estructuras se debió en gran medida a la resistencia estructural de las viviendas y a la altura de éstas. Esto último, porque las estructuras de mayor altura son las que mejor se comportan frente a amenazas por impacto de un movimiento en masa. En este sector se recomienda mantener dichas viviendas en riesgo medio, esto a pesar de que se ubican en zonas donde el factor de intensidad es mayor que 0.4.

Además, se recomienda que todas las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles que se construyan sean de dos pisos en adelante, que tengan cimentaciones profundas, de ser el caso que las mismas puedan ser diseñadas para soportar efectos cortantes y que se ubiquen en las zonas donde el mapa de intensidades muestran que el factor de intensidad no está en el rango más crítico (zonas de color rojo). También es primordial que se realicen análisis adicionales que les permita tomar decisiones con respecto a las excavaciones contempladas para el emplazamiento de los mismos. Para las estructuras que en el futuro queden en este sector se recomienda implementar sistemas de alerta temprana (fuera y dentro del polígono) y que se realicen campañas de sensibilización de los habitantes del polígono, que les permita organizarse en función del riesgo con el cual convivirían.

Finalmente, es importante tener en cuenta que a pesar de considerarse la reubicación de las viviendas como la alternativa más viable, se deben de todas formas implementar medidas de mitigación menores tales como cunetas, trinchos y reforestación con fines de estabilización, destinadas a la protección contra fenómenos como la erosión.

En la Figura 140 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad en estado actual del Perfil 2, representativo de la Zona 2 del Polígono La Cruz. En la Figura 141 se presenta el análisis de estabilidad considerando como solución una pantalla de pilas de mínimo 24 m de profundidad, 1.5 m de diámetro y 3 m de separación. Finalmente, en la Figura 142 se presenta la geometría de la solución propuesta, en la cual se incluyen dos pantallas de pilas de 1.5 m de diámetro, separadas cada 3 m y con profundidad mínima de 24 m para poder garantizar el empotramiento que permita soportar los empujes por pendiente y las sobrecargas de las estructuras cercanas. En los análisis se presenta adicionalmente la superficie de falla global mínima para tal configuración.



Mapa 71. Áreas de riesgo no mitigable del Polígono la Cruz, según el POT (2014) (LCHAreasRiesgoNoMitigablePOT_Medellin_C)

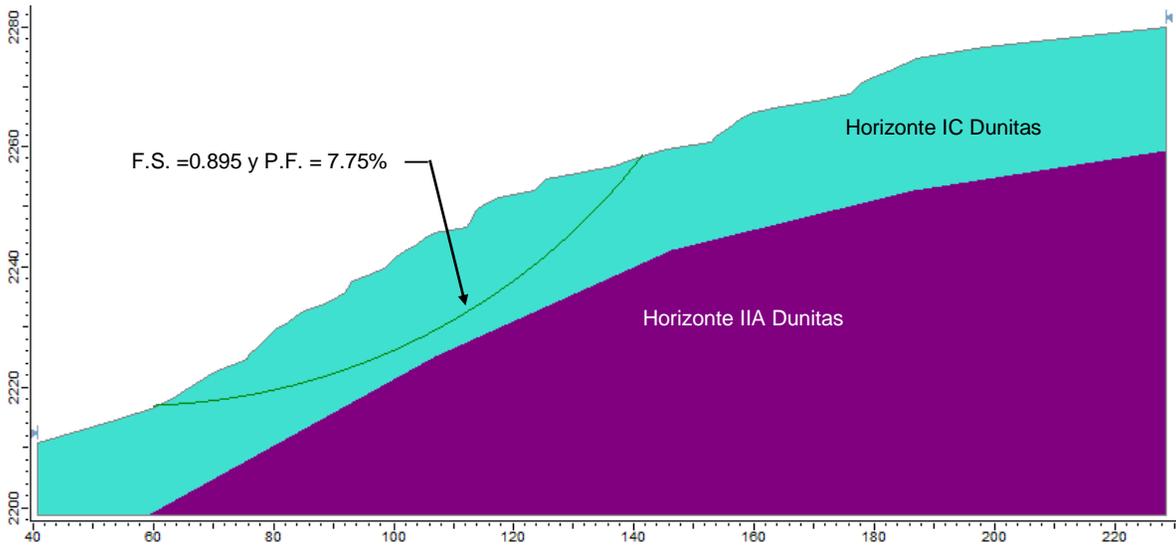


Figura 140. Análisis de estabilidad del Perfil 2 en condiciones naturales

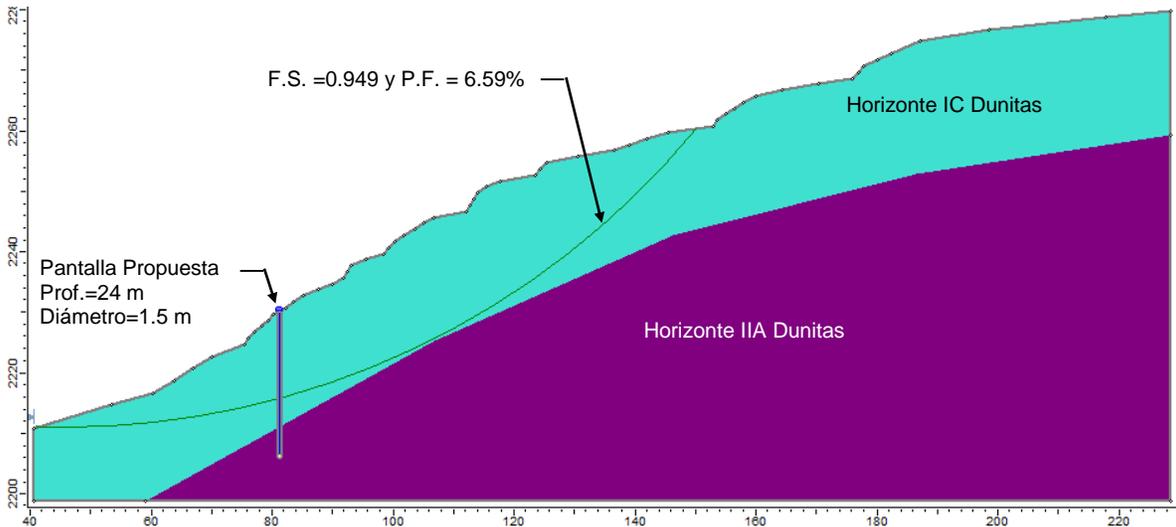


Figura 141. Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución con una pantalla de pilas

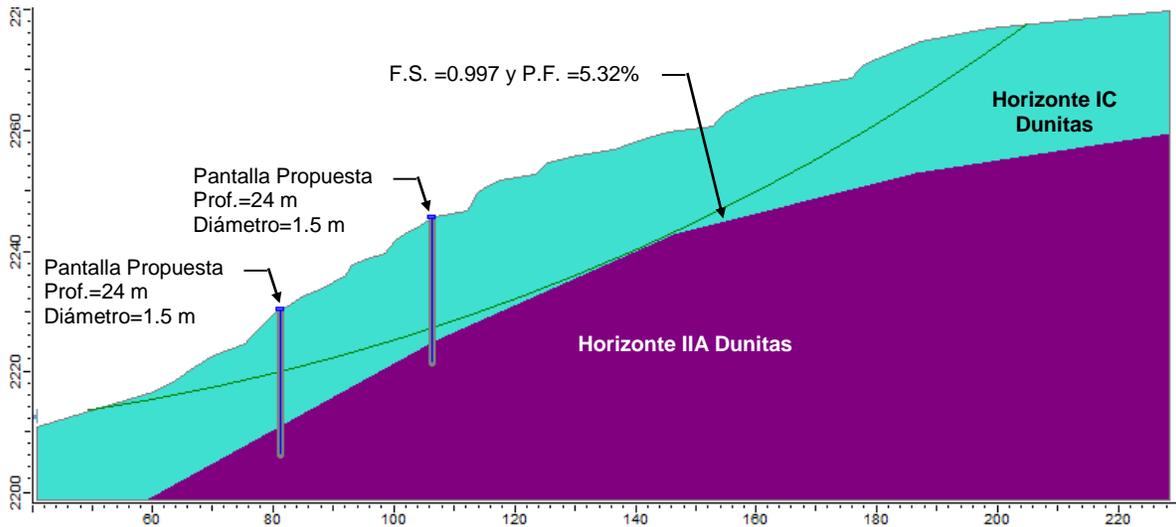


Figura 142. Análisis de estabilidad del Perfil 2 implementando solución con dos pantallas de pilas

Como se observa de la Figura 140 a la Figura 142, la probabilidad de falla $PF_{50\text{años}}$ disminuye del 7.8% al 5.3% para la zona analizada, pasando de una amenaza alta a una amenaza media. Se observa también como la solución implementando sólo una pantalla de pilas no se logran obtener valores del factor de seguridad y de la probabilidad de falla adecuados, por lo menos en el rango de riesgo medio, considerando que la probabilidad de falla a 50 años para tal alternativa es de 6.6%.

En el caso de las estructuras en riesgo alto no mitigable del costado norte de la Zona 2, se establece que la mejor opción es la reubicación de las viviendas, según lo expuesto anteriormente sobre la solución de la Zona 1, ya que en este sector se presenta afectación de las viviendas por el impacto de un movimiento en masa ocurrido en la parte alta de la Zona 1. En el caso de las estructuras del costado sur de la Zona 2, también se establece que la mejor opción es la reubicación de las viviendas. Esto por cuanto el costo de las pantallas de contención vs. el de reubicación de las viviendas es más alto. Es importante resaltar el hecho de que el resultado encontrado en este estudio para el costado sur de la Zona 2 en parte coincide con el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín (POT, 2014), ya que éste último cataloga un área de este sector como de riesgo no mitigable (Mapa 71).

Es importante considerar además que a pesar de considerarse a la reubicación de las viviendas como la alternativa viable, se deben de todas formas implementar medidas de mitigación menores tales como cunetas, trinchos y reforestación con fines de estabilización, destinadas a la protección contra fenómenos como la erosión.

Las demás estructuras en alto riesgo podrán ser sujetas a evaluaciones de repotenciación dado que se trata de estructuras cuya principal problemática radica en su vulnerabilidad estructural.

Finalmente, considerando que los planos arquitectónicos del Proyecto Barrios Sostenibles muestran la necesidad de realizar cortes en esta zona de riesgo alto para la construcción del proyecto, es necesario que éstos sean analizados a la luz de las condiciones de amenaza del proyecto.

En la Figura 143 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad en estado actual del Perfil 3, representativo de la Zona 3 del Polígono La Cruz. En la Figura 144 se presenta el análisis de estabilidad considerando como solución una pantalla de pilas con un diámetro de 2.0 m, separadas cada 4 m y con una profundidad mínima de 16 m. Finalmente, en la Figura 145 se presenta de la solución propuesta, en la cual se incluye dos pantallas de pilas de 1.5 m de diámetro, separadas cada 3 m y con profundidad mínima de 15 m. En los análisis se presenta adicionalmente la superficie de falla global mínima para tal configuración.

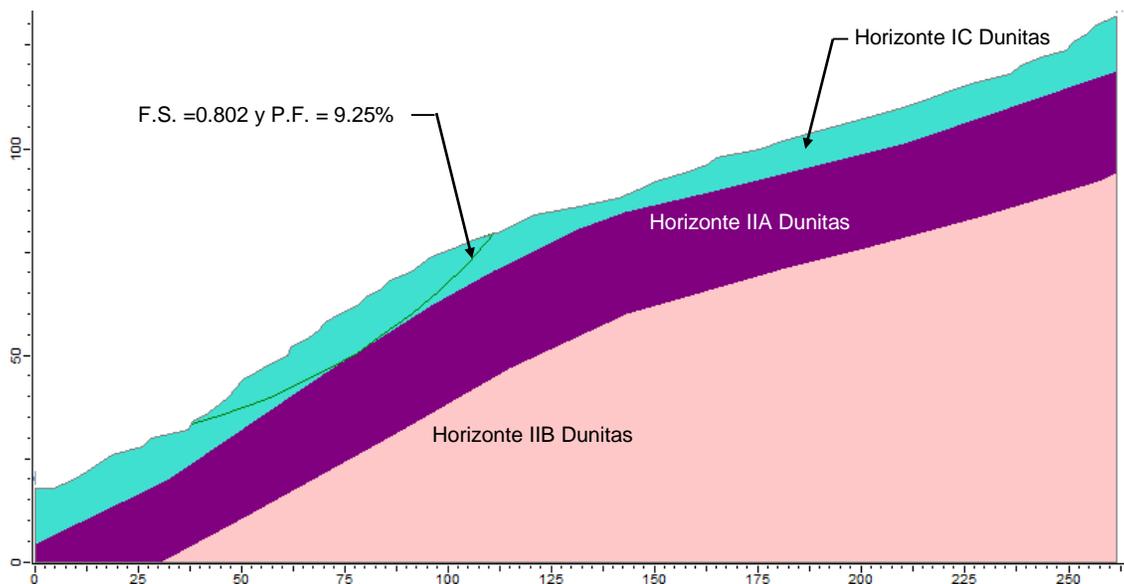


Figura 143. Análisis de estabilidad del Perfil 3 en condiciones naturales

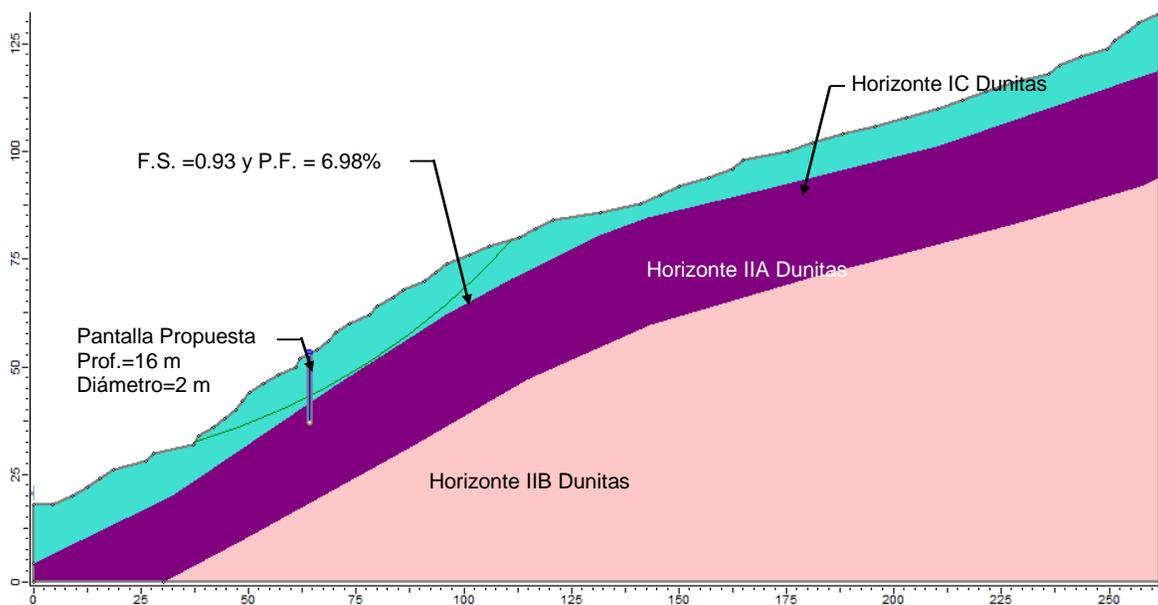


Figura 144. Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución con una pantalla de pilas

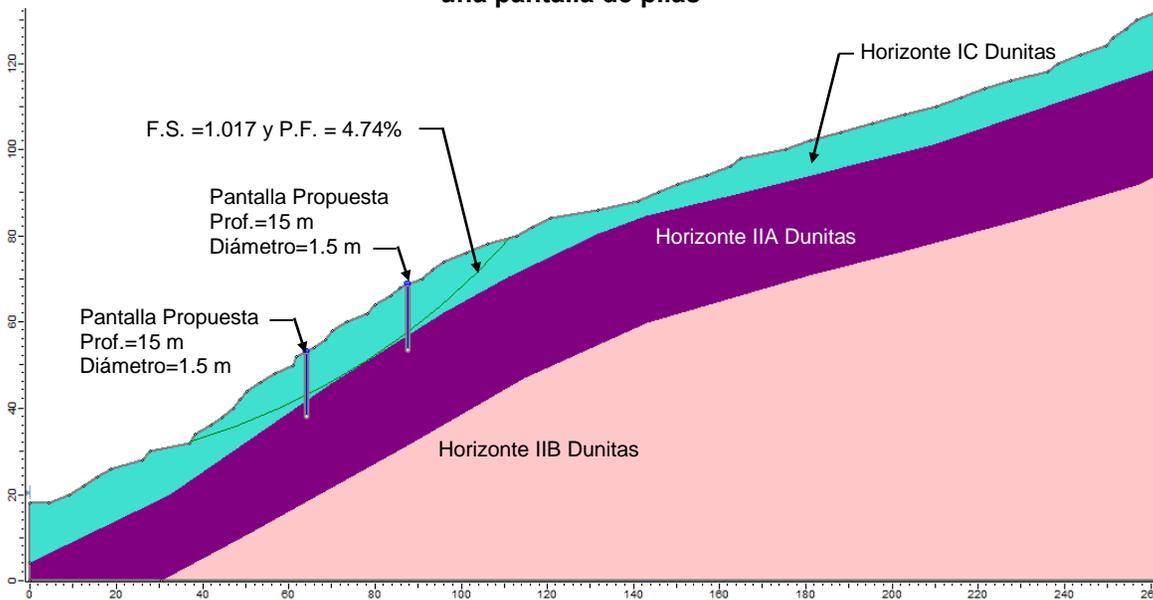


Figura 145. Análisis de estabilidad del Perfil 3 implementando solución con dos pantallas de pilas

En la Zona 3, el sector más crítico se encuentra en el costado suroccidental de la zona. El análisis de estabilidad efectuado en este sector da lugar a superficies de falla con probabilidad de falla dentro del rango considerado como más crítico en este estudio. Los

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

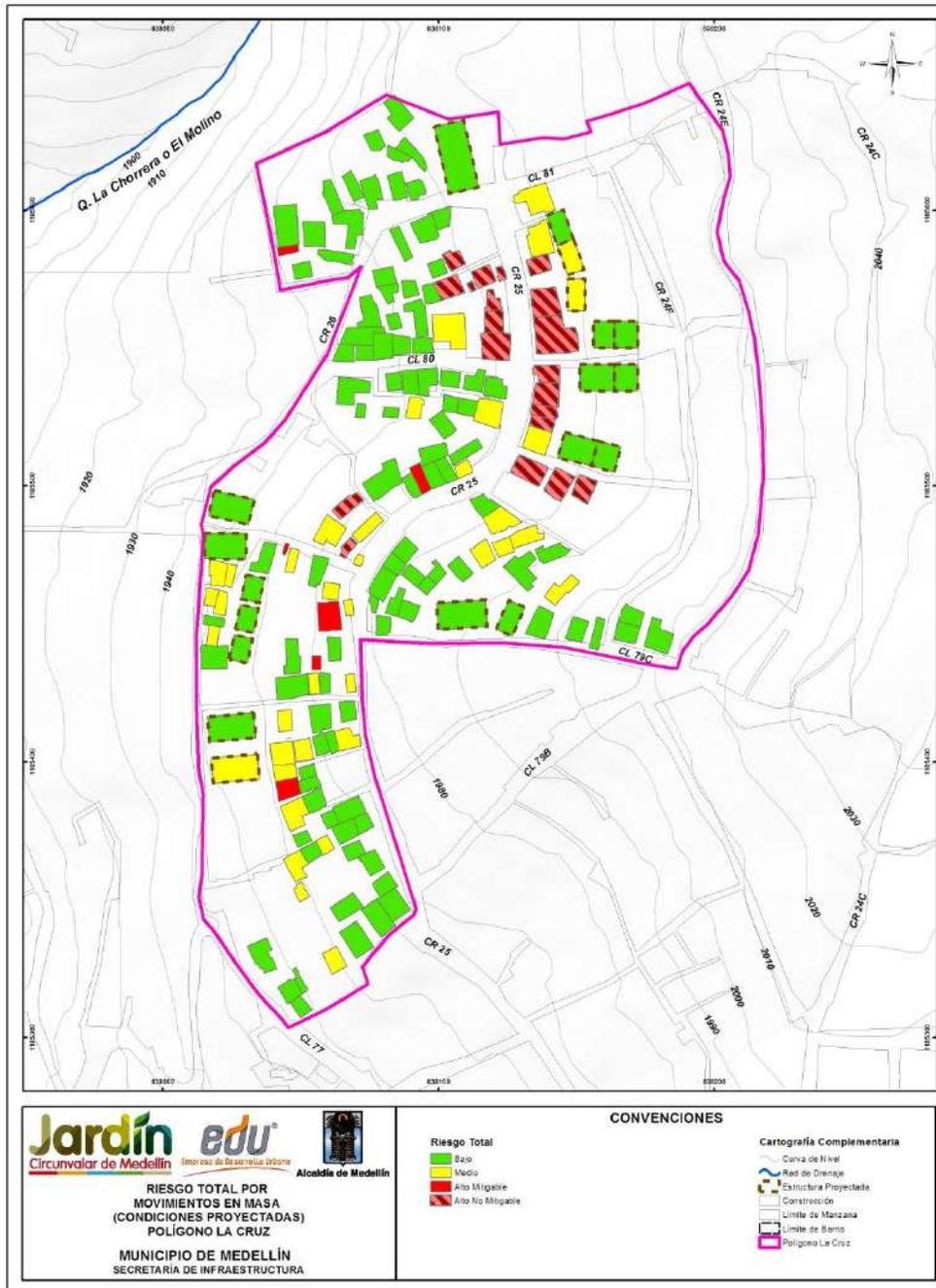
análisis de estabilidad presentados de la Figura 143 a la Figura 145 permiten determinar que para llevar la probabilidad de falla de 9.2% a 4.74%, un valor más bajo del que se tiene en condiciones sin intervención y que clasificaría en el rango de amenaza media, se deben implementar como mínimo dos pantallas de contención. Se observa como la solución implementando sólo una pantalla de contención no permite disminuir el nivel de amenaza de alto a medio, considerando que la probabilidad de falla a 50 años para tal alternativa es de 7.0%.

Por lo anterior y además, considerando que este sector está catalogado como un área de riesgo no mitigable por el POT como se muestra en la (Mapa 71) (lo cual coincide con lo encontrado por este estudio), la mejor alternativa en esta zona es la reubicación de las viviendas. Las demás estructuras de la zona que presenten riesgo alto mitigable deben ser sujetas a evaluaciones de repotenciación como medida de mitigación dado que se trata de estructuras cuya principal problemática radica en su vulnerabilidad estructural.

Es importante considerar además que a pesar de considerarse a la reubicación de las viviendas como la alternativa viable, se deben de todas formas implementar medidas de mitigación menores tales como cunetas, trinchos y reforestación con fines de estabilización, destinadas a la protección contra fenómenos como la erosión.

Además, se recomienda que las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles que se construyan sean de dos pisos en adelante, que tengan cimentaciones profundas, de ser el caso que las mismas puedan ser diseñadas para soportar efectos cortantes y que se ubiquen en las zonas donde el mapa de intensidades muestran que el factor de intensidad no está en el rango más crítico (zonas de color rojo). También es primordial que se realicen análisis adicionales que les permita tomar decisiones con respecto a las excavaciones contempladas para el emplazamiento de los mismos.

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 72.

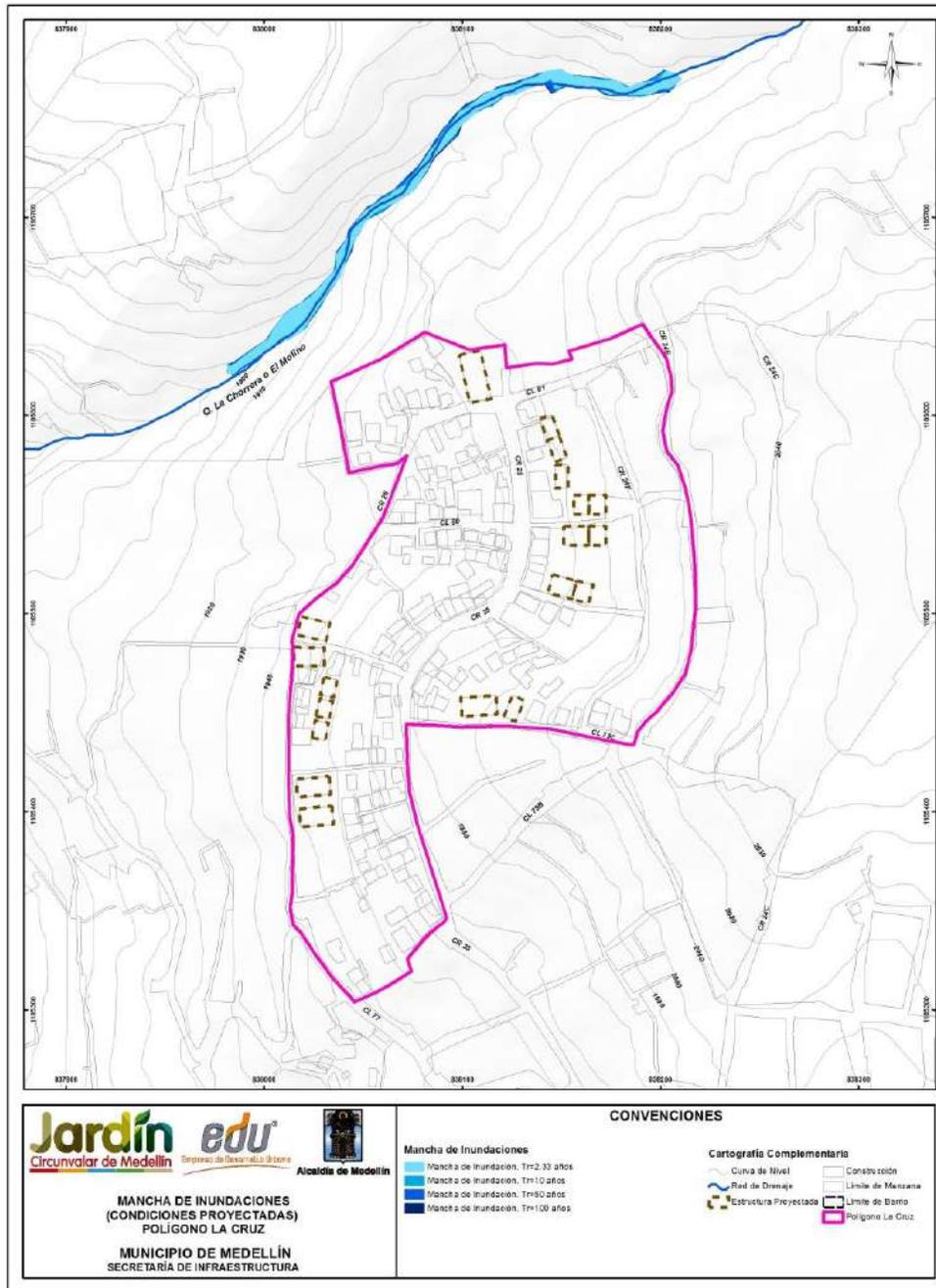


Mapa 72. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz
(46_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_C y 46_LCHRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T)

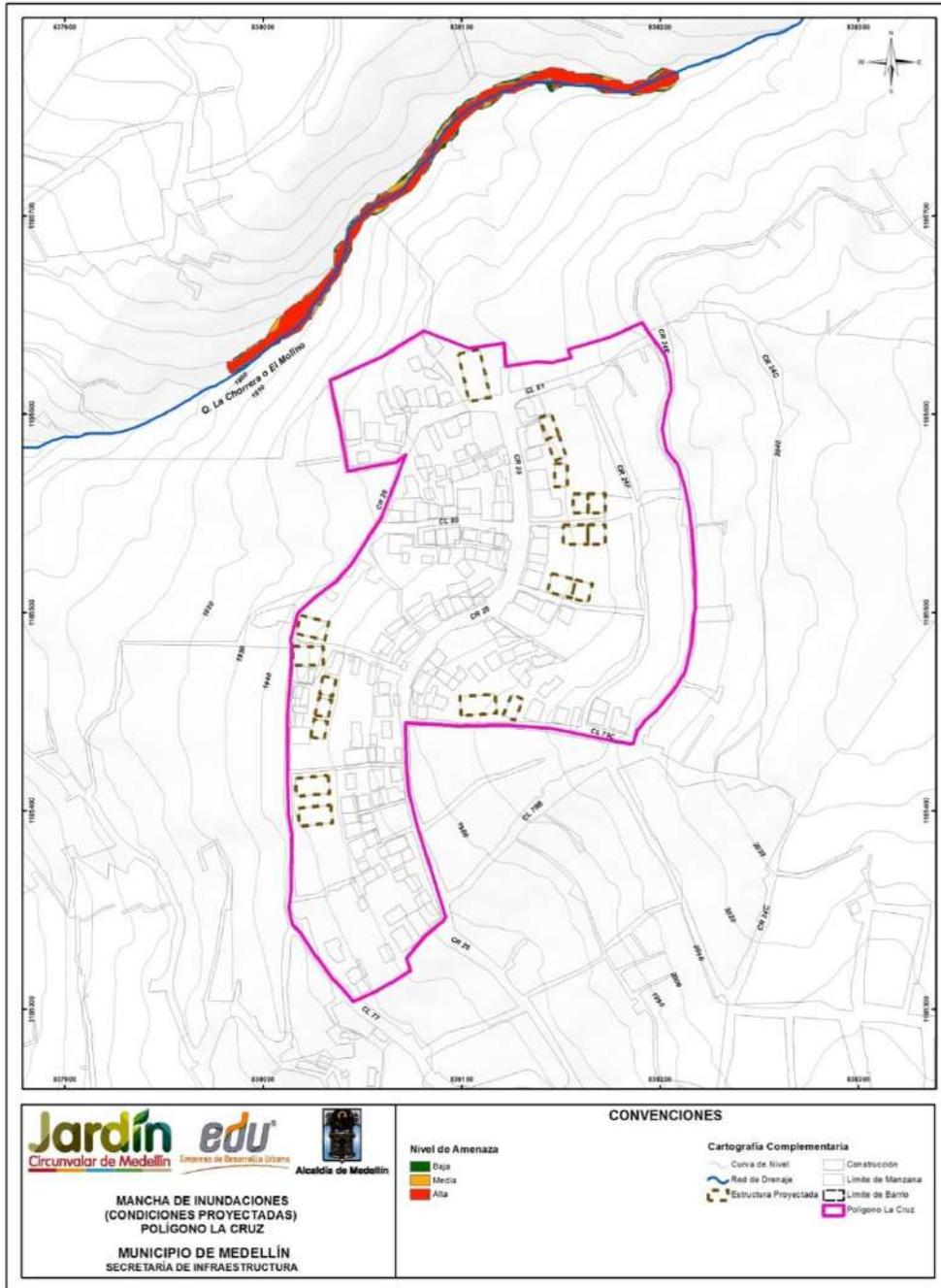
	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p style="text-align: center;">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p style="text-align: center;">INFORME POLIGONO LA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

20.2 OBRAS PARA INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

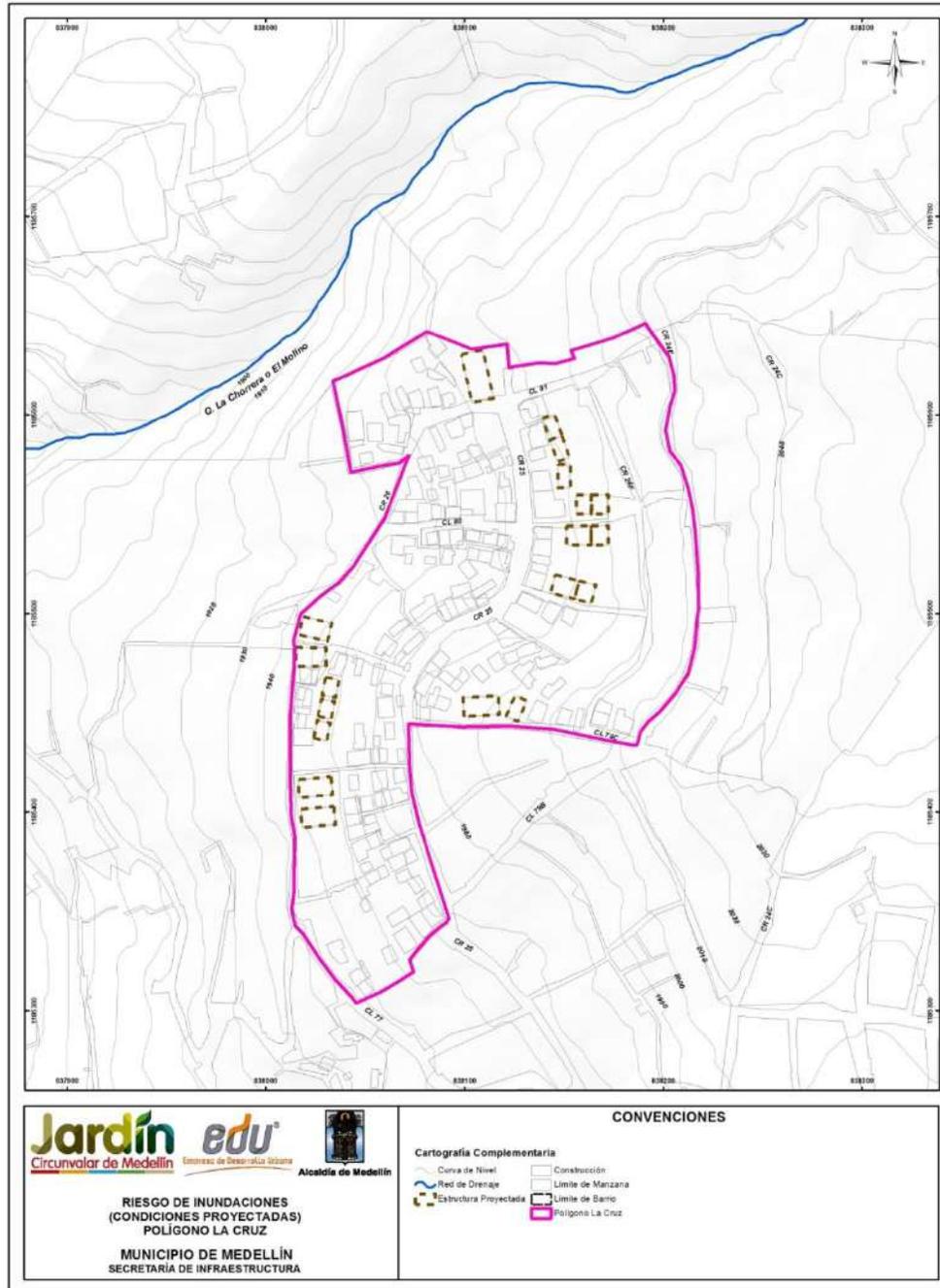
Debido a que los límites de afectación de la Quebrada La Loca (única y principal corriente natural cerca del polígono de estudio), se encuentran por fuera del polígono y por ende no hay ni viviendas ni estructuras que puedan ser afectadas por fenómenos de inundación y avenidas torrenciales, no se requieren obras de mitigación ya que no existe ningún riesgo que afecte al polígono, lo anterior se puede observar en el Mapa 73, el Mapa 74, el Mapa 75, el Mapa 76, el Mapa 77 y el Mapa 78. En el Mapa 79 se muestra el retiro a la quebrada planteado por el POT (2014) y el retiro hidrológico en condición proyectada obtenido del presente estudio, aclarando, que la extensión de la mancha está asociada al caso más crítico, es decir, inundación por avenidas torrenciales.



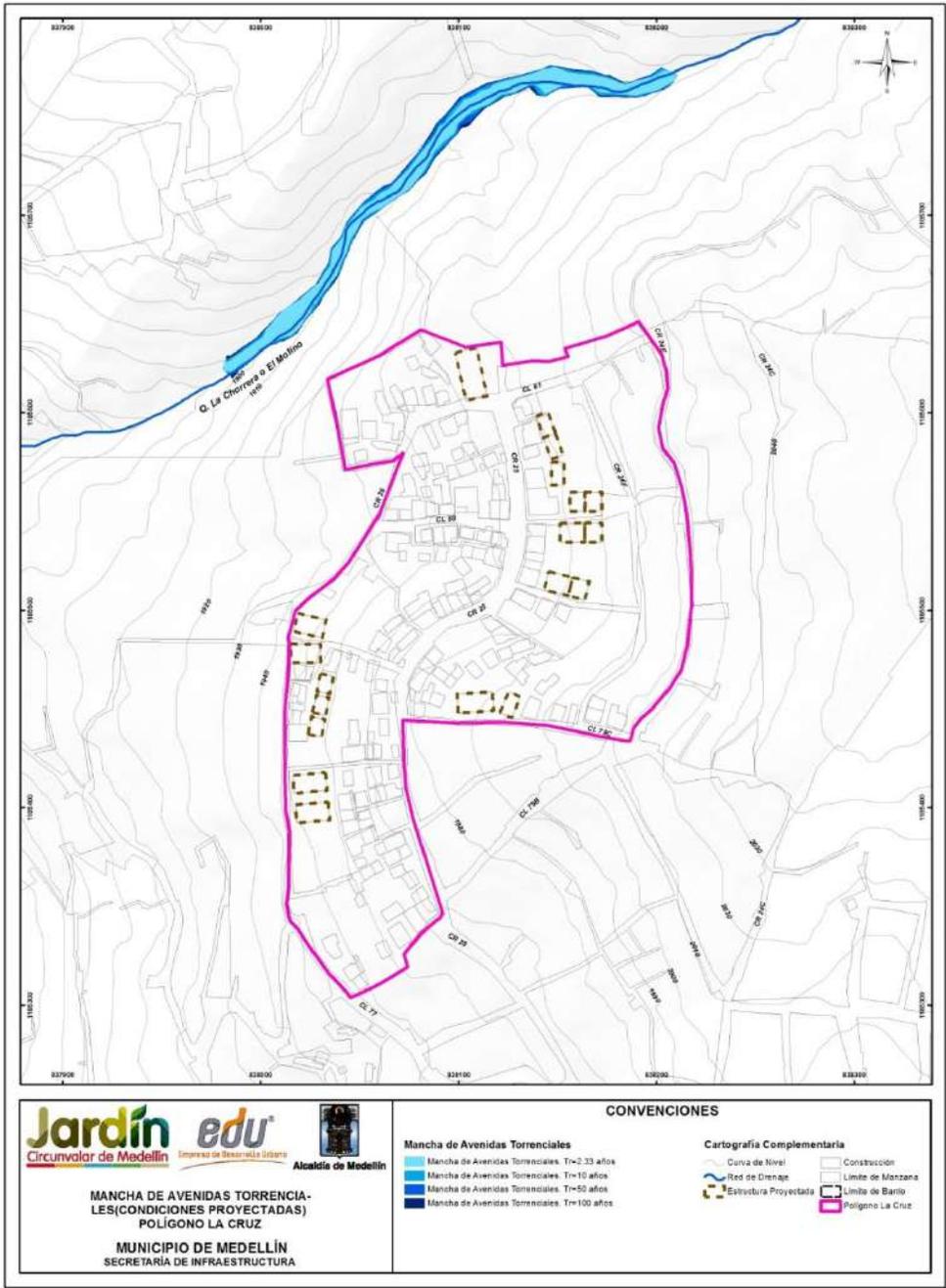
Mapa 73. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz
(22_LCHManchalInundacionesCondProyecto_Medellin_C y
22_LCHManchalInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



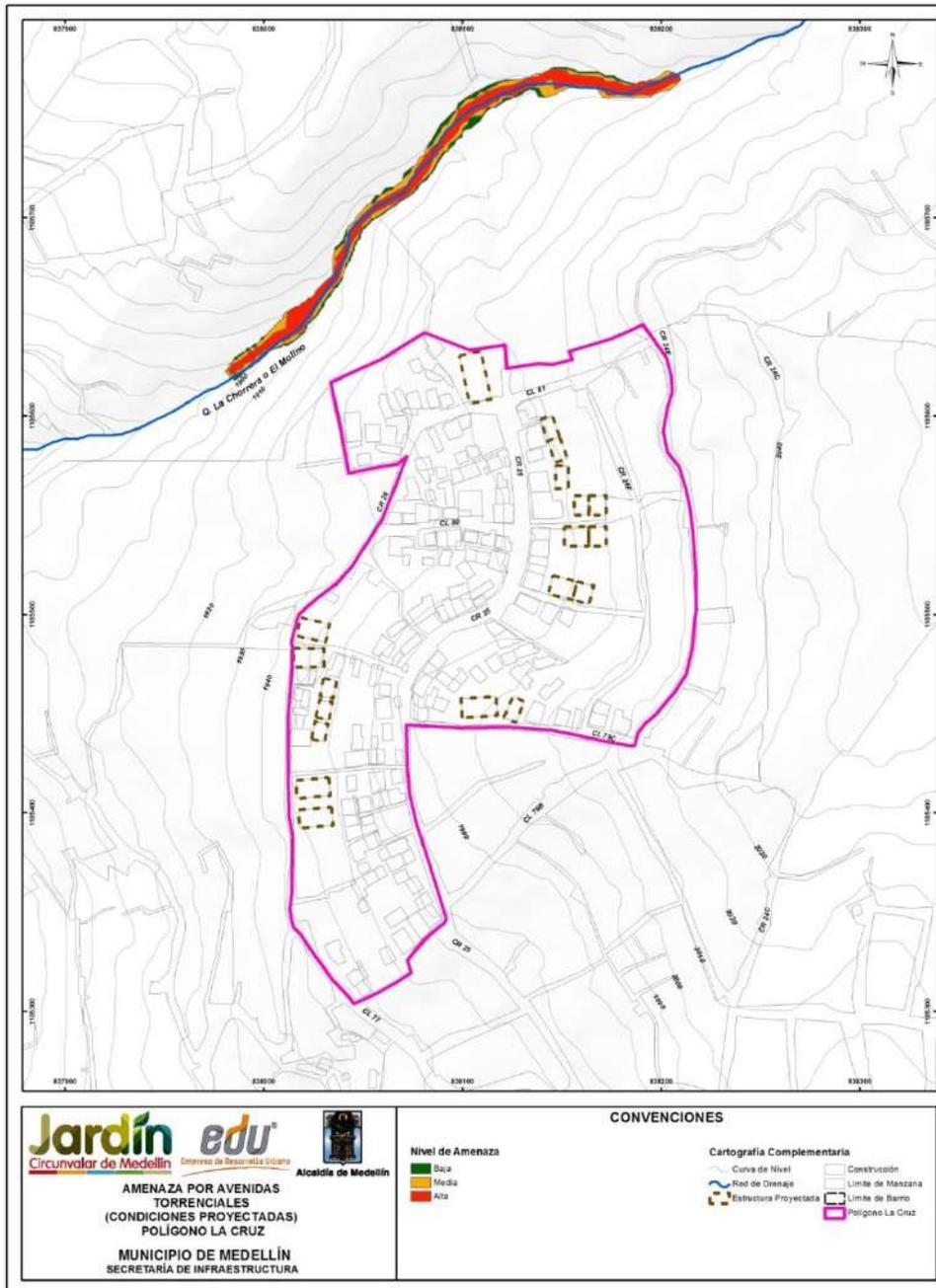
Mapa 74. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en la Quebrada La Chorrera o El Molino. Polígonos La Cruz (26_LCHAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_C y 26_LCHAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



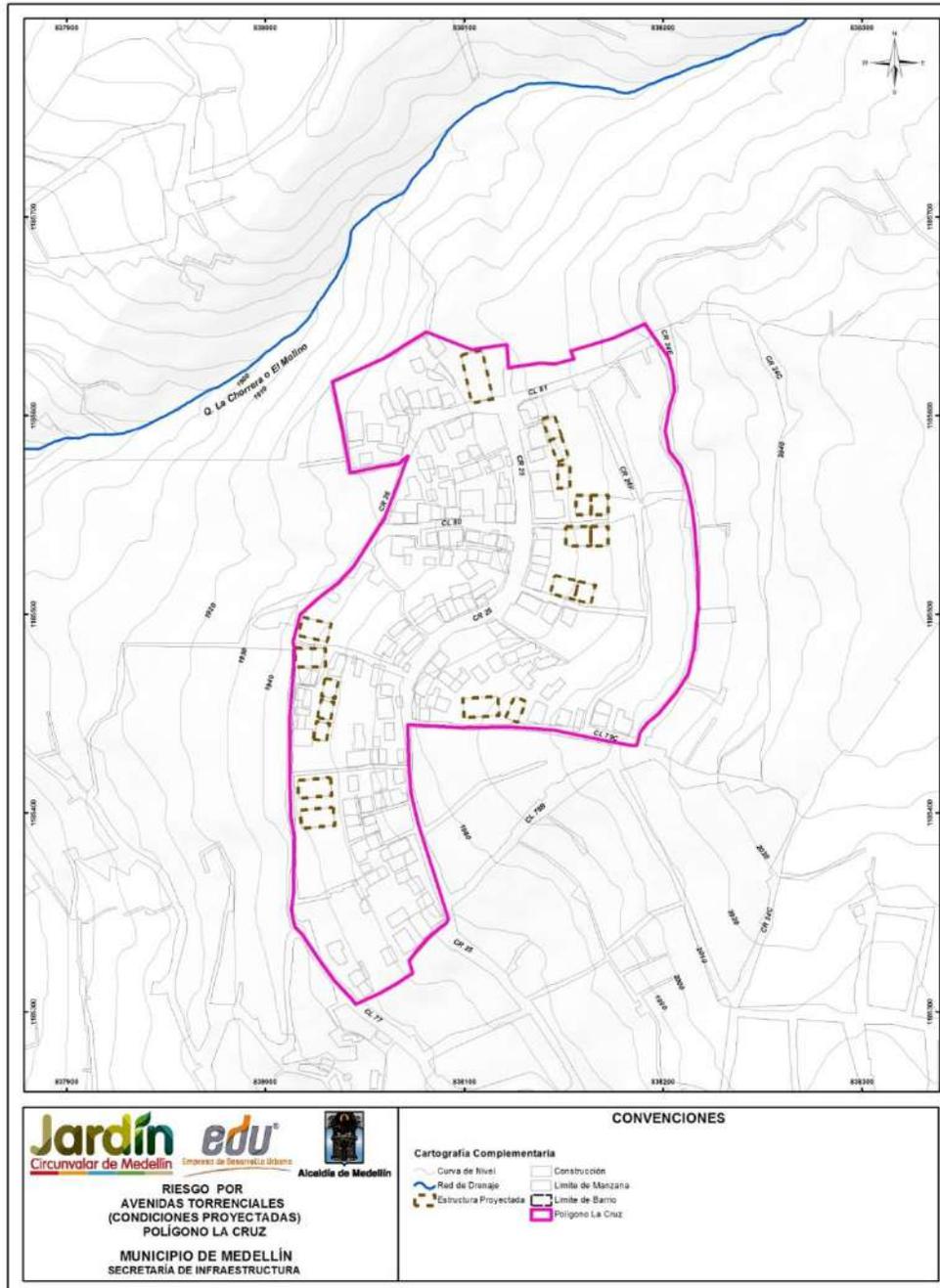
Mapa 75. Análisis de riesgo por inundaciones para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz
(48_LCHRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_C y
48_LCHRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_T)



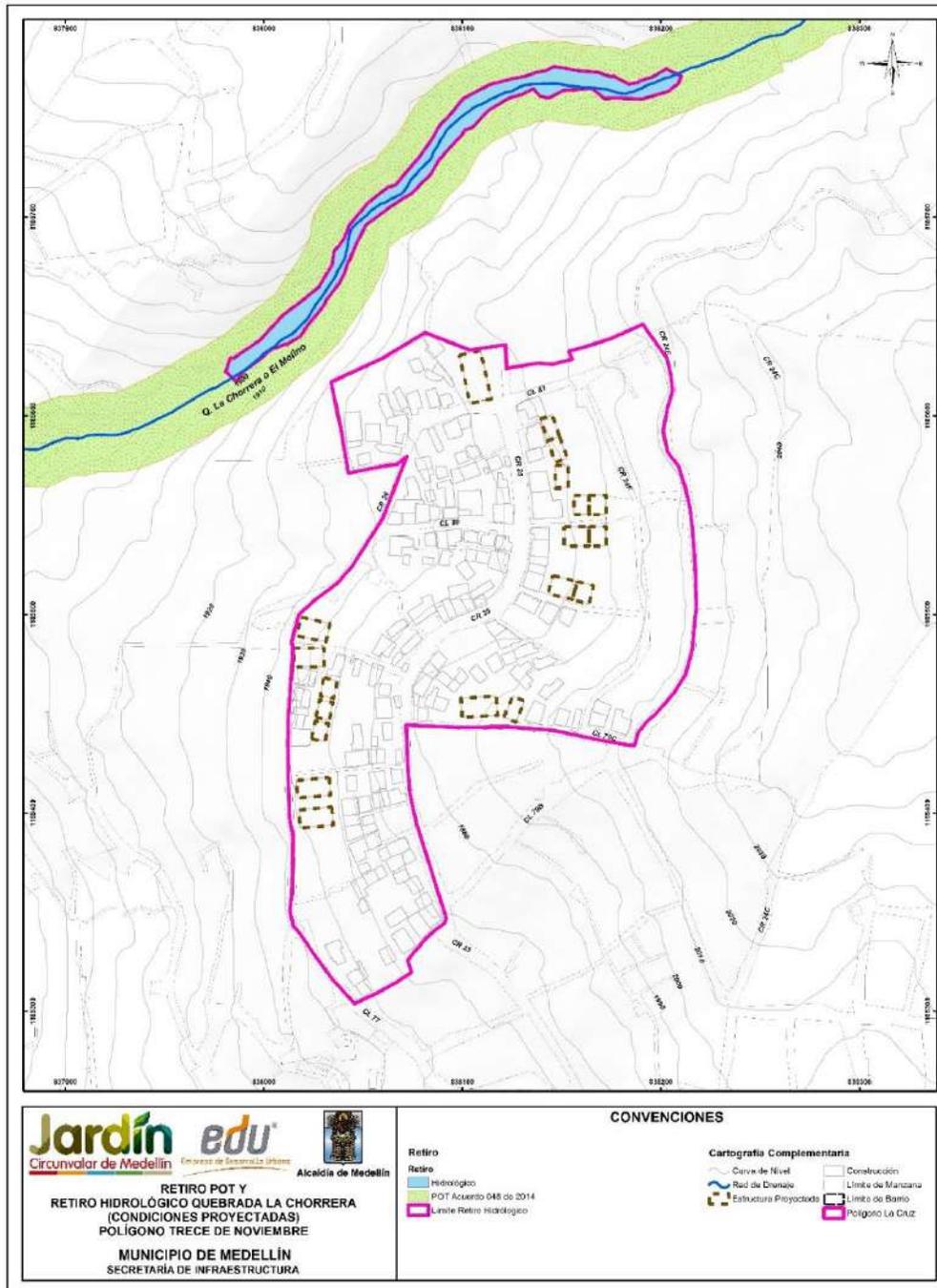
Mapa 76. Mancha de avenidas torrenciales en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz (Cv=0.3).
(24_LCHManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y 24_LCHManchaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 77. Amenaza por avenidas torrenciales en condiciones proyectadas para el Polígono La Cruz (Cv=0.3)
(28_LCHAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y 28_LCHAmenazaAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 78. Análisis de riesgo por torrencialidad para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono La Cruz (50_LCHRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_C y 50_LCHRiesgoAvenidasTorrencialesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 79. Retiro POT y retiro hidrológico por avenidas torrenciales para la Quebrada La Loca (LCHRetiroPOT-RetiroHidrológicoyGeológico_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO LA CRUZ</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 es el del Barrio La Cruz y corresponde al objeto principal de este estudio.

El Barrio La Cruz está ubicado en la Zona Nororiental del municipio de Medellín, Comuna 3 (Manrique) bajo el Cerro La Cruz. Los barrios aledaños son, al norte el Barrio Bello Oriente, al sur el Barrio La Honda, al occidente el Barrio El Raizal y al oriente la Vereda Piedras Blancas y Matasanos del Corregimiento de Santa Elena. El Barrio La Cruz se encuentra ubicado en la vertiente sur de la microcuenca de la Quebrada El Molino y la vertiente norte de la microcuenca de la Quebrada La Honda.

De este polígono, se ha efectuado el estudio de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del mismo. Se tuvieron en cuenta tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan el Polígono El Faro, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

Los estudios de amenaza se enmarcaron 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). De acuerdo con lo anterior, se procedió a delimitar la UMI de los polígonos de estudio en las Comunas 3 y 8 que hacen parte del Proyecto Barrios Sostenibles. De forma resumida, puede decirse que se incluyó el área en la que cualquier proceso de inestabilidad, potencial o existente, pudiera afectar las estructuras existente 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 unión de todas las UMI de la Comuna 8 tiene 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

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

afluentes y cañadas como por ejemplo La Hojarasca, La Potrera, Juan Alberto, Los Moros, La Caneca, La Tinaja y La Paloma, entre otras. La UMI del polígono ubicado al interior del Barrio La Cruz tiene un área aproximada de 29 hectáreas.

Dada la posición del Polígono La Cruz, el cual coincide con un lomo redondeado sobre la ladera, la elección de los límites de la UMI está orientada principalmente en la actividad y afectación de procesos de inestabilidad que puedan generarse en la parte alta y baja del polígono, y que por su direccionamiento pueden afectar el Polígono La Cruz. Los límites escogidos se manifiestan estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales del Polígono La Cruz específicamente.

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:

Las unidades geológicas encontradas en la UMI La Cruz corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), suprayacidos por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), cenizas volcánicas (Qcv) y llenos antrópicos.

En lo relacionado con los **Aspectos Geotécnicos** tanto de la UMI como del polígono, refiriéndose estos principalmente a la caracterización de los materiales determinados por medio de la exploración del subsuelo:

Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron pruebas de laboratorio sobre las muestras alteradas e inalteradas recuperadas por medio de los sondeos exploratorios. El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son humedad natural, límites de consistencia, granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 y gravedad específica. Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo para condiciones consolidadas drenadas. La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales.

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

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

requiere una gran cantidad de información en términos de parámetros de resistencia, por lo que se consideró conveniente unir todos aquellos ensayos de las diferentes UMI o polígonos que caracterizarán los diferentes estratos u horizontes del proyecto.

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

En lo relacionado con los **Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural** específicamente para el polígono:

Las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio de mantenimiento. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta clasificación debido a que estaban mejor estructuradas e incorporaban en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además, se encontraron estructuras en madera en un estado con notable deterioro. Las fundaciones de las estructuras son superficiales no convencionales dado que existe una gran cantidad de construcciones en las que sus cimentaciones son troncos de madera, terreno natural, delgadas losas en mampostería y/o concreto o simplemente estructuras con una esbeltez no proporcional entre altura y ancho.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza total por movimientos en masa para 50 años, teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g, se identifican focos de localizados dentro y fuera del polígono en la parte alta de la Zona 1 y otro conjunto localizado en la parte media y baja del polígono localizados en las zonas 2 y 3. Estos son sitios potencialmente inestables, ubicados en ladera urbanizada, de alta pendiente y desarrollada en el Horizonte IC de Dunitas de Medellín. En la zona se mapearon procesos morfodinámicos actualmente inactivos, al interior del polígono, a través del análisis multitemporal realizado. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas.

Se resalta un proceso morfodinámico actualmente activo que se localiza en la parte alta de la Zona 1, por fuera del polígono de estudio, con dimensiones de aproximadamente

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

10 m de longitud y 5.0 m de ancho afectando el corredor de viviendas cercanas. Sin embargo, en este sector no se propusieron obras de mitigación considerando los mismos motivos expuestos en el Numeral 20.1 para la Zona 1. Por lo tanto, será necesario que se realicen análisis adicionales que les permita tomar decisiones con respecto a las estructuras, localizadas por fuera del polígono de estudio, que se encuentran afectadas por dicho proceso.

Desde el punto de vista del riesgo por movimientos en masa, se pudo determinar que es más crítico el resultado del riesgo en términos de porcentaje de pérdidas económicas y da lugar a un gran número de viviendas del sector norte del polígono con riesgo alto. Al analizar las variables que finalmente permiten llegar a este resultado, se puede determinar que es la presencia de focos de inestabilidad dentro y fuera del polígono, en su costado noroccidental, la responsable principal de los resultados obtenidos.

El polígono finalmente fue zonificado en tres zonas, la Zona 1 comprende todo el costado nororiental, la Zona 2 comprende el costado noroccidental y la Zona 3 el costado suroccidental. El análisis de riesgo dio como resultado que aproximadamente el 60% de las estructuras de la zona 1 y el 19% de las estructuras de las zonas 2 y 3 se encuentran en riesgo alto frente a movimientos en masa que ocurran en el polígono. Después de realizar los diferentes análisis de estabilidad y evaluar las alternativas expuestas en las respectivas Fichas de Alternativas de Mitigación para cada zona, se pudo establecer que la solución más viable es la de reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto no mitigable y mejorar las estructuras que presentan riesgo alto mitigable. Es muy importante resaltar el hecho de que el resultado encontrado en este estudio coincide con el POT vigente para la ciudad de Medellín, ya que éste último cataloga parte de estas zonas como áreas de riesgo no mitigable.

Es importante tener en cuenta además que a pesar de considerarse a la reubicación de las viviendas como la alternativa viable, se deben de todas formas implementar medidas de mitigación menores tales como cunetas, trinchos y reforestación con fines de estabilización, destinadas a la protección contra fenómenos como la erosión.

Además, todas las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles que se construyan se recomienda sean de dos pisos en adelante, que tengan cimentaciones profundas, de ser el caso que las mismas puedan ser diseñadas para soportar efectos cortantes y que se ubiquen en las zonas donde el mapa de intensidades muestran que el factor de intensidad no está en el rango más crítico (zonas de color rojo). También se recomienda realizar análisis adicionales que les permita tomar decisiones con respecto a las excavaciones contempladas para el emplazamiento de los mismos. Para las estructuras que en el futuro queden en este sector se recomienda implementar sistemas de alerta temprana (fuera y dentro del polígono) y que se realicen campañas de sensibilización de los habitantes del polígono, que les permita organizarse en función del riesgo con el cual convivirían.

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

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Inundación y Avenidas Torrenciales** específicamente para el polígono:

Debido a la gran profundidad de la quebrada La Chorrera o El Molino la extensión de las manchas de inundación y avenidas torrenciales quedan contenidas en el cauce y no alcanzan a intersectar al Polígono La Cruz, debido también a la distancia que separa al polígono del cauce.

Dado que la evaluación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales muestra que el polígono está fuera de la zona de amenazas por estos fenómenos, tampoco se presenta riesgo asociado a estos eventos para el Polígono la Cruz.

Debido a que dentro del Polígono La Cruz no se tiene zonas con riesgo de inundación o avenidas torrenciales no se hace necesario el planteamiento de obras de mitigación para este.

Según la superposición realizada a la capa de edificaciones proyectadas por la EDU, y la capa de retiros a corrientes hídricas establecidos por el POT (2014), se observó que las edificaciones están fuera de los límites de la franja de retiro. A partir de los resultados del presente estudio de detalle puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha 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 La Cruz. 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. Después de realizar los diferentes análisis de estabilidad y evaluar las alternativas expuestas en las respectivas Fichas de Alternativas de Mitigación para cada zona, se pudo establecer que la solución más viable es la de reubicar las viviendas que se encuentran en riesgo alto no mitigable y mejorar las estructuras que presentan riesgo alto mitigable. Es muy importante resaltar el hecho de que el resultado encontrado en este estudio coincide con el POT vigente para la ciudad de Medellín, ya que éste último cataloga parte de estas zonas como áreas de riesgo no mitigable.

Finalmente, en el Anexo 09 se presenta la información correspondiente a la metodología del trabajo en SIG con el manual de usuario y con las rutinas que se implementaron para generar los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, además de las bases de datos, los archivos de mapa, los archivos raster y complementarios. La información se localiza en una carpeta (directorio) llamada `Proy_Riesgos_EDU`, y al interior de ésta, 14 subdirectorios que contienen la información requerida por los usuarios del proyecto y que son los necesarios para el entendimiento de la información, y a su vez al interior de

algunos de estos subdirectorios, se ubicaron otras carpetas que dan cuenta de diversos aspectos de la información geográfica (Figura 146).

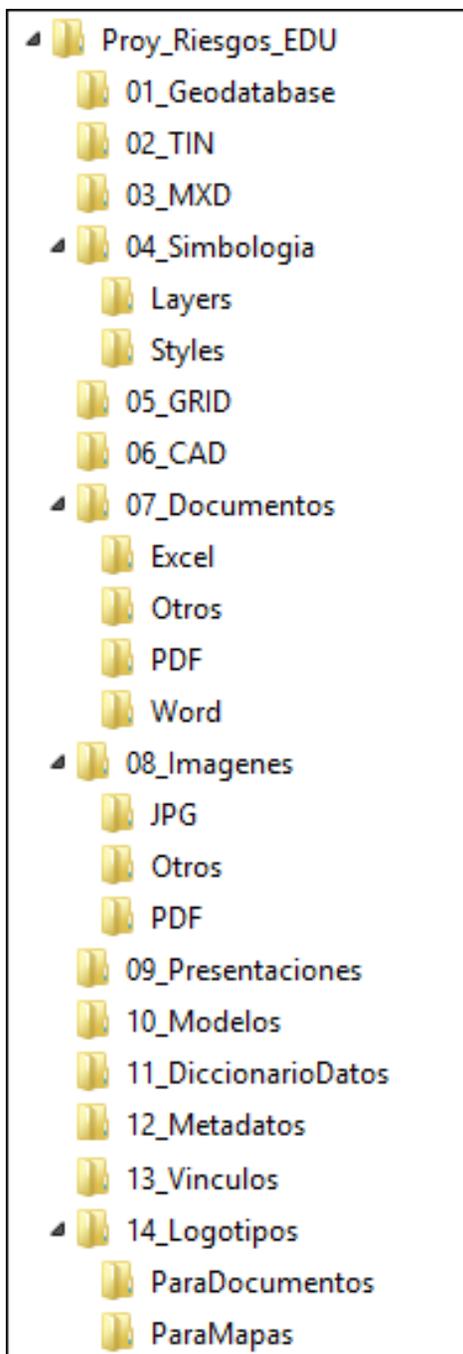


Figura 146. Estructura general de la información entregada

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

22. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMVA, (2012). Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2009). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión (Vol. Libro II). (C. y. Proyecto en conjunto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con los municipios de Medellín y Envigado, Ed.) Medellín: Área metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2007). Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Publicación Institucional No. 29 ed.). Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, CORNARE, CORANTIOQUIA, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2005). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá. Convenio de Cooperación No. 652 de 2005.

Aleotti P., Chowdhury R., (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review And New Perspectives[J]. Bull. Eng. Env., 58:21-44.

Amatruda G., Bonnard C., Castelli M., Forlati F., Giacomelli M., Morelli M., Paro L., Piana F., Pirulli M., Polino R., Prat P., Ramasco M., Scavia C., Bellardone G., Campus S., Durville J.L., Poisel R., Preh A., Roth W., Tentschert E.H., (2004). A key approach: the IMIRILAND project method. In: Bonnard C, Forlati F, Scavia C (eds) Identification and mitigation of large landslide risks in Europe—advances in risk assessment. European Commission Fifth Framework Program. Balkema, Rotterdam, pp 13–44.

Anbalagan, D., (1992). Landslide Hazard Evaluation And Zonation Mapping In Mountainous Terrain [J]. Engineering Geology, 32; 269 - 277.

Ariztizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007.

Barton, N., R. Lien, and J. Lunde (1974). “Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.” Rock Mechanics. Vol 6, No. 4, Vienna, Austria, Dec., pp. 417-440.

Bioexplora (2005). Estudio de suelos para la construcción de viviendas nuevas, ubicado en el Barrio La Cruz del Municipio de Medellín dentro del Proyecto Barrios Sostenibles. Cimentaciones Nuevas Construcciones. Informe Final, Enero de 2015.

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.

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

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.

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.

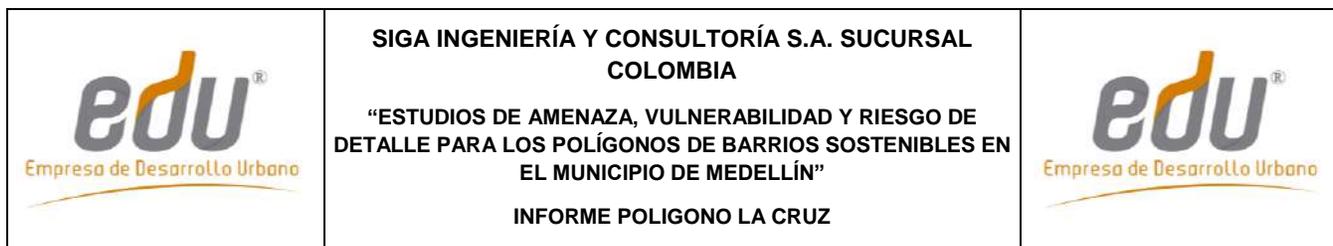
Daí, F. C. & Lee, C. F., (2001). Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study[J]. Can. Geotech. J., 38:911-923.

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) Lodalen slide: a probabilistic assessment. Canadian Geotechnical Journal, 43: 956–968.

Figueras, S., Macau, A., Goula, X., Gonzalez, M.(2005) “Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra”. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24.

FLO-2D, (2010). Reference Guide and GDS Manual.

FHWA, (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts. Third Edition.

García,R.; Rodriguez, 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). BoletínGeológico 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.

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

Hoyos, F., (2000). Evaluación hidrogeológica del Corredor del Túnel Aburra-Oriente, Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente, 47 p., Medellín.

Hoyos, F., (2001). Precipitaciones y deslizamientos, elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas, III Seminario Panamericano de deslizamientos, Memorias, 327-336, Cartagena.

Hoyos, F., (2007). Elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas. www.academia.edu.co Hoyos, F., 2009, Mina Conasfaltos. Bello - Copacabana. Hidrogeología de los depósitos aluviales del río Medellín en su zona de influencia. Informe. 65 p. Medellín.

Hoyos, F., (2012). Discriminación de flujos subterráneos hacia el Valle de Aburrá desde el Planalto de Santa Elena y los Valles de San Nicolás. Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente. 26 p. Medellín

Hoyos, F. & Arnason, B., (1994). Claves isotópicas en la hidrogeología de alta montaña, Boletín de Vías, XXI, 90, 51-64.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1995). Stable isotopes for high mountain hydrogeology in Colombia. IAEA Symposium on Water Resources Management. Viena.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá.

Hoyos P., F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá 1996

Hoyos P., F., Arnason, B. & Salazar, B., (1996). Del altiplano al valle: una conexión hidráulica inferida a partir de información isotópica. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Memorias pp 379-389. Guayaquil 1996.

Huggett R. J., (2007). Fundamentals of geomorphology, second edition, New York. pp 184-219.

Hungr, O., (1997). Some Methods of Landslide Intensity Mapping. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), Landslide risk assessment — Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19–21 February 1997. Balkema, Rotterdam, pp. 215–226.

INGEOCILCÓN LTDA (2014). “Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano”.

INGEOMINAS (2005). Mapa Geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:50.000, Memoria explicativa. Ingeominas 314p.

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

INTEGRAL (2010). Estudio hidrogeológico del Túnel de Oriente. Informe a la Concesión Túnel Aburrá Oriente, 49 p. Medellín.

INTEINSA (2011). Elaboración del estudio geológico-geotécnico e hidrogeológico de la zona Noralta (Z1_M1_1) del municipio de Medellín. Alcaldía de Medellín, I-2242-IG-01. Informe Final. Contrato No. 4600027335 DE 2010.

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.

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

San Buenaventura (2014). “Estudios y diagnóstico físico para la formulación de los proyectos barrios sostenibles en los sectores Golondrinas, Versalles, Rancho de lata al interior de los macroyectos Llanaditas, La Cruz y El Picacho, dentro del marco del proyecto cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín”. Polígono de Intervención La Cruz – Sector El Hoyo. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Contrato de Asociación 63 de 2014. Universidad San Buenaventura, Mayo 2014.

SGC, (2015). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.

Skempton, W., (1964). Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, 14, 75-101.

Takahashi, Tamotsu (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group, London, UK.

Taylor, D.W., (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York.

Thouret, J.C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., Arguedas, A., and Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru.

Tóth, J., 1963, A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *Journal of Geophysical Research*, 67, 4375-4387.

Universidad Nacional de Colombia, 1997, Evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia, 2000, Investigación de aguas subterráneas en la región Valles de San Nicolás, Medellín.

Uzielli, M. (2006). Risk and Vulnerability for Geohazards – Probabilistic Estimation of Regional Vulnerability to Landslides. ICG report 2006-2-7, Oslo.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacase, S., Kaynia, A.M. (2008). A conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. *Engineering Geology* 102. 251-256

Van Westen C J, Terlien M T J, (1996). An Approach Towards Deterministic Landslide Hazard Analysis in GIS: A Case Study From Manizales (Colombia) [J]. *Earth 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.

Vélez, M.V.; Smith, R. (1997). *Hidrología de Antioquia*.

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

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 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 POLIGONO LA CRUZ</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 existentes 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.